

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "ЛЭТИ"
ИМЕНИ В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

На правах рукописи

Жуков Илья Борисович

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Специальность: 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

С сайта автора
ibzh.eko3.ru
ibzh@yandex.ru

**Формальный,
у нас с ним нет
ни одной совместной
публикации**

→ Научный руководитель
доктор технических наук
профессор В. А. Новиков

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ	13
1.1. Состав и характеристика комплексов поперечной резки листового проката	13
1.1.1. Электромеханические системы ножниц поперечной резки, прижима и подачи листа	19
1.1.2. Анализ существующих теоретических и практических работ по электромеханическим системам комплексов резки	31
1.2. Математическое описание процессов резки. Анализ влияния основных параметров ножниц на оптимальный режим резки	35
1.2.1. Оптимальные режимы резки	35
1.2.2. Анализ влияния конструктивных и технологических параметров ножниц на процесс резки листа	37
1.2.3. Задачи обеспечения оптимальных траекторий движения ножей с помощью электромеханических систем управления	48
1.3. Оптимизация режимов работы электромеханических систем управления механизмами комплекса резки проката	52
1.3.1. Циклограммы и задачи оптимизации электромеханических систем ножниц	52
1.3.2. Электромеханическая система управления боковым зазором	56
1.4. Математическое описание и моделирование движения ножа для задач оптимизации процессов резки проката	61
1.4.1. Процесс резки листа	61
1.4.2. Расчёт и моделирование движения ножа в пакете MATLAB	62

1.4.3. Расчёты максимального усилия реза, усилия реза в зависимости от положения точки врезания	64
1.5. Выводы по главе	70
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НОЖНИЦАМИ С КАТЯЩИМСЯ РЕЗОМ . .	72
2.1. Математические модели электромеханической системы управления двухкривошипными ножницами с коромыслом	72
2.1.1. Кинематический расчёт двухкривошипных ножниц	72
2.1.2. Расчёт динамики электромеханической системы двухкривошипных ножниц с коромыслом	75
2.1.3. Компьютерная модель электромеханической системы в пакете MATLAB	85
2.2. Математические модели электромеханической системы управления двухкривошипными ножницами с копиром	92
2.2.1. Планы положений и скоростей	93
2.2.2. Расчёт динамики электромеханической системы двухкривошипных ножниц	97
2.3. Математические модели электромеханической системы управления однокривошипными ножницами	97
2.3.1. Планы положений и скоростей	97
2.3.2. Расчёт динамики электромеханической системы однокривошипных ножниц	100
2.3.3. Компьютерная модель электромеханической системы однокривошипных ножниц в пакете MATLAB	106
2.4. Исследование вариантов реализации оптимальных траекторий средствами двухдвигательных электроприводов	113
2.5. Выводы по главе	127

ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НОЖНИЦАМИ С КАТЯЩИМСЯ РЕЗОМ	129
3.1. Способы оценки энергозатрат за цикл резки и критерии оптимизации	129
3.2. Оптимизация закона управления ножом	134
3.3. Оптимизация закона управления ножницами	139
3.4. Автоматическая оптимизация бокового зазора	140
3.4.1. Алгоритм оптимизации бокового зазора	145
3.4.2. Организация базы данных оптимальных зазоров	149
3.4.3. Оценка затупления ножей	151
3.4.4. Анализ функционирования алгоритма оптимизации бокового зазора	152
3.4.5. Система автоматической оптимизации бокового зазора	157
3.5. Выводы по главе	162
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА	164
4.1. Анализ временных взаимодействий механизмов подачи, прижима и ножниц на интервале цикла реза	164
4.2. Минимизация времени цикла при заданном качестве резки	169
4.3. Оптимизация взаимных перемещений механизма качания рольганга и суппорта ножниц	176
4.4. Выводы по главе	188
ГЛАВА 5. РАСЧЁТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСАМИ РЕЗКИ	191
5.1. Описание комплекса резки	191
5.2. Математические описания. Расчёты и исследования электромеханических систем ножниц	201
5.3. Экспериментальные исследования на действующем комплексе	203
5.4. Анализ результатов	209
5.5. Выводы по главе	211

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	212
ЛИТЕРАТУРА	219
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЛИСТИНГИ СКРИПТОВ ДЛЯ MATLAB	228
П1.1. Листинги к первой главе	228
П1.2. Листинги ко второй главе	234
П1.3. Листинги к третьей главе	257
П1.4. Листинги к четвёртой главе	269
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ДВУХКРИВОШИП- НЫХ НОЖНИЦ.	272
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИ- ОННОЙ РАБОТЫ	278

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Ужесточение требований, предъявляемых к качеству толстолиствого проката, обуславливает необходимость совершенствования прокатного оборудования, в частности ножниц поперечной резки (НПР). При этом остро стоят задачи минимизации энергопотребления. В настоящее время для резки листового проката (толщиной от 7 до 50 мм и шириной до 5 м) в линиях отделки устанавливаются одно- и двухкривошипные ножницы с катящимся резом (НКР). В этих ножницах верхний нож дугообразной формы и большого радиуса режущей кромки обкатывается по прямому нижнему ножу, при этом за счёт меньшего смещения ножа относительно проката в местах их контакта обеспечивается более высокое качество резки, чем у ножниц других конструкций.

Большое значение для качества резки листового проката имеет траектория движения ножа. Её отклонение от траектории идеального обкатывания вызывает увеличение искривления отрезаемой кромки проката (которое не должно превышать 1,5 мм) и рост энергозатрат. Малые углы реза при врезании ножа в лист ведут к появлению пиков в усилии резки, следствием чего являются увеличение массогабаритных показателей ножниц и рост энергозатрат. В НИР, проводимых во ВНИИМЕТМАШ, НКМЗ, «Schloemann Siemag», «Moeller&Neumann» и др. отечественных и зарубежных фирмах, основное внимание уделялось совершенствованию отдельных конструктивных элементов и узлов, выбору конструктивных параметров ножниц, обеспечивающих оптимальную траекторию движения ножа. Тем не менее, из-за несовершенства кинематики ни одна конструкция ножниц не позволяет получить в зоне реза требуемую траекторию. Дальнейшее повышение точности реализации оптимальной траектории возможно только путём совершенствования электромеханической системы (ЭМС) ножниц, а именно заменой механической синхронизации вращения кривошипов на электрическую синхронизацию и обеспечением средствами системы управления (СУ) электроприводом изменяющегося по заданному закону угла рассогласования между кривошипами. В настоящее время на толстолистных станах внедря-

ются однокривошипные ножницы конструкции КО ВНИИМЕТМАШ, имеющие меньшие массогабаритные показатели, чем двухкривошипные ножницы традиционной конструкции.

На металлургических предприятиях проводились исследования оптимальных режимов резки (температуры, бокового зазора между ножами и т. д.) листового проката. Большой вклад в изучение влияния режимов резки на качество кромок и усилие резки внесли Crasemann H.I., Sperling H., Keller F., Крылов Н.И., Пальмин А.Д. и др. В зависимости от параметров проката между ножами устанавливается боковой (горизонтальный) зазор определённой величины. Отклонение величины зазора от оптимальной приводит к некачественному резу и увеличению усилия резки. В настоящее время установка зазора производится по таблицам, составленным на основе эмпирических данных. При этом не учитываются температура проката и связанные с ней отклонения механических характеристик, а также ряд параметров ножниц (затупление ножей, деформации в станине ножниц во время реза, постепенный износ механизма резания), в связи с чем, величина реального зазора, как правило, отличается от оптимальной. Поэтому, актуальна задача разработки принципов построения СУ, обеспечивающих автоматическую подстройку зазора под конкретные условия резки.

Существенный вклад в совершенствование систем управления электроприводами прокатного производства, и в частности комплексов резки внесли Дружинин Н.Н., Полухин П.И., Выдрин В.Н., Зементов О.И., Слежановский О.В., Скороходов А.Н. и др. Все приводы комплекса резки работают в повторно-кратковременном режиме, в связи с чем актуальна задача оптимизации режимов их работы и в особенности работы двигателей механизма резания (их суммарная мощность в ряде случаев превышает 1,5 МВт). Комплекс резки из-за необходимости остановки проката перед резом сдерживает производительность прокатного стана, и поэтому необходима минимизация цикла резки, которую можно осуществить за счёт совмещения работы различных механизмов. Это и многое другое говорит о необходимости дальнейшего исследования и совершенствования электромеханических систем управления комплексами резки листового про-

ката.

Представленная работа проводилась в рамках хоздоговорной НИР РАПС–46 «Исследование электромеханических систем ножниц с катящимся резом и выдача рекомендаций для проектирования», выполненной по заданию ОАО КО ВНИИ-МЕТМАШ, а также в рамках гранта ГТАТ/РАПС–25 «Разработка методов синтеза и принципов построения энергосберегающих электромеханических комплексов управления».

Цели и задачи исследований. Целью диссертационной работы является исследование и оптимизация электромеханических систем управления комплексами резки листового проката, повышающие качество обрезанной кромки листов, увеличивающие производительность и снижающие энергозатраты.

Достижение поставленной цели требует решения следующих основных задач:

1. Анализ существующих ЭМС управления комплексами резки листового проката с целью выявления недостатков и выработки предложений по их совершенствованию.

2. Разработка математических моделей электроприводов ножниц, позволяющих с высокой точностью имитировать поведение СУ за цикл резки.

3. Разработка принципов построения ЭМС управления комплексами резки, обеспечивающих повышение производительности комплекса резки, улучшение показателей качества готовых листов и снижение энергопотребления.

4. Проведение компьютерных исследований разработанных систем управления с целью оценки их функционирования в реальных условиях резки на НКР.

5. Проведение экспериментальных исследований действующей системы управления с целью оценки динамических характеристик элементов главных приводов НПП, а также влияния типа проката на работу системы управления.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические модели ЭМС ножниц (одно- и двухкривошипных), учитывающие кинематику, динамику движения, энергетические оценки механизмов резания, и инструментальные средства в среде Matlab5.2/Simulink, предназна-

ченные для решения задач исследования и оптимизации систем управления НПР с учётом процесса резки.

2. Методика формирования траектории движения ножа средствами ЭМС управления двухкривошипными ножницами с электрической синхронизацией, обеспечивающая регулирование перекрытия ножей при резке листа.

3. Методика оптимизации электроприводов одно- и двухкривошипных ножниц по критериям энергосбережения и производительности.

4. Алгоритм управления электроприводом устройства регулировки бокового зазора с автоматической минимизацией энергозатрат на цикл резки листа, обеспечивающий повышение качества обрезанной кромки.

5. Методика расчёта режимов работы электроприводов механизмов комплекса резки листового проката по условию минимизации энергозатрат.

Научная новизна положений работы заключается в следующем:

1. Математические модели одно- и двухкривошипных ножниц учитывают процессы взаимодействия ножа с разрезаемым прокатом, механические свойства разрезаемого металла, переменность усилия реза в зависимости от положения ножа и включают оценку энергозатрат за цикл резки. Модели ориентированы на решение задачи автоматической оптимизации электромеханических систем ножниц в процессе резания проката. В отличие от существующих методик кинематического расчёта в разработанной модели двухкривошипных ножниц углы поворота кривошипов рассматриваются не связанными жёстко друг с другом. Кроме того, для определения координат механизма резания вместо решений систем уравнений с несколькими переменными, предлагаемых другими авторами, используется решение нелинейного уравнения с одной обобщённой переменной.

2. Предлагается использовать электрическую синхронизацию движения кривошипов двухкривошипных ножниц взамен применяемой на сегодняшний день механической. Это, при управлении углом рассогласования по разработанной методике, позволит повысить качество резки (устранить «стрелу прогиба») за счёт более точной реализации катящегося движения ножа и регулировки перекрытия между ножами в процессе резки в зависимости от толщины и марки

стали проката.

3. Методика оптимизации электроприводов ножниц, учитывающая кинематические и динамические параметры механизма резания, а также энергосиловые данные процесса реза, позволяет выполнить расчёт режима управления главным приводом ножниц, обеспечивающего минимальное энергопотребление и осуществление реза за заданный промежуток времени. Достижение этих целей осуществляется за счёт выделения в траектории движения ножа двух зон, одна из которых определяет производительность комплекса (задача на поиск экстремума функционала с неподвижными границами), а вторая в рассматриваемых пределах варьирования её длительности на производительность не влияет (задача с подвижными границами). Разработанный для этой цели алгоритм поиска минимума функционала основан на конечно-разностном методе Эйлера, учитывает ограничения, налагаемые на значения искомой экстремали (закона управления) и её производной, осуществляет поиск экстремали с переменным числом шагов.

4. Алгоритм управления боковым зазором предусматривает измерение усилия реза месдозами и автоматическую подстройку зазора с учётом толщины и температуры проката, его механических свойств, а также износа ножей ножниц и возможного увеличения зазора вследствие деформации станины ножниц, с целью получения минимального усилия резания. Алгоритм осуществляет накопление статистических данных об оптимальных зазорах для резки проката в различных режимах и минимизирует усреднённую величину приведённого усилия резки. Приведение усилия резки осуществляется по предложенной формуле, разработанной на основе анализа влияния факторов, задающих режимы резки. Для ускорения адаптации к изменению параметров ножниц производится ранжирование данных о приведённом значении усилия реза.

5. Разработанная методика расчёта режимов работы электроприводов механизмов комплексов резки основана на формализованном подходе к синтезу алгоритма управления временными параметрами работы отдельных механизмов комплекса резки и позволяет повысить производительность комплекса резки и

минимизировать потребление электроэнергии при заданной производительности.

Содержание работы раскрывается в пяти главах.

В первой главе диссертаций приведены состав и характеристика комплексов резки толстолистового проката. Рассмотрены варианты реализации главного привода ножниц поперечной резки. Особое внимание уделяется вопросам технологии резки с позиций управления и оптимизации качества и энергозатрат процесса резки.

Выявляются основные параметры, задающие режим резки. Выполняется математическое описание процессов резки проката. Ставятся задачи оптимизации процессов резки и связанные с ними задачи исследования и автоматической оптимизации ЭМС управления комплексом резки.

Во второй главе диссертационной работы разрабатываются математические модели ЭМС управления ножницами различных кинематических исполнений, исследуются варианты реализации оптимальных траекторий средствами однодвигательных и двухдвигательных электроприводов.

Осуществляется компьютерная реализация математических моделей, необходимая для проведения исследований существующих и вновь разрабатываемых алгоритмов управления главными электроприводами ножниц поперечной резки с целью оценки их работы в условиях, максимально приближенных к реальным, а также для синтеза систем управления. Проводится исследование динамики ЭМС управления. Разрабатываются алгоритм расчёта режима управления углом рассогласования между кривошипами двухкривошипных ножниц и структура СУ, позволяющие реализовать оптимальную траекторию движения ножа.

В третьей главе проводится исследование зависимости энергозатрат от режима резки, свойств листового проката, состояния режущей части ножниц, бокового зазора ножей. Рассматриваются способы оценки энергозатрат за цикл резки и критерии оптимизации. Проводится разработка алгоритмов автоматической оптимизации по критериям минимизации энергозатрат ножниц. Осуществляется синтез системы автоматической оптимизации энергозатрат ножниц. Рассматри-

ваются аппаратные и программные средства системы оптимизации.

Разрабатывается алгоритм автоматической подстройки бокового зазора между ножами по усилию резки, а также алгоритм оптимизации задания положения кривошипа ножниц по критерию энергосбережения.

В четвёртой главе осуществляется анализ временных взаимодействий механизмов подачи, прижима и ножниц на интервале цикла реза. Выполняется минимизация энергозатрат комплекса резки при заданной длительности цикла порезки раската.

Рассматриваются варианты оптимизации совместной работы механизма резания ножниц и механизма качания рольганга качающегося.

Пятая глава посвящена анализу и исследованиям системы управления электроприводами комплекса поперечной резки толстолиствого проката стана 2800 ОАО «Уральская сталь», а также выработке рекомендаций по её совершенствованию с использованием результатов диссертационной работы.

Определяются возможности для повышения производительности комплекса резки. Проводятся сопоставления результатов моделирования с экспериментальными исследованиями.

В приложении 1 приведены исходные тексты программ на языке скриптов MATLAB 5.2, разработанные для моделирования и оптимизации режимов работы электромеханических систем (ЭМС) комплекса поперечной резки.

В приложении 2 приведён кинематический расчёт механизма резания двухкривошипных ножниц с электрической синхронизацией.

В приложении 3 приведены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

1.1. Состав и характеристика комплексов поперечной резки листового проката

Отделка толстого листа в общем случае включает в себя правку в горячем состоянии, охлаждение, проверку поверхности и зачистку, ультразвуковой контроль внутренних дефектов, обрезку концов, обрезку кромок, резку на мерные длины, взятие проб на испытания, маркировку штамповкой или окраской, правку в холодном состоянии и штабелирование. Для получения необходимых свойств лист подвергается термообработке (нормализации, отжигу для снятия внутренних напряжений, закалке и отпуску). Резка листового металла должна обеспечивать получение листов заданных размеров с точностью $+2$ мм на 1 м длины с чистыми (без заусенцев), параллельными кромками (косина реза не должна превышать $0,5\%$ от ширины B листа). Изменение плоскостности листа после порезки не должно превышать $1,5$ мм на 1 м ширины. Резка металла может осуществляться в горячем и холодном состоянии. Холодная резка металла обеспечивает более высокое качество отрезанного края листа и бóльшую точность отрезанной длины проката. Преимуществом горячей резки является более низкие усилия реза.

Современные комплексы поперечной резки толстолистового проката должны обеспечивать порезку листов на мерные длины с высоким качеством реза, с заданными допусками на длину листа и минимальными отклонениями от перпендикулярности кромок, а также уборку обрезки от ножниц и сброс ее в специальный короб.

Рассмотрим состав оборудования комплексов резки и порядок выполнения операций на них на основе типового проекта участка ножниц №2, разработанного КО ВНИИМЕТМАШ для стана 2800 ООО «Уралсталь» в 2004 г, сравнивая его с введённым НКМЗ в эксплуатацию в 2005 г комплексом резки стана 5000 цеха ЛПЦ-3 ООО «Северсталь». Разработанный КО ВНИИМЕТМАШ

комплекс предназначен для порезки раскатов толщиной $h = 7 \dots 50$ мм, шириной $B = 1400 \dots 2750$ мм и температурой до 500°C на листы мерной длины в пределах $l = 4500 \dots 12\,500$ мм. Планировка участка приведена на рис. 1.1.

Оборудование участка ножниц включает следующие механизмы:

- рольганг перед ножницами, предназначенный для подачи листов к ножницам для порезки их на мерные длины, а также подачи листов для порезки переднего и заднего концов раската в обрезь;
- устройство для установки листа перед ножницами;
- рольганг со сталкивателем рис. 1.2 у ножниц, предназначенный для подачи листа к ножницам поперечной резки и для сталкивания обрезка, остающегося на столе ножниц, на транспортёр обреза рис. 1.3;
- ножницы поперечной резки (НПР) для резки листов на мерные длины, а также порезки переднего и заднего концов раската в обрезь, оснащённые устройством для смены кассет;
- рольганг качающийся, предназначенный для приёма раскатов при порезке их на ножницах и транспортировки листов мерной длины на рольганг за ножницами;
- рольганг за ножницами, предназначенный для транспортировки отрезанного листа от ножниц поперечной резки;
- упор передвигной, установленный за ножницами поперечной резки и предназначенный для остановки раската на рольганге с целью порезки его ножницами на листы заданной длины и точности, а также свободного пропуска отрезанного листа или раската по рольгангу;
- установка мерительных роликов, предназначенная для измерения длины отрезаемых листов и снижения скорости транспортировки листа при подходе к щиту передвигного упора;
- устройство для уборки обреза от ножниц, служащее для приема обрезаемых на ножницах передних и задних концов раскатов, а также пробных планок, передачи их и сброса соответственно в короб и карман.

Кроме перечисленного, в состав комплексов резки могут входить сдвоен-

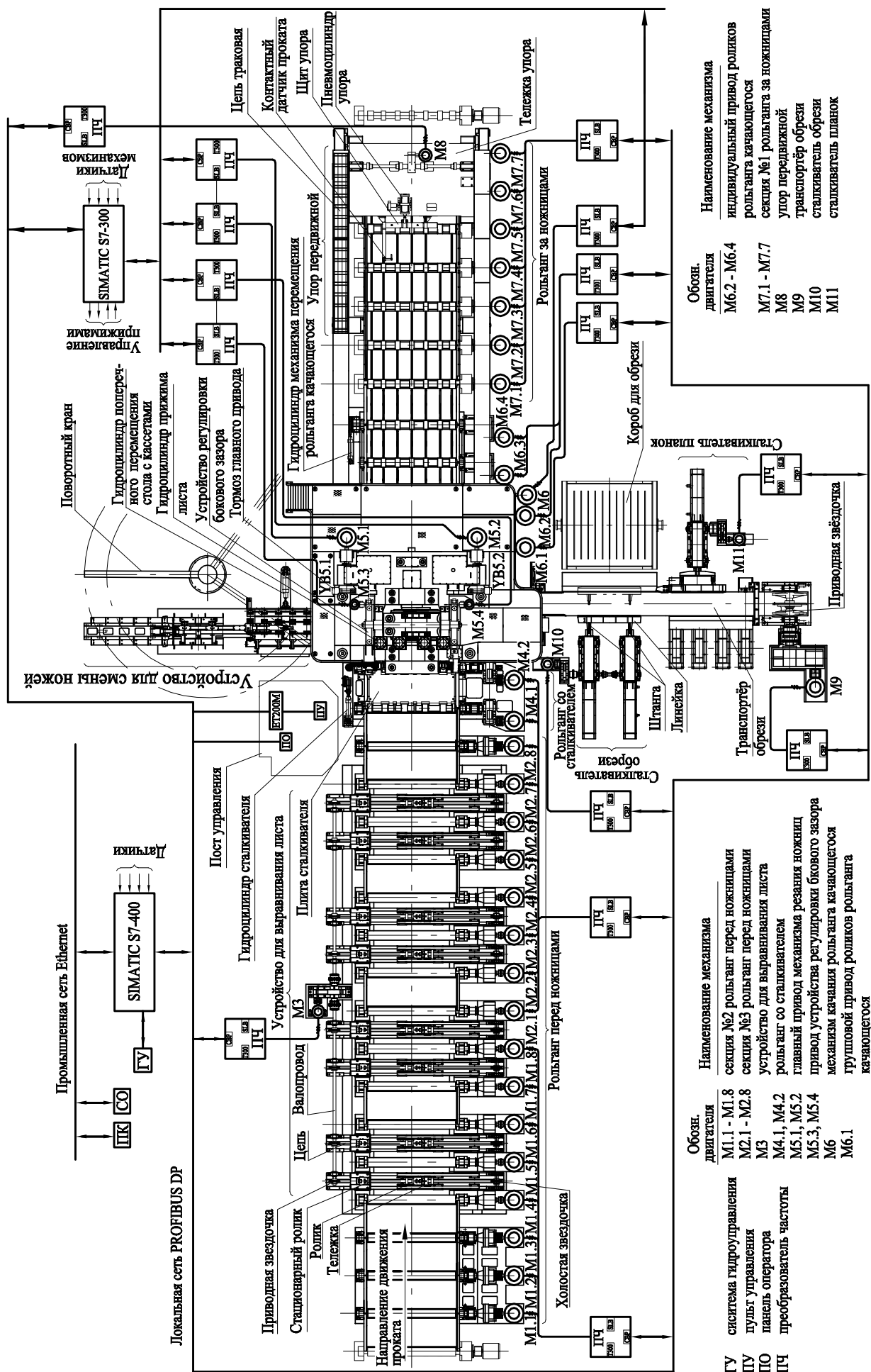


Рис. 1.1.1. Планировка участка однокривошипных ножиц. Вид сверху.

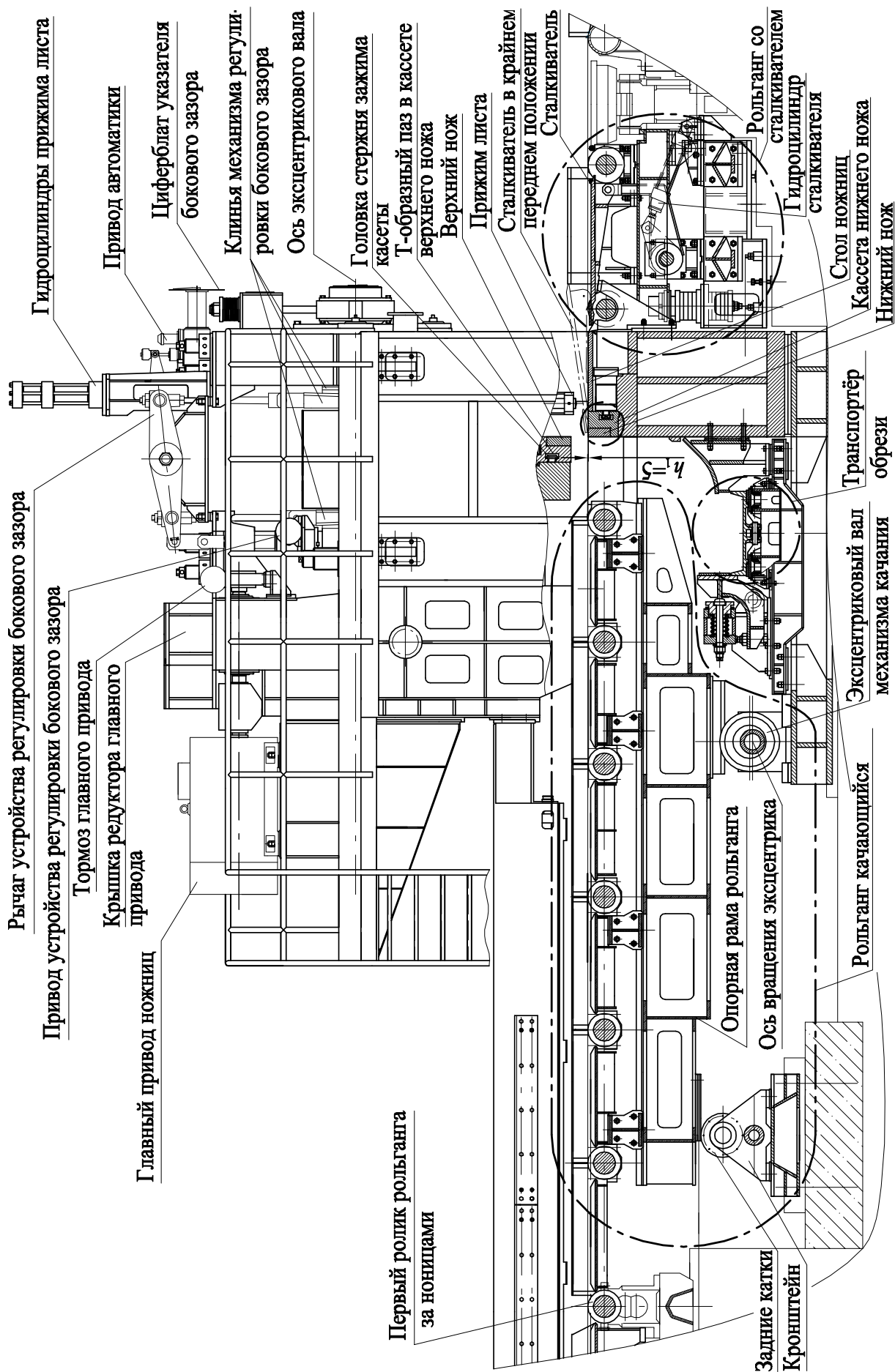


Рис. 1.2. Однокрылошпильные ножицы с катящимся резом. Вид сбоку.

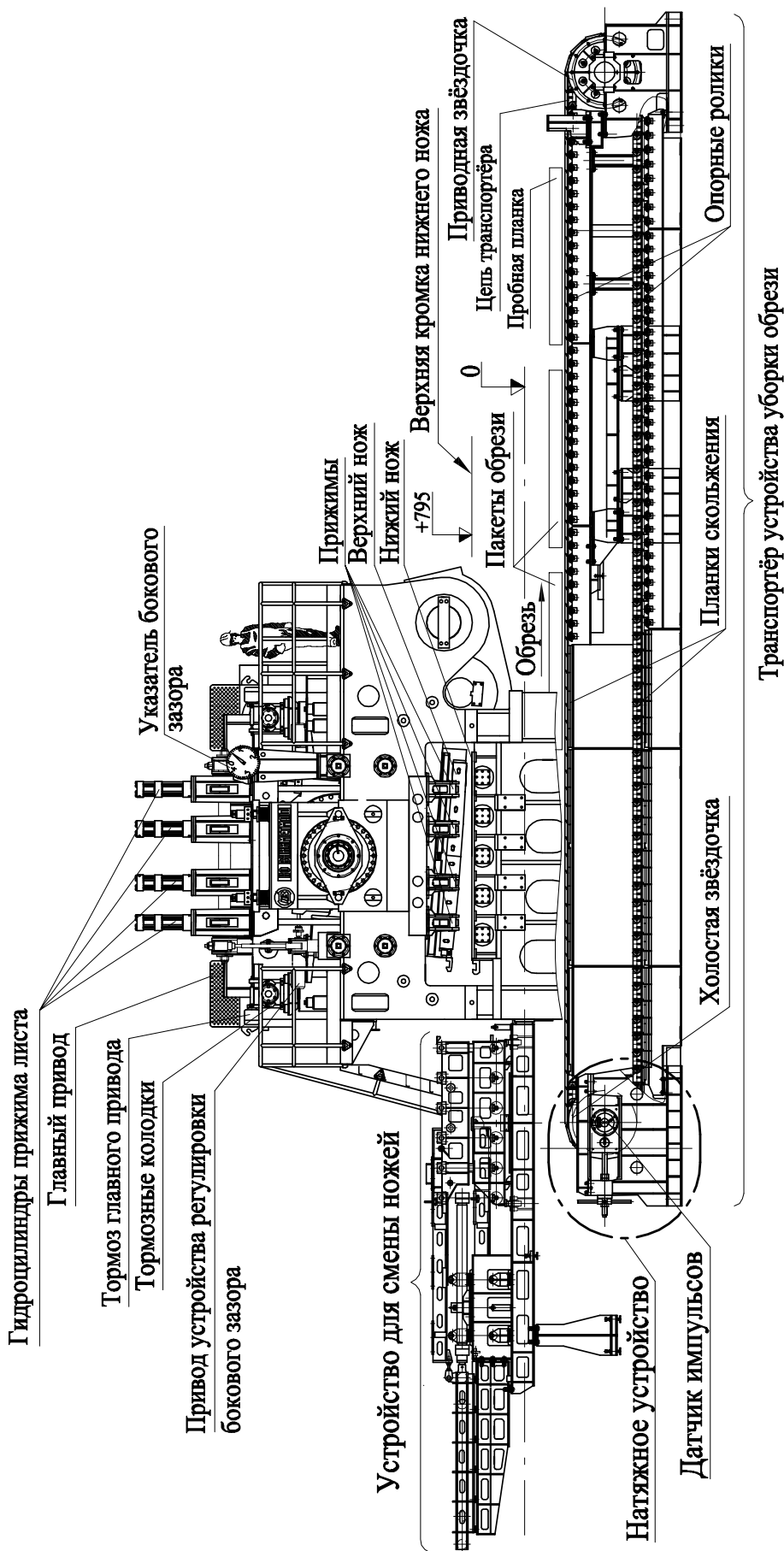


Рис. 1.3. Однокривошипные ножицы с катящимся резом. Вид спереди.

ные кромкообрезные ножницы (СКОНЫ) и скрапные ножницы. За ножницами может устанавливаться листопрямительная машина для правки неровных кромок.

С поста управления, установленного перед ножницами, осуществляется управление всеми механизмами участка ножниц, за исключением некоторых вспомогательных операций (например, смены ножей и некоторых других). Для наблюдения за механизмами, не находящимися в непосредственной видимости оператора (устройство для уборки обрезки, рольганг за ножницами и пр.), устанавливаются видеокамеры. Управление механизмами предусматривается в автоматизированном и ручном режимах, кроме того, для наладочных работ предусматривается работа механизмов в толчковом режиме и на ползучей скорости (10% от номинальной).

Электропривод большинства механизмов частотный асинхронный и предусматривает генераторное торможение двигателей с рекуперацией электроэнергии в сеть. Механизмы, требующие фиксации положения в остановленном состоянии (механизм резания, механизм качания рольганга качающегося, упор передвижной, сталкиватели планок и обрезки), оснащаются электромагнитными тормозами. Катушки тормозов для увеличения быстродействия и уменьшения износа тормозных колодок включаются с форсировкой. Контроль крайних и исходных положений механизмов с электро- и гидроприводом, имеющих ограниченный ход, (устройств выравнивания и прижима листа, сталкивателя рольганга со сталкивателем, устройства регулировки бокового зазора, механизма качания рольганга качающегося, механизмов подъёма щита упора и перемещения тележки упора, механизма опускания мерительных роликов, сталкивателей обрезки и планок, устройства смены кассет) осуществляется индуктивными датчиками. Контроль текущего положения (механизма резания, устройства установки листа, тележки передвижного упора) и перемещения (транспортёра обрезки) осуществляется с помощью импульсных или кодовых датчиков. Контроль положения некоторых устройств (в данном комплексе, механизма регулировки бокового зазора) может осуществляться с помощью магнитострикционных датчиков линейного перемещения.

1.1.1. Электромеханические системы ножниц поперечной резки, прижима и подачи листа

Основными параметрами ножниц являются: максимальное усилие резания $F_{\text{макс}}$, ход ножей H , длина ножа L и число ходов (резов) в минуту n (производительность ножниц). Ножницы поперечной резки, применяемые для порезки раската на мерные длины, а также для обрезки переднего и заднего концов, включают в себя кроме собственно механизма резания, механизмы регулировки бокового зазора, прижима листа, смены кассет и зажима кассет.

Механизм резания. На рассматриваемом участке реза установлены однокривошипные ножницы с катящимся резом (НКР) рис. 1.2 и 1.3. Суппорт ножниц смонтирован на эксцентриковой шейке кривошипного вала, расположенного перпендикулярно режущей кромке нижнего ножа. В нижней части суппорта закреплена верхняя кассета с ножом, который имеет дугообразную режущую кромку. Кассета с нижним неподвижным ножом закреплена на столе ножниц. Угол резания $\alpha = 2^{\circ}30' \dots 2^{\circ}50'$. Рез осуществляется при повороте кривошипа из первого исходного положения во второе (прямой ход) или из второго в первое (обратный ход). В положении для смены кассет обеспечиваются максимальный раствор ножей и параллельность направляющих верхней и нижней кассет для их смены. Контроль углового положения кривошипа осуществляется импульсным датчиком, установленным на кривошипном валу. В качестве реперной метки начала отсчёта координаты используется нулевой импульс этого датчика в крайнем нижнем положении кривошипного вала. Фиксация кривошипного вала в исходных положениях осуществляется электромагнитными тормозами 100YB1 и 100YB2 (рис. 1.4).

Привод ножниц осуществляется от двух двигателей мощностью по 400 кВт каждый, работающих на общий вал редуктора. Управление двухдвигательным электроприводом главного привода ножниц осуществляется от двух отдельных комплектных частотно-регулируемых преобразователей SIMOVERT MASTER DRIVES фирмы «Siemens» по схеме «ведущий–ведомый», связанных по сети SIMULINK волоконно-оптическим кабелем, и обеспечивает выравнивание на-

грузок (моментов) электродвигателей в пределах 10% и остановку ножниц в исходных положениях с точностью $\pm 1^\circ$ угла поворота кривошипного вала. Ножницы могут включаться на выполнение каждого реза в ручную или могут выполнять порезку листа на мерные длины в автоматическом режиме после обрезки переднего конца.

Генераторное торможение двигателей осуществляется с рекуперацией энергии в сеть переменного тока [9]. При этом закрывается трёхфазный выпрямительный мост с тиристорами, работающими в режиме ключей, и открывается инверторный мост с автотрансформатором, повышающим напряжение от ЭДС двигателя на 20% для компенсации падения напряжения в цепи при рекуперации энергии.

Ведущий электропривод получает задание по сети PROFIBUS DP от контроллера участка ножниц, причём задание формируется в программе по сигналу пульта оператора с учётом разрешающих блокировок (остановленных рольгангов у ножниц, зажатых кассетах и наличии давления масла в редукторе привода).

Сданные в эксплуатацию в 2005 г. цеху ЛПЦ-3 двухкривошипные НКР с копиром оснащены двухдвигательным приводом постоянного тока мощностью 1600 кВт. Валы обоих двигателей подсоединены к быстроходным валам общего для них раздаточного редуктора. За цикл резки кривошипы ножниц совершают полный оборот. Синхронизация их вращения обеспечивается механическими средствами. Преобразователи DV300 фирмы «General Electric» включены по схеме «ведущий-ведомый» и управляются от локального контроллера SIMATIC S7-300, связанного по сети PROFIBUS DP с контроллером более высокого уровня.

Механизм прижима листа предназначен для прижима листа по всей его ширине к столу ножниц перед порезкой, чтобы исключить его проскальзывание в процессе реза. От конструкции прижима в большой степени зависит точность резки листа. Прижимы для резки листового проката выполняются, как правило, гидравлическими. При вмятии ножей лист стремится повернуться вправо под действием момента, равного $F_{рез}a$ рис. 1.5. При этом со стороны

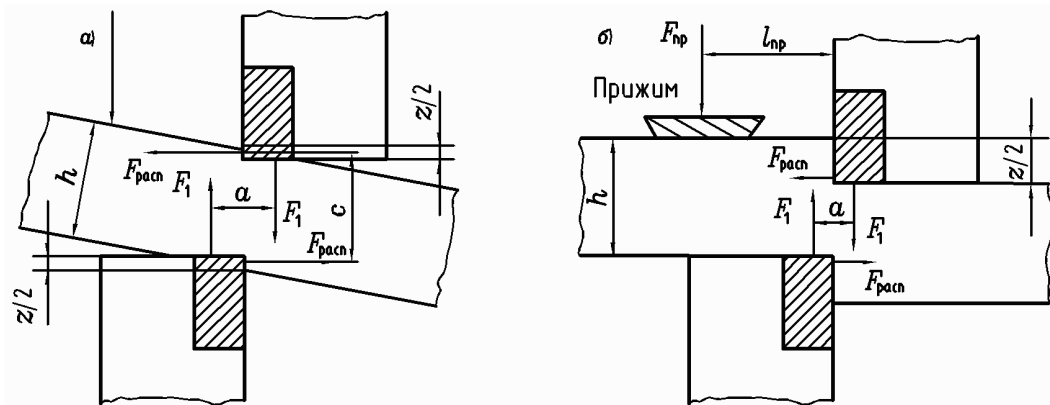


Рис. 1.5. Распорные усилия, возникающие при резке металла.

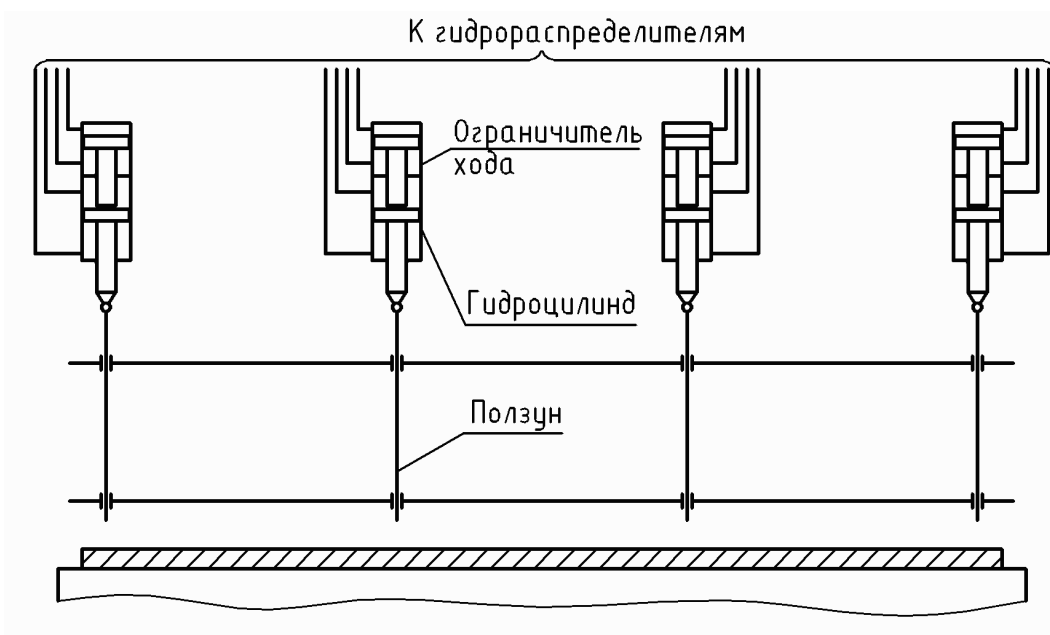


Рис. 1.6. Кинематическая схема прижима листа.

кромки ножей будут возникать горизонтальные усилия $F_{\text{расп}}$, создающие момент $F_{\text{расп}}c = F_{\text{рез}}a$. Ввиду того, что величины плеч a и c неизвестны, точно определить значения силы $F_{\text{расп}}$ не представляется возможным. Для уменьшения распирающих усилий лист прижимают с усилием $F_{\text{пр}} = (0,03 \dots 0,05)F_{\text{рез}}$. В этом случае $F_{\text{расп}} = (0,1 \dots 0,15)F_{\text{рез}}$. В рассматриваемом устройстве механизм прижима состоит из четырёх гидроцилиндров, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга рис. 1.6. Зажим листа производится подачей давления в поршневую полость гидроцилиндра, при этом шток перемещается и опускает ползун вниз, прижимая лист к столу. Количество включаемых гидроцилиндров зависит от ширины листа.

Электромеханические системы подачи листа. Для подачи и отвода листового проката используются в основном рольганги с ребристыми роликами или с гладкими роликами с полый бочкой вала. Длина бочки ролика немного превышает максимальную ширину отрезаемого листа (обычно на 100 мм) и в рассматриваемом комплексе составляет 2,8 м. Диаметр бочки ролика 300 ... 330 мм. Масса ролика таких габаритов около 1600 кг. Шаг роликов рольганга составляет 1000 ... 1500 мм. Передаточное число i редуктора при таком диаметре ролика и номинальной скорости рольганга 1 м/с выбирают обычно в пределах 9 ... 10.

Рольганги по управлению разбиваются на секции. Привод роликов обычно индивидуальный от рольганговых асинхронных двигателей, подключаемых к частотным преобразователям. Причём, от одного преобразователя запитываются несколько двигателей (мощностью ~5 кВт). Типовая схема электропривода рольганга приведена на рис. 1.7. Режим работы электродвигателей рольгангов повторно-кратковременный. Номинальная скорость транспортировки проката составляет обычно 1 м/с, предусматривается возможность регулирования скорости и реверса. Управление рольгангами осуществляется с учётом блокировок примыкающего оборудования. Предусматривается совместное (согласованное по скорости) и отдельное управление секциями рольганга, а также согласованное управление с секциями примыкающих рольгангов.

В рассматриваемом комплексе ЭМС подачи листа включают в себя роль-

ганг перед ножницами, устройство выравнивания листа, рольганг со сталкивателем, рольганг качающийся, рольганг за ножницами и передвижной упор. В начале рассмотрим рольганги.

Рольганг со сталкивателем рис. 1.2 помимо подачи листа к ножницам осуществляет сталкивание обрезка, остающегося на столе ножниц после порезки листа на мерные длины. Сталкиватель оснащён гидроприводом. Включением гидроцилиндра трансмиссионный вал с рычагами поворачивается и перемещает связанную с ними настильную плиту (сталкиватель) в сторону линии реза, которая, упираясь своими концами в обрезок, сбрасывает его на транспортер обреза, а затем возвращается в исходное положение.

Рольганг качающийся. При резке верхний нож ножниц поперечной резки может давить через лист на установленный за ними отводящий рольганг, что может привести к аварийной ситуации. Кроме того, на отрезаемый лист будет действовать момент, поднимающий вверх дальний от ножниц край отрезаемого листа. Чтобы этого не происходило, отводящий рольганг делается качающимся. Перед началом реза край рольганга, находящийся у линии реза, опускается на расстояние не меньше суммы максимальной толщины листа и максимального перекрытия ножей. Механизм качания рольганга может иметь свой собственный привод (как в ножницах КО ВНИИМЕТМАШ) или быть механически связанным с суппортом ножниц поперечной резки (как у НКМЗ). Типовая схема системы управления механизмом качания рольганга качающегося приведена на рис. 1.8 Качание рольганга при резке листа осуществляется вокруг оси задних катков (рис. 1.2). При опускании (подъёме) качающегося рольганга эксцентриковый вал, связанный с тихоходным валом редуктора, поворачивается на 180° . Система управления механизмом качания содержит датчик контроля текущего положения 119BR и датчики контроля поднятого положения 119BQ1 и 119BQ2.

Устройство для установки листа перед ножницами предназначено для выравнивания раската на рольганге перед его порезкой (рис. 1.9). Раскаты при его помощи устанавливаются так, чтобы боковая кромка листа была перпендикулярна линии реза. Данные устройства могут иметь различную конструкцию.

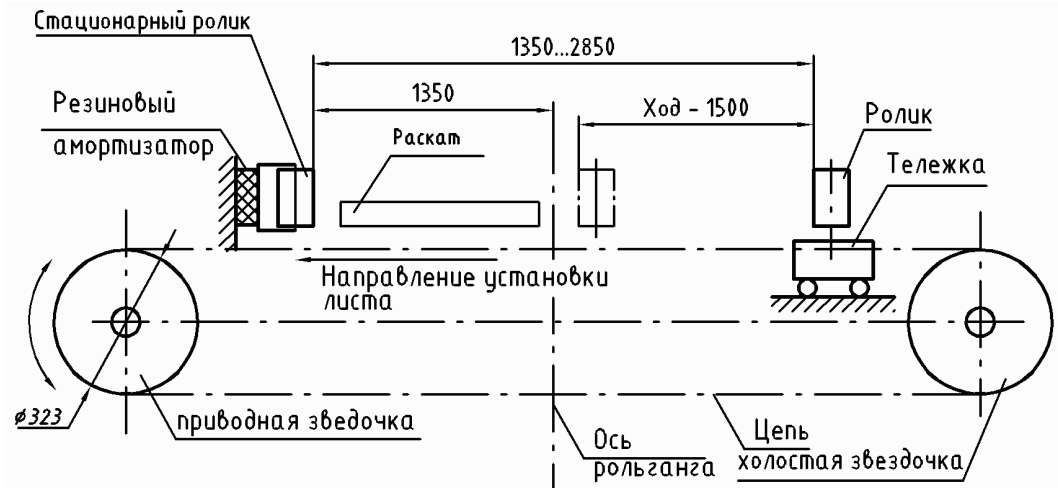


Рис. 1.9. Устройство выравнивания листа.

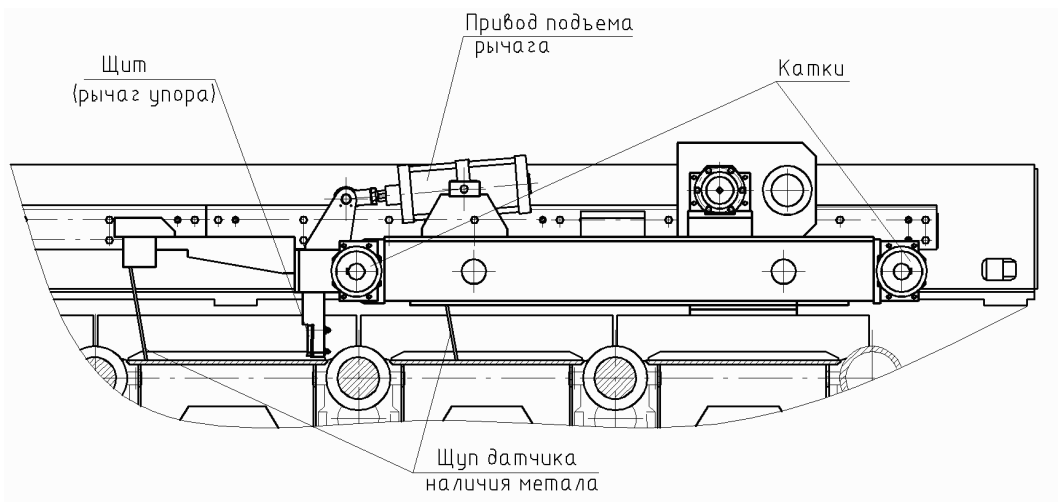


Рис. 1.10. Упор передвижной.

В начале, раскат подается вдоль одного края рольганга к ножницам поперечной резки. Толкающие ролики находятся в исходном положении, на максимальном удалении от стационарных роликов. Раскат по рольгангу поступает в зону устройства установки листов и вступает в контакт с установленным на оси рольганга датчиком наличия листа, который дает команду на снижение скорости рольганга (до 0,5 м/с) и разрешает включение устройства установки листа на выравнивание. Толкающие ролики входят в контакт с раскатом и перемещают его к стационарным роликам устройства. Раскат перемещается до упора в стационарные ролики и выравнивается вдоль борта рольганга. Раскат считается выравненным, когда при включённом приводе тележки прекращают движение. После выравнивания раската тележки с толкающими роликами возвращаются в исходное положение, при этом дается разрешение на увеличение скорости транспортирования раската рольгангом до 1 м/с.

В некоторых случаях прокат не выравнивают вдоль одного из бортов рольганга, а центрируют относительно его оси. Общим недостатком всех выравнивающих устройств является то, что они обеспечивают выравнивание раската только вдоль одного борта рольганга, из-за чего при порезке узкого раската ножи затупляются неравномерно по всей длине. Увеличить срок службы ножей между переточками можно если один поступающий на резку раскат выравнивать вдоль одного борта рольганга, а следующий вдоль другого. На стане 5000 ширина выпускаемых листов колеблется от 1500 мм до 4800 мм. В периоды, когда ширина выпускаемого проката составляет 1500...2400 мм срок службы ножей можно удвоить.

Устройства измерения длины отрезаемого листа (упор передвижной и установка мерительных роликов). Определение мерной длины отрезаемого листа на сегодняшний день производится в основном двумя способами, не требующими разметки проката: при помощи передвижного упора, расположенного за ножницами, или при помощи оснащённых импульсными датчиками мерительных роликов и расставленных на заданных расстояниях от линии реза фотодатчиков, выполняющих роль реперов.

Упор передвижной рис. 1.10, устанавливаемый за ножницами над рольгангом, служит для остановки раската на рольганге и установки его переднего торца относительно линии реза ножниц на расстоянии, соответствующем мерной длине листа. Остановка упора производится с учетом усадки листов при их остывании. Чтобы не происходило защемления листа и трения его края между нижним ножом и щитом упора во время резки, щит перед ней убирается от зажатого прижимом раската [71].

В рассматриваемом комплексе упор состоит из стационарной части (зубчатых реек), тележки и цепи траковой, предназначенной для подключения электрооборудования тележки к шкафам управления. На тележке смонтированы амортизатор, привод перемещения тележки, а также датчики автоматизации. Узел амортизатора включает щит упора с пневмоприводом подъема и опускания. Щит имеет два крайних положения: вертикальное — для остановки раската и повернутое — для пропуска раската под тележкой упора. Типовая схема ЭМС передвижного упора представлена на рис. 1.11.

После порезки переднего конца на ножницах раскат подаётся рольгангом к упору. При подходе его к упору контактный датчик перед упором даёт команду на снижение скорости рольганга. Затем, выдержкой времени, достаточной для прижатия листа к упору, рольганги отключаются. После остановки листа и подачи команды на рез ножницами, включается прижим, щит упора поднимается и производится резка. Затем прижим отпускается, а отрезанная мерная длина листа транспортируется далее рольгангом. После ухода заднего конца мерного листа по сигналу датчика, расположенного за упором, щит упора возвращается в исходное положение. Процесс подачи листа до упора повторяется.

Длина отрезаемых листов может определяться без помощи упора мерительными роликами, прижимаемыми к поверхности проката. Предусматривается возможность корректировки показаний импульсного датчика при износе или переточке мерительного ролика, которая не должна превышать 5 мм на диаметр. Следует отметить, что мерительные ролики могут не обеспечивать точного измерения длины из-за изменения диаметра ролика при нагреве от проката. Кроме

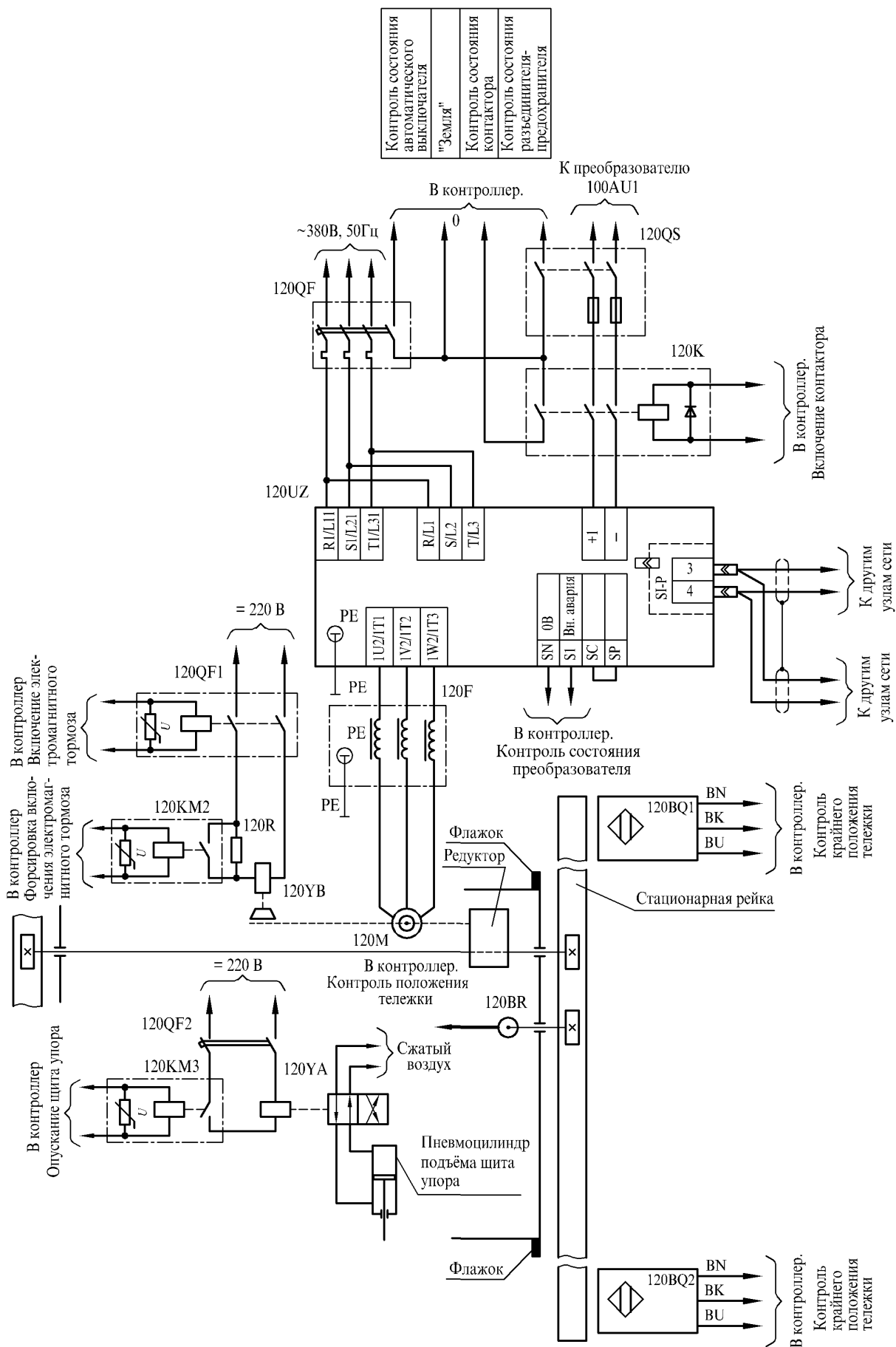


Рис. 1.11. Типовая схема системы управления передвижным упором.

того, при сильной вибрации ролики могут проскальзывать по прокату.

Устройство для уборки обрезки предназначено для передачи обрезки от ножниц поперечной резки в специальный короб, из которого она затем поступает в переплавку. В настоящее время, как правило, обрезь отводится от ножниц пластинчатыми транспортёрами (рис. 1.3). После обрезки листа образовавшаяся обрезь падает на выключенный транспортёр, на котором она может накапливаться пакетами от одной до нескольких штук. Затем, она перемещается в зону действия сталкивателя обрезки и останавливается. Включается привод сталкивателя, при этом его линейка перемещается из исходного положения до крайнего переднего, благодаря чему пакет обрезки сталкивается с транспортера в короб. Затем линейка возвращается назад в исходное положение.

1.1.2. Анализ существующих теоретических и практических работ по электромеханическим системам комплексов резки

Исторически одними из первых ножниц для резки толстолистного проката, получивших широкое распространение, были ножницы с наклонными ножами гильотинного типа. Они имеют ряд существенных недостатков: значительный отгиб отрезаемого листа, ведущий к увеличению его неплоскостности, неудовлетворительные энергосиловые параметры [71]. Из-за сильного искривления обрезанного листа требуется установка дополнительных правильных машин, что удорожает стоимость комплекса резки. В 1971–1972 гг Фирмы «Moeller & Neumann» и «Schloemann–Siemag» разработали двухкривошипные ножницы с катящимся резом, в которых верхний нож дугообразной формы и большого радиуса режущей кромки (~50 м) обкатывается по прямому нижнему ножу [12, 57]. Эта конструкция обеспечивает более высокое качество резки листов за счёт минимального перемещения верхнего ножа относительно разрезаемого проката, а также за счёт практически постоянного перекрытия по всей длине реза. Благодаря этому лист меньше искривляется в процессе реза.

В связи с повышением требований нормативно-технической документации на изделия из металлопроката и, соответственно, к самому прокату, в частности к геометрическим параметрам, особенно к плоскостности, использование

гилютинных ножниц с наклонным верхним ножом для резки толстого листа в настоящее время стало проблематичным [32]. Поэтому, сейчас в линиях резки вновь проектируемых и модернизируемых толстолистовых станов устанавливаются ножницы с катящимся резом с двухкривошипным приводом, несмотря на то, что они имеют более сложную кинематику.

Перспективной является новая однокривошипная конструкция ножниц с катящимся резом, разработанная в ОАО КО ВНИИМЕТМАШ. Эта конструкция по сравнению с традиционной двухкривошипной обладает значительно меньшей массой подвижных частей и обеспечивает более точное обкатывание ножа по прокату при резе, за счёт чего обеспечивается более высокое качество реза, и появляется возможность использовать двигатели главного привода значительно меньшей мощности. Эта конструкция была впервые внедрена на стане 2800 ООО «Носта» в 2000 г.

Традиционно регулируемый электропривод (привод прокатных клетей [1, 19], ножниц различной конструкции и пр.) строился на базе двигателей постоянного тока (ДПТ) и тиристорных преобразователей. Типовая схема привода приведена на рис. 1.12. К его достоинствам относятся: широкий диапазон регулирования; простая силовая схема (и как следствие более дешёвый преобразователь частоты); простая система управления выпрямителем; отсутствие высокочастотных составляющих в питающем двигатель напряжении. Существенным недостатком приводов постоянного тока является наличие коллектора у двигателя, который создаёт большие трудности в сфере обслуживания и эксплуатации. Поэтому естественно стремление исключить коллектор и перейти к бесконтактной системе. С этих позиций весьма перспективны приводы с вентильными двигателями, в которых коммутация обеспечивается полупроводниковыми приборами. Другим существенным недостатком приводов является бóльшая сложность ДПТ, и как следствие, более высокая стоимость.

Развитие математической теории машин переменного тока, создание усовершенствованных силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе, использование современных средств управления, включая мик-

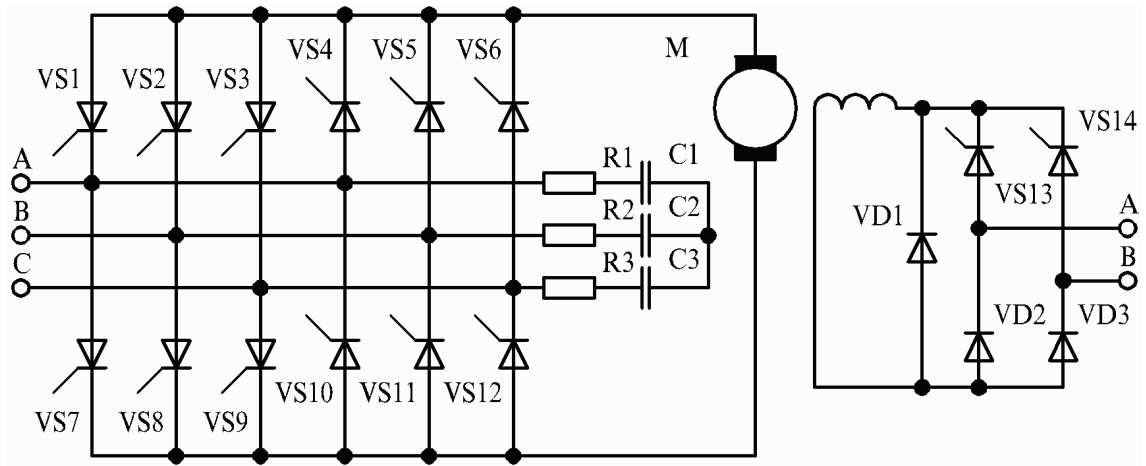


Рис. 1.12. Регулируемый привод постоянного тока (УВ-ДПТ).

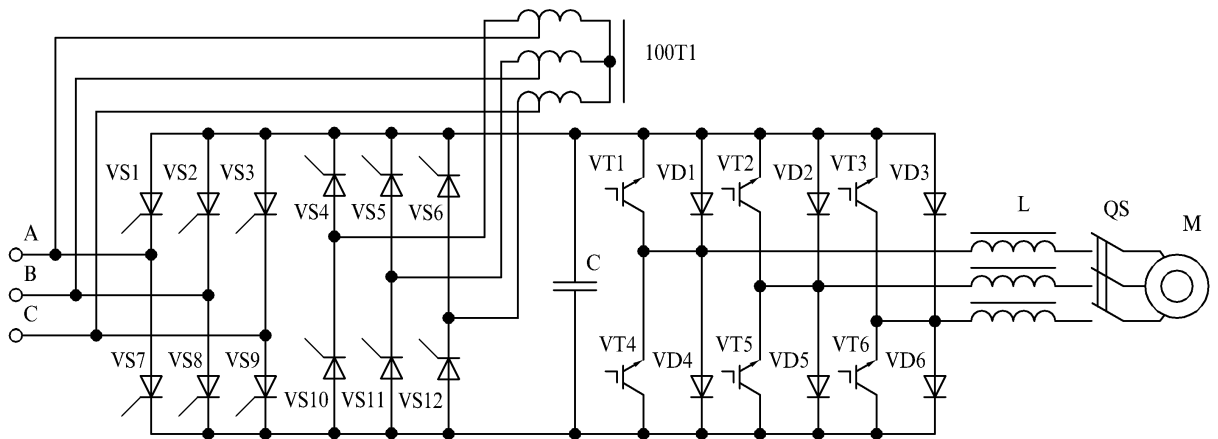


Рис. 1.13. Регулируемый привод переменного тока (ПЧ-АД).

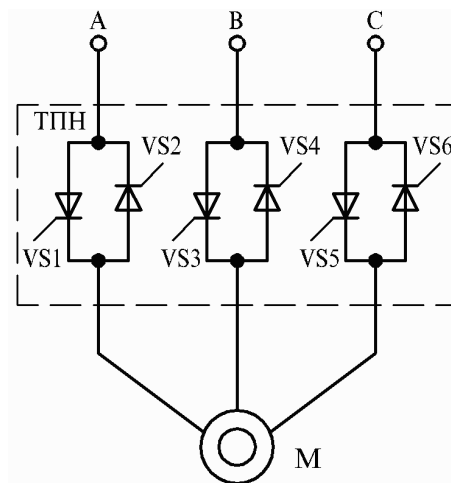


Рис. 1.14. Схема силовой структуры системы (ТПН-АД).

ропроцессорные, позволили создать высококачественные и надёжные системы регулируемых асинхронных электроприводов, которые становятся основным видом регулируемого электропривода [14], [16], [60]. Как указывается в [14] в 2002 г. на европейском рынке из общего числа продаваемых регулируемых приводов электроприводы переменного тока составили 68%, электроприводы постоянного тока — 15%, механические и гидравлические приводы — 17%. Тенденция возрастания доли внедряемых регулируемых асинхронных электроприводов объективно сохранится и в дальнейшем, так как массовый регулируемый электропривод может быть реализован только на базе асинхронных двигателей (АД), поскольку в диапазоне мощностей до 100 кВт их производится в 40–50 раз больше, чем ДПТ. Преимущества приводов с АД — простота конструкции и повышенная надёжность двигателей, возможность их изготовления в поточном производстве, отсутствие необходимости использования средств повышения коэффициента мощности, так как естественный коэффициент мощности привода с частотным управлением имеет значение выше 0,9 [2, 40].

В металлургической промышленности для подачи, выравнивания и других вспомогательных операций широкое распространение получил асинхронный нерегулируемый привод с релейно-контакторным управлением. Однако в последние годы наметилась тенденция замены нерегулируемых приводов на регулируемые, обусловленная потребностью повышения надёжности механического оборудования (за счёт снижения динамических моментов); повышения качества потребления электроэнергии (повышения $\cos \varphi$, снижения пусковых токов мощных приводов, улучшения состава гармоник потребляемого напряжения), снижения энергопотребления.

В настоящее время основным типом регулируемого электропривода является частотно-регулируемый асинхронный электропривод — система «полупроводниковый преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ПЧ–АД) рис. 1.13. Частотный способ регулирования скорости АД является самым экономичным в сравнении с другими известными способами. Однако для решения отдельных производственных задач и задач энергосбережения находит применение

система «тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель» (ТПН–АД), обеспечивающая регулирование напряжения первой гармоники напряжения, подводимого к статору рис. 1.14.

1.2. Математическое описание процессов резки. Анализ влияния основных параметров ножниц на оптимальный режим резки

1.2.1. Оптимальные режимы резки

Влиянию режимов резки на качество обрезанной кромки листов посвящено большое количество работ, в которых детально рассмотрены процессы резки наклонными ножами [46], [63], [71] и др. Т. к. процесс реза на НКР аналогичен процессу резки на ножницах с наклонным ножом, можно использовать результаты этих работ для описания оптимальных режимов резки (с учётом особенностей НКР). В зависимости от направления движения суппорта верхнего ножа гильотинных ножниц получают вертикальный, тянущий или толкающий рез (рис. 1.15 *а–з*). Нож в НКР совершает сложное движение, не полностью совпадающее с катящимся, и для него также будут иметь место выше указанные явления. Для уменьшения стрелы прогиба движение ножа в НКР, режущая кромка которого представляет собой дугу окружности радиуса R , желательно на участке резания приблизить к обкатыванию по прямой $M'M''$ рис. 1.16, параллельной прямолинейной режущей кромке неподвижного нижнего ножа, на которой находится разрезаемый лист [4].

Резка толстых листов с отрицательным перекрытием обеспечивает более высокое качество обрезанной кромки листа по сравнению с резкой с положительным перекрытием. Перекрытием между ножами Δ называется расстояние между режущими кромками верхнего и нижнего ножей рис. 1.17. Оно показывает, насколько режущая кромка верхнего ножа находится ниже режущей кромки нижнего.

Движение верхнего ножа к нижнему может быть параллельным рис. 1.15, *а* или наклонным 1.15, *б*. Ножи ножниц, перемещающиеся параллельно, подвергаются большему износу из-за более сильного трения между верхним ножом

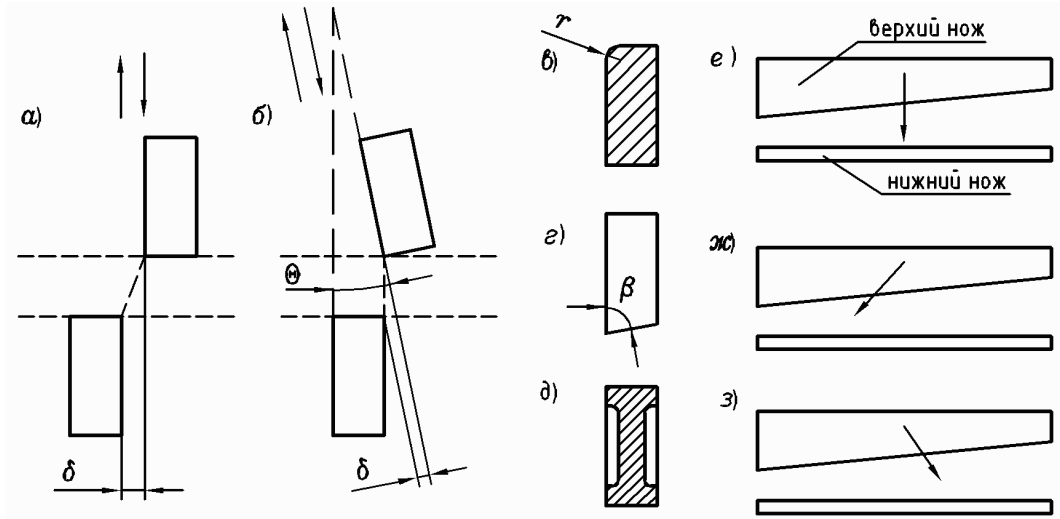


Рис. 1.15. Боковой зазор между ножами при параллельном движении верхнего ножа к нижнему **а** и при наклонном **б**; радиус затупления режущей кромки **в**; угол заострения **г**; паз для уменьшения силы трения **д**; направление движения гильотинного ножа при вертикальном резе **е**, тянущем **ж**, и толкающем **з**.

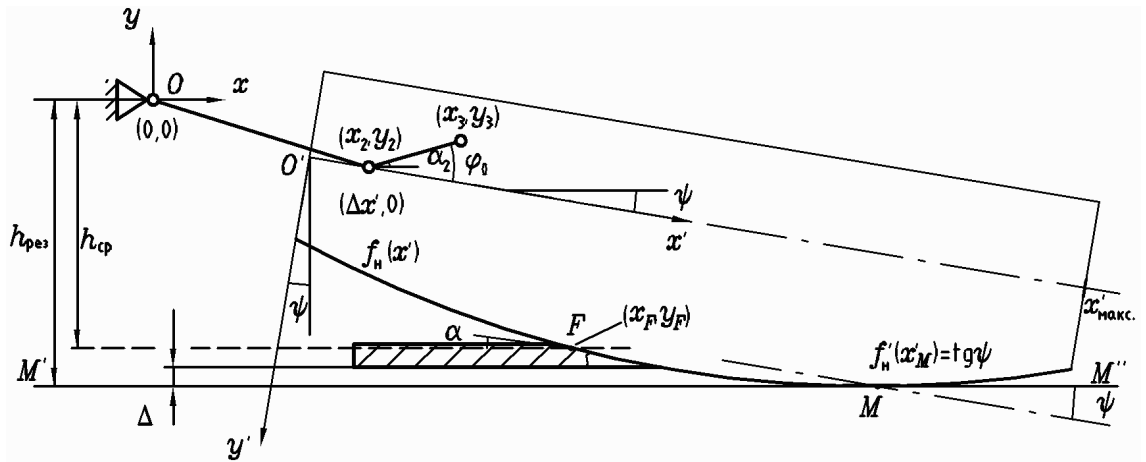


Рис. 1.16. Нож и связанная с ним система координат.

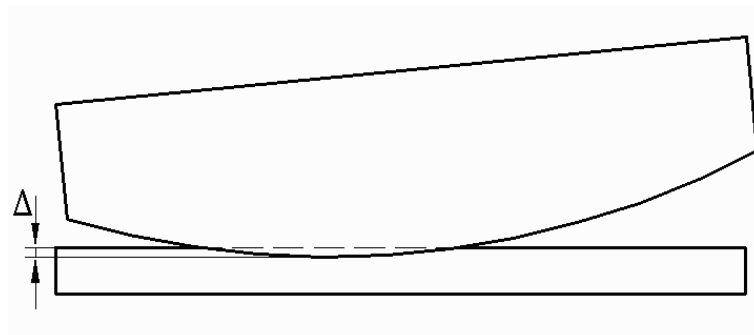


Рис. 1.17. Перекрывание между ножами.

и материалом. Благодаря направлению усилия реза поверхность имеет тенденцию приобретать *S*-образную форму. Кроме этого, по краю полосы образуются складки, в результате чего она изгибается. Ножи,двигающиеся перпендикулярно по отношению к поверхности листа, дают несколько наклонный рез. Для получения более чистой поверхности реза верхний нож в ножницах гильотинного типа могут выполнять перемещающимся к нижнему под углом в $2 \dots 3^\circ$. Трение между верхним ножом и листом уменьшается и срок службы ножей увеличивается. При перемещающемся наклонно верхнем ноже образуется поверхность среза, расположенная под прямым углом к плоскости листа, и отрезаемые полосы могут свободно перемещаться в низ, не образуя при этом складок. В НКР верхний нож перемещается, как правило, параллельно нижнему ножу перпендикулярно раскату.

На образование заусенцев на поверхности реза существенное влияние оказывает боковой зазор между ножами, рассматриваемый в разделе 1.3.2. Оптимальная величина зазора зависит от толщины разрезаемого листа, его механических свойств, затупления ножей.

1.2.2. Анализ влияния конструктивных и технологических параметров ножниц на процесс резки листа

Параметры ножниц (угол реза, боковой зазор, величина затупления ножей и др.) определяют режимы резки и от них в существенной степени зависят качество реза и энергозатраты на рез. Рассмотрим наиболее важные из них.

Формы ножей. В процессе резания возникает сопротивление трения на боковых поверхностях ножей, мощность которого достигает в ряде случаев $8 \dots 10\%$ полной мощности реза [57]. В результате этого образуются складки на разрезаемой плоскости листа. Для уменьшения сопротивления трения между верхним и нижним ножами и материалом в ножах могут выполняться пазы, показанные на рис. 1.15 *д* [71].

При изменении угла заострения β в пределах от 90° до 80° рис. 1.15, *г* усилие реза уменьшается приблизительно на $20\%–25\%$ [46]. В настоящее время поперечное сечение ножей для ножниц гильотинного типа обычно принимают в

форме прямоугольника (заострение 90°), высота которого в $2,5 \dots 3$ раза больше толщины [61]. Благодаря этому, получаются четыре режущие кромки, и нож реже нуждается в переточке.

При выполнении привода ножниц по двухкривошипной или однокривошипной схеме обкатывание ножа обеспечивается приближенно. При использовании дугообразного ножа рис. 1.18 *a* на участках входа ножа в металл и выхода из него расчётные усилия реза имеют более или менее выраженные пики, превышающие значения, соответствующие участку установившейся обкатки. Это связано с тем, что вначале реза заглупление ножа в металл производится при малых углах.

Углом реза α называется угол наклона верхнего ножа к нижнему рис. 1.19. Для НКР, имеющих закруглённый нож, за угол реза можно принять угол наклона хорды, соединяющей точку врезания ножа в металл A и точку отрыва металла B , или угол наклона касательной в точке F приложения силы реза $F_{\text{рез}}$. Его величина существенно влияет на качество отрезаемых полос [71]. Оптимальным с точки зрения качества считается рез параллельными ножами, при котором лист режется сразу по всей ширине ($\alpha = 0$) [61]. При этом не происходит искривления отрезаемого края заготовки, и затраты энергии на рез оказываются минимальными. Однако, это вызывает увеличение силы реза, что приводит к увеличению габаритов и стоимости ножниц.

Угол реза не должен превышать угол трения между листом и верхним ножом, и поэтому его величина ограничена [71]. Практически, α не принимают свыше 6° , при котором выталкивающее лист из-под ножей горизонтальное усилие $-F_{\text{гор}} = F_1 \operatorname{tg} \alpha$ не превышает 11% от максимального усилия реза $F_{\text{макс}}$ [61]. Угол реза в НКР непостоянен и зависит от положения ножа (углов поворота кривошипов). Он обычно колеблется в пределах $1^\circ \dots 3^\circ$. На его величину влияют радиус верхнего ножа R , перекрытие ножей Δ , толщина листа h . С увеличением Δ или h , угол реза возрастает [10].

Как указывается в [68], влияние угла реза α на главное усилие реза определяется в основном двумя противоположно действующими факторами: с одной

стороны, с увеличением угла реза уменьшается поперечное сечение заготовки,



Рис. 1.18. Применяемые формы ножей. *a* — дугообразный нож, с постоянным радиусом кривизны; *б* — составленный из трёх дуг разного радиуса; *в* — нож, составленный из четырёх пластин.

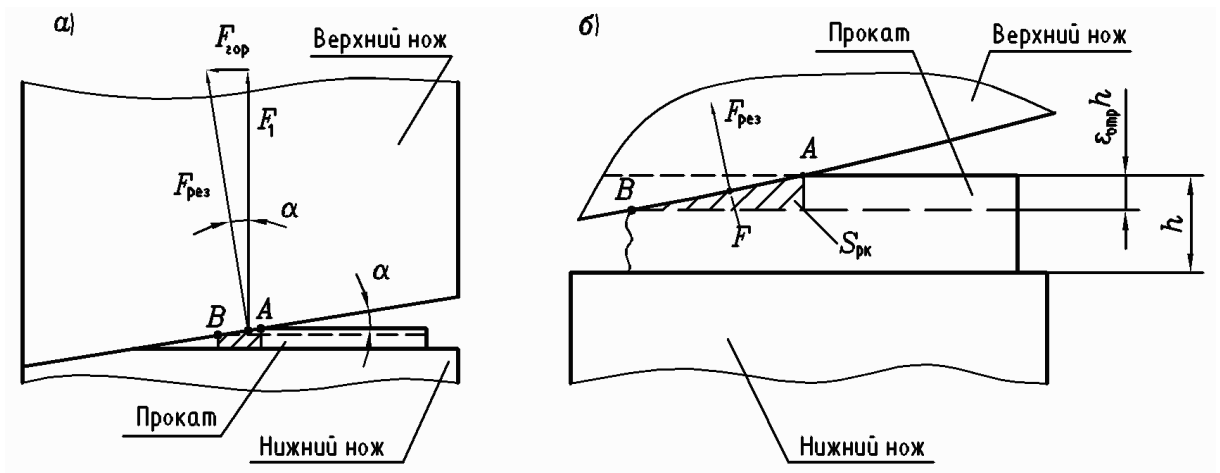


Рис. 1.19. Угол реза α гильотинных ножниц; *б* ножниц с катящимся резом. *A* — точка врезания; *B* — точка отрыва металла.

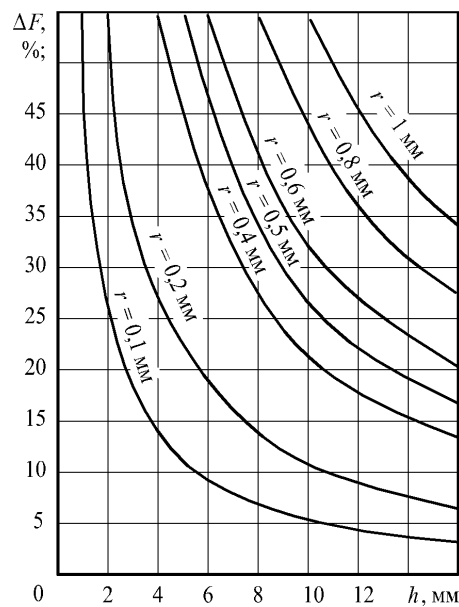


Рис. 1.20. Увеличение силы реза вследствие затупления ножей.

находящееся между ножами, что ведёт к уменьшению силы реза. С другой стороны, при бóльших углах реза имеет место большее упрочнение материала, чем при малых, следствием чего должно появиться увеличение сил реза. Силу реза в первом приближении можно считать пропорциональной $\operatorname{ctg} \alpha$ [46].

С целью уменьшения усилия врезания при резке на НКР листов шириной, меньше максимальной, лист заранее смещают вдоль нижнего ножа в сторону окончания реза. При этом уменьшается режущий клин, что снижает пиковую нагрузку. Однако, следует отметить, что это может использоваться лишь в том случае, когда нож движется только в одном направлении. Когда нож совершает реверсивные движения, как в однокривошипных ножницах, то это использовать нельзя, т. к. полоса должна быть выровнена после каждого реза у противоположного борта рольганга, что на практике делать нецелесообразно.

Кроме этого возможны различные варианты уменьшения максимального значения усилия реза с помощью профилировки режущей части ножа. Для этого сокращают площадь среза, оказывающую сопротивление резанию, путём увеличения угла реза α на участках врезания и выхода ножа из металла при данной кинематике ножниц. В [5] указывается, что радиусы кривизны режущей кромки в зоне врезания должны быть увеличены по сравнению с радиусом основного участка и уменьшены в зоне выхода рис. 1.18, б. Для исключения пиков нагрузки, возникающих при скачкообразном изменении кривизны режущей кромки, в [5] предлагается изменять кривизну непрерывно, например, линейно. Такие варианты изменения профиля ножа усложняют технологию их изготовления.

Другим возможным вариантом является использование составных ножей [12], разработанных в СФ ВНИИМЕТМАШ и испытанных на ножницах станка 3600. Конструкция составного ножа содержит державку и четыре ножевых пластины, имеющие форму параллелепипедов и образующие рёбрами боковых граней режущую кромку в виде ломаной линии рис. 1.18, в. Пиковую нагрузку можно устранить полностью, если углы реза в начале внедрения и в конце выхода ножа из листа равны и не превышают угол реза при установившемся процессе разделения листа. В данном случае при резке листа максимальной

шириной 3450 мм усилие реза уменьшается примерно на 30% по сравнению с дугообразным ножом.

Степень затупления ножей. Притупление ножей характеризуется радиусом режущей кромки r рис. 1.15, z . Оно оказывает большое влияние на величину полного усилия реза [71]. Затупление ножей приводит к увеличению прочности на срез вследствие большей деформации металла. Из-за более сильного сжатия тупые ножи глубже проникают в материал до наступления скола. В результате увеличения силы реза увеличивается также распорная сила $F_{\text{расп}}$ рис. 1.5, благодаря которой стол ножниц и балка ножа прогибаются больше, чем при резе острыми ножами. Это ведёт к увеличению бокового зазора между ножами, что, как указывалось раньше, также неблагоприятно сказывается на качестве реза. Кроме того, режущие кромки ножей получают большую нагрузку и могут выкрашиваться, из-за чего получается нечистый рез с образованием большого числа заусенцев.

Результаты опытов, приведённые в [46], показывают, что искусственное затупление режущих кромок ножей до радиуса $r = 4$ мм вызывает при разрезании сутунок из стали 20 толщиной 14 мм повышение усилия реза, по сравнению с резанием острыми ножами, на 60%. Кроме того, резание сопровождается образованием значительных заусенцев. Как указывается в [3] стойкость ножей кромкообрезных НКР в зависимости от пропускной способности ножниц составляет 2–3 дня. В [46] указывается, что, не ухудшая значительно поверхности среза разрезаемого металла, можно допускать затупление режущих кромок ножей до

$$r = (0,25 \dots 0,30)\varepsilon_{\text{отр}}h,$$

где $\varepsilon_{\text{отр}}$ — коэффициент относительного отрыва металла; h — толщина разрезаемого листа. Влияние притупления в таком случае должно учитываться увеличением полного усилия реза на 15...20%. В [71] приведены зависимости увеличения силы реза (в процентах) от толщины и радиуса затупления (рис. 1.20).

Скорость резки. Во многих источниках, в частности в [18], [46], указывается на наличие зависимости усилия реза от скорости движения ножа. Вместе с тем, сведений о влиянии скорости движения режущего инструмента на качество

кромки и усилие реза в литературе очень мало.

В [71] указывается, что скорость удара режущего инструмента оказывает сравнительно небольшое влияние при резке мягких и пластичных материалов. Что касается твёрдых и хрупких материалов, то эксперименты, проводимые на прессах, показали, что при резке образцов на медленнодвигающемся гидравлическом прессе необходимое усилие сдвига будет на 15% ... 18% больше, нежели на механическом прессе с высокой ударной скоростью. Следует отметить, что в этой работе не указана методика определения усилия реза, из-за чего трудно сказать: является ли это снижение усилия действительным или кажущимся, из-за того, что часть энергии, расходуемой на рез, берётся за счёт снижения кинетической энергии подвижных частей механизма.

В [68] говорится, что при резании металлов при температурах ниже границы рекристаллизации (составляющей 550 ... 650°C [55]), не было обнаружено никакого влияния скорости реза $v_{\text{рез}}$. В [55] приведена зависимость предела прочности $\sigma_{\text{в}}$ от скорости деформации для низко-углеродистых сталей рис. 1.21 при различных температурах. Средняя скорость деформации определяется выражением

$$u_{\text{д}} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt},$$

где l — первоначальная длина деформируемого образца; $\frac{dl}{dt}$ — скорость растяжения.

Толщина проката h . При постоянном угле реза α , площадь среза и, таким образом, сила реза, определяются толщиной материала [42]. На одних и тех же ножницах, т. е. при сохранении их конструктивных характеристик (боковой зазор между ножами, положение прижима, угол наклона верхнего ножа и т. д.), полное усилие реза при разрезании одной и той же марки стали убывает с уменьшением h не пропорционально h^2 , а несколько меньше, и это расхождение особенно увеличивается при малых толщинах разрезаемого металла. Уменьшение толщины вызывает относительное увеличение составляющей полного усилия реза, учитывающей изгиб разрезаемого металла в зоне резания [46]. Кроме того, при резке тонкого проката, величина относительного надреза $\epsilon_{\text{над}}$,

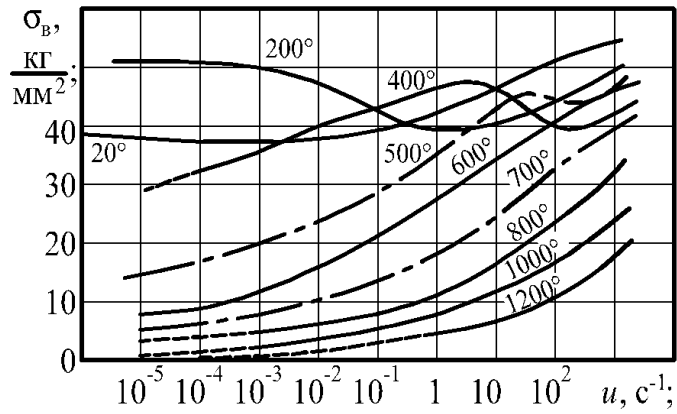


Рис. 1.21. Влияние скорости деформации и температуры на предел прочности низкоуглеродистой стали.

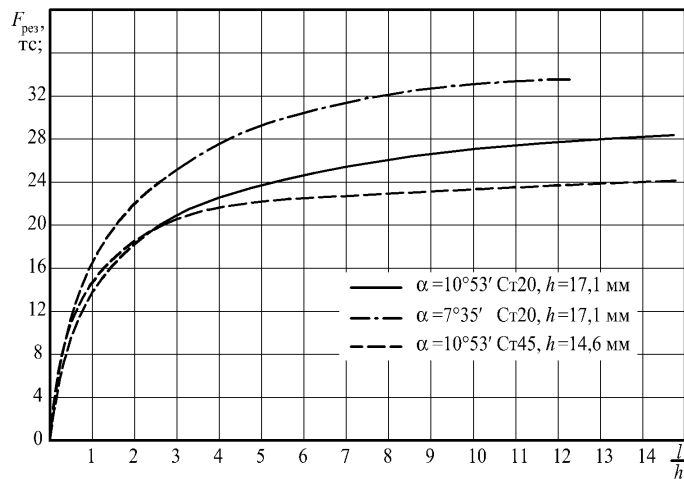


Рис. 1.22. Влияние длины отрезаемой части проката l на максимальное усилие реза.

учитывающая относительную толщину деформированного («заглаженного») материала до наступления скола, возрастает. По выше перечисленным причинам удельная энергия $E_{\text{рез}}/S_{\text{п}}$, приходящаяся на рез единицы площади разрезаемого металла, с уменьшением толщины возрастает.

При постоянных радиусе ножа R и перекрытии Δ с ростом h угол реза α увеличивается. Следовательно, на НКР усилие реза растёт медленнее, чем на гильотинных ножницах, что благоприятно сказывается на качестве резки тонких листов.

Длина отрезаемой части проката l . Для резки планок небольшой длины или узкой полосы требуется меньшее усилие, чем для резки длинного листа, также как и обрезка узких кромок требует меньшего усилия, чем широких.

Из рассмотрения кривых рис. 1.22 следует, что при разрезании сутунки шириною 240 мм и толщиной 17,1 мм из стали марки 20 увеличение длины отрезаемой полосы с 50 мм до 200 мм вызывает увеличение полного усилия реза приблизительно на 30% [46]. Для сутунки из стали 45 толщиной 14,6 мм это увеличение составляет приблизительно 15%. При этом увеличение полного усилия реза происходит более интенсивно при малых значениях отношения l/h и совсем незначительно при l/h больше 12–15.

Механические свойства проката.

На сегодняшний день конструкция ножниц с катящимся резом достигла достаточно высокого уровня совершенства, однако обзор работ [5], [9], [57], [36], [47]–[54] показывает, что совершенствование НКР шло за счёт совершенствования механических и кинематических схем и решений. В то же самое время для управления НКР используются типовые системы управления, реализующие стандартные алгоритмы. Решение задач дальнейшего повышения качества продукции, производительности комплекса, снижения энергозатрат, возможно прежде всего за счёт применения более совершенных систем управления, реализующих алгоритмы, учитывающие параметры разрезаемого проката и состояние оборудования, что предполагает более детальное изучение процессов происходящих при резке проката, с использованием математических моделей, учитываю-

щих физико-механические процессы, происходящие как в разрезаемом металле, так и в механизме резания в процессе работы комплекса.

Влияние материала на процесс резки зависит от основного металла, легирующих добавок, структуры, способа термообработки и температуры [68]. Воздействие отдельных факторов на силы реза до конца не выяснено, поэтому это влияние учитывается экспериментальными характеристиками.

Основной характеристикой металла при резке на ножницах с параллельными ножами является максимальное удельное сопротивление резанию $\tau_{\text{макс}}$. Это — условная величина, так как она, с одной стороны, является обобщённым напряжением процесса реза металла, который получает при резе деформации смятия, изгиба, среза, сдвига и растяжения, а с другой стороны, представляет собой усилие реза, отнесённое не к действительному сечению металла, а к первоначальному сечению [41]. В [55] указывается, что для пластичных материалов величина $\tau_{\text{макс}}$ не является постоянной, а изменяется в зависимости от толщины листа. Экспериментальные исследования, проведённые во ВНИИМЕТМАШ, показали, что $\tau_{\text{макс}}$ зависит как от предела прочности при растяжении σ_B , так и от предела текучести σ_T разрезаемого металла, а также от их отношения $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$.

Эта зависимость при холодной резке листового металла может быть выражена формулой

$$\tau_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{\sigma_T \sigma_B}{K_\tau}}, \quad (1.1)$$

где K_τ — коэффициент механических свойств разрезаемого материала.

На рис. 1.23 представлена зависимость коэффициента K_τ от отношения $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$ для случая холодной резки, построенная по экспериментальным данным, полученным при резке листов толщиной от 0,5 до 14 мм. Графически функция $K_\tau = f\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_B}\right)$ представляет собой кривую типа параболы, состоящую из двух ветвей, нижняя из которых характеризует свойства большой группы пластичных металлов (углеродистых и низколегированных сталей, цветных металлов и сплавов), имеющих отношение $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$ не более 0,7, верхняя — свойства прочных и высокопрочных сталей и других малопластичных материалов, у которых отношение $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$ изменяется от 0,7 до 1,0.

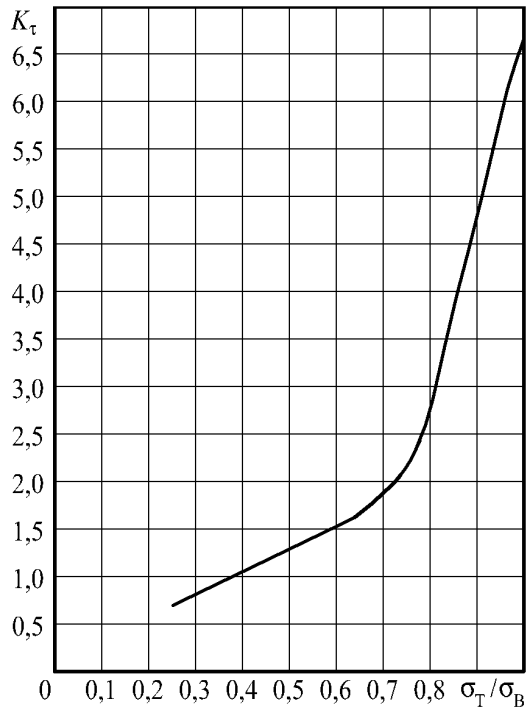


Рис. 1.23. Зависимость коэффициента механических свойств разрезаемого материала от отношения предела текучести к пределу прочности при холодной резке.

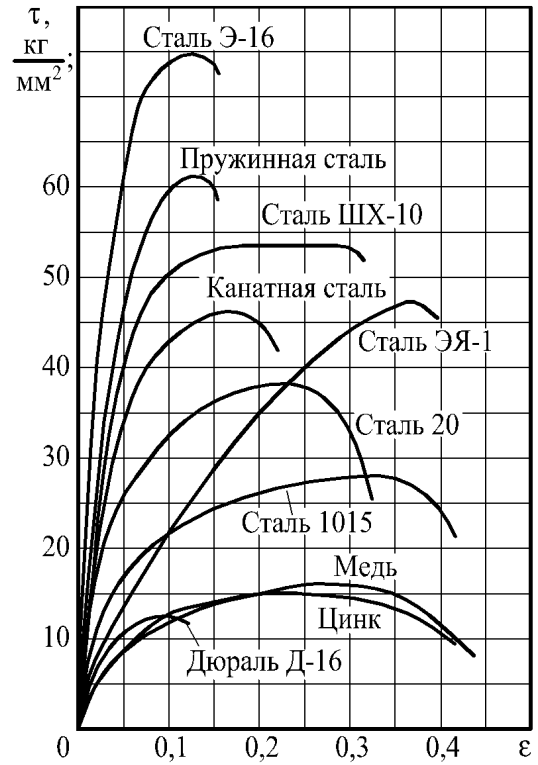


Рис. 1.24. Кривые изменения сопротивления параллельному резанию в функции относительного погружения верхнего ножа.

Таблица. 1.1. Экспериментальные данные коэффициентов надреза $\epsilon_{над}$ и отрыва $\epsilon_{отр}$.

Материал	Горячее резание		Холодное резание	
	$\epsilon_{над}$	$\epsilon_{отр}$	$\epsilon_{над}$	$\epsilon_{отр}$
Сталь 10	0,32–0,40	0,75–1,0	0,30	0,5
Сталь 20	0,30–0,35	0,75–0,95	0,25	0,35–0,45
Сталь 50	0,25–0,3	0,70–0,95	0,20	0,30–0,40
Сталь 55С2	0,23–0,28	0,65–0,90	0,2	0,25–0,30
Сталь 12Х18Н9Т	0,25–0,30	0,70–0,80	0,35	0,45
Сталь ШХ15	0,20–0,25	0,65–0,70	0,15	0,30
Медь	0,35	0,95	0,30	0,45
Цинк	0,30	0,70	0,20	0,40
Дюралюминий	0,25	0,50	0,15	0,25

Для металлов, у которых $\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \leq 0,7$, коэффициент $K = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_B}$ является постоянным и равен 0,63, а для металлов, у которых $\frac{\sigma_T}{\sigma_B} = 0,7 \dots 1,0$, — переменным, изменяющимся в пределах от 0,63 до 0,39.

В [46] указывается, что с увеличением σ_B разрезаемого металла полное усилие реза растёт непропорционально ему, а несколько меньше. При этом происходит в основном увеличение составляющих, учитывающих изгиб разрезаемого металла в зоне реза и изгиб отрезанной уже части металла. Как указывается в [32] наибольшее влияние пределы текучести и прочности оказывают на образование заусенцев на поверхности реза.

Характеристиками пластических свойств разрезаемого металла при резке являются величины относительного надреза $\epsilon_{\text{над}}$ и относительного отрыва $\epsilon_{\text{отр}}$. Величина $\epsilon_{\text{над}}$ есть отношение глубины собственно надреза (заглаженной части сечения) к толщине h разрезаемой полосы. Величина $\epsilon_{\text{отр}}$ есть отношение глубины надреза, при которой происходит окончательное разделение (отрыв) частей металла, к толщине разрезаемой полосы. Из приведённых на рис. 1.24 экспериментальных зависимостей удельного сопротивления резанию от относительного внедрения ножей в металл ($\tau = f(\epsilon)$) при холодной резке следует, что максимальное удельное сопротивление резанию τ_{\max} соответствует относительному внедрению ножей, равному глубине относительного надреза $\epsilon_{\text{над}}$. Наибольшее значение величины $\epsilon_{\text{над}}$ и $\epsilon_{\text{отр}}$ приобретают при резке металла на НКР.

Величина проникания $\epsilon_{\text{отр}}h$, необходимая для осуществления реза, зависит от хрупкости материала, а для сходных материалов она может быть выражена как коэффициент толщины h . Величина $\epsilon_{\text{отр}}$ важна при расчёте энергии, необходимой для реза. Для разрезания твёрдых и хрупких материалов требуется зачастую меньше энергии, хотя необходимое усилие сдвига может быть больше, чем это необходимо при резке пластичных материалов таких же размеров.

В таблице 1.1 приведены максимальные значения коэффициентов надреза $\epsilon_{\text{над}}$ и отрыва $\epsilon_{\text{отр}}$, полученные экспериментальным путём при резании различных металлов [61]. Эти данные следует считать ориентировочными, так как они получены с различной степенью точности, в некоторых случаях при реза-

нии образцов небольшого сечения (25×25 мм). Для пластичных материалов $\epsilon_{отр}$ доходит до 0,6–0,9, а для хрупких уменьшается до 0,12–0,15 [46]. Величина $\epsilon_{отр}$ пропорциональна удлинению и приблизительно на 20...50% больше относительного удлинения δ_5 [46].

Величина $\epsilon_{отр}$ определяется по формуле

$$\epsilon_{отр} = K_{отр} \epsilon_{над}, \quad (1.2)$$

где $K_{отр}$ — коэффициент отрыва, определяемый по графику в функции $\epsilon_{над}$.

Как показывают экспериментальные исследования, $\epsilon_{над}$ зависит от отношения $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$ и относительного удлинения δ_5 материала разрезаемой полосы, её толщины h и рода металла. На рис. 1.26 представлена графическая зависимость $\epsilon_{над}$ от толщины h разрезаемой полосы из материалов с $\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \leq 0,7$ и $\delta_5 = 10 \dots 30\%$.

Этими значениями механических свойств объединена большая группа углеродистых и легированных сталей, а также некоторых цветных металлов и сплавов, которая подчинена общей зависимости функций $\tau_{макс} = f(\sigma_B)$ и $\epsilon_{над} = f(h)$. График показывает, что с уменьшением толщины полосы величина $\epsilon_{над}$ возрастает. При стремлении h к нулю $\epsilon_{над}$ асимптотически приближается к единице, а при стремлении h к бесконечности $\epsilon_{над}$ асимптотически приближается к 0,1.

Коэффициент $K_{отр}$ определяется по графику на рис. 1.28, построенному по экспериментальным данным. Графическая зависимость показывает, что $\epsilon_{отр}$ с уменьшением $\epsilon_{над}$ от 1 до 0,1 уменьшается от 0,5 до 0,3. Для малопластичных материалов, у которых $\epsilon_{над} < 0,1$, наблюдается тенденция сохранения $\epsilon_{отр}$ постоянной, равной примерно 0,3. Графики зависимостей временного сопротивления и относительного удлинения от температуры для некоторых металлов приведены на рис. 1.25 и 1.27.

1.2.3. Задачи обеспечения оптимальных траекторий движения ножей с помощью электромеханических систем управления

Большое значение для качества резки листового проката имеет траектория движения ножа. Оптимальной считается траектория, при которой режущая кромка ножа катится как колесо большого диаметра по прямой линии $M'M''$

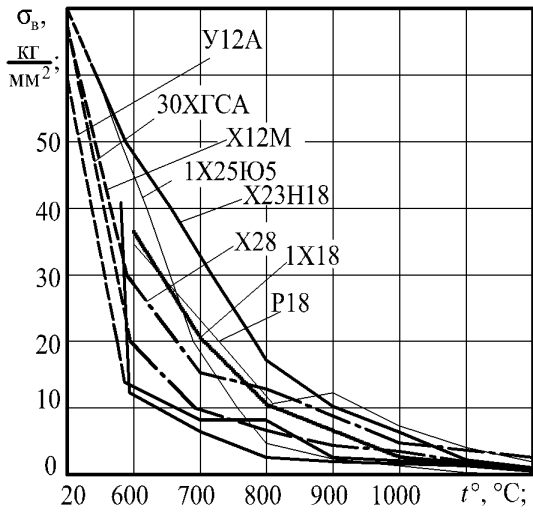


Рис. 1.25. Зависимость временного сопротивления от температуры.

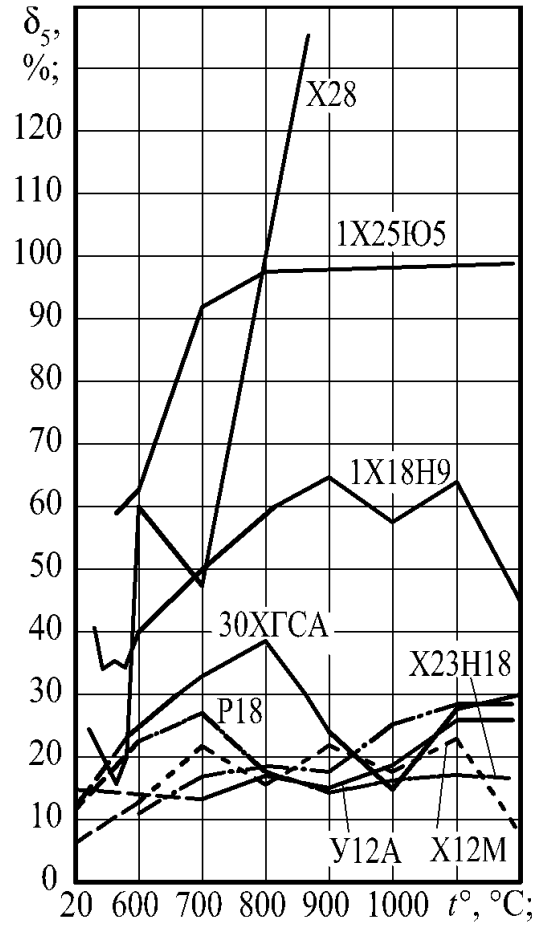


Рис. 1.27. Зависимость относительного удлинения от температуры.

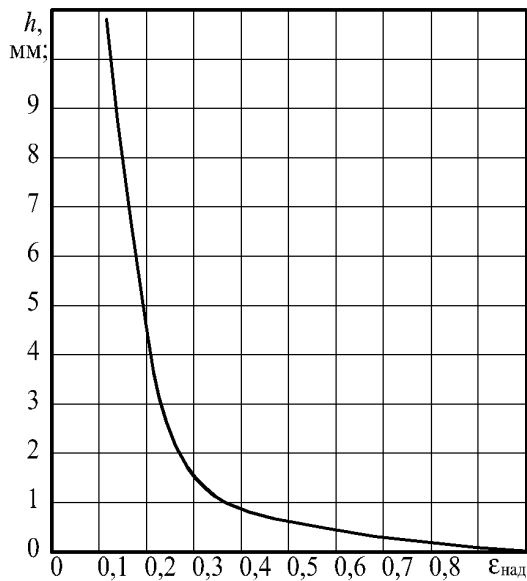


Рис. 1.26. Зависимость глубины относительно надреза от толщины разрезаемой полосы из материала с $\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \leq 0,7$ и $\delta_5 = 10 \dots 30\%$ при холодной резке.

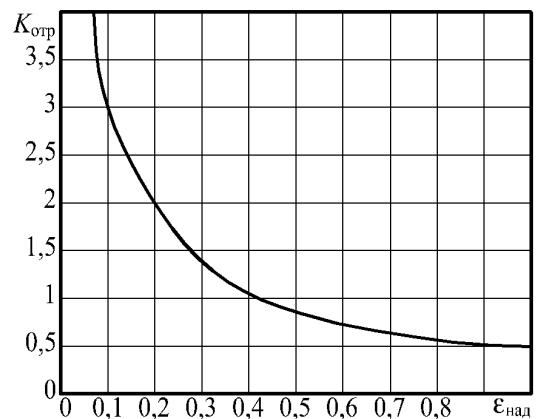


Рис. 1.28. Зависимость коэффициента отрыва от глубины относительного надреза.

рис. 1.16. При этом, смещение ножа относительно разрезаемого проката минимально, за счёт чего обеспечивается высокое качество (малая деформация) отрезаемой кромки листа. На сегодняшний день синхронизация вращения кривошипов осуществляется механически с помощью синхронизирующих и паразитных шестерней. Траектория движения ножа формируется подбором кинематических параметров механизма резания и определяется исключительно конструктивными параметрами ножниц. Однако, это не позволяет обеспечить движение ножа ножниц полностью совпадающим с обкатыванием.

В НИР, проводимых в КО ВНИИМЕТМАШ, СФ ВНИИМЕТМАШ и др. отечественных и зарубежных НИИ основное внимание уделялось совершенствованию отдельных конструктивных элементов и узлов, выбору конструктивных параметров ножниц, обеспечивающих оптимальную траекторию движения ножа. Тем не менее, из-за ограничений, свойственных кинематическим схемам, ни одна конструкция ножниц не позволяет получить в зоне реза требуемую траекторию. Анализ существующих механизмов резания и тенденций их развития показывает, что дальнейшее совершенствование механических систем синхронизации движения ножа и систем их управления имеет ряд ограничений, которые не позволяют обеспечить оптимальную траекторию движения ножа. Кроме того, известно, что при резке толстых листов, использование отрицательного перекрытия благоприятно отражается на качестве резки, т. к. при врезании ножа на глубину необходимую только для резки листов смещение ножа относительно проката оказывается минимальным, и лист меньше искривляется. В кромкообрезных ножницах, а также в ножницах продольной резки для повышения качества листов используют сложные устройства регулировки перекрытия между ножами.

Всё это обуславливает необходимость решения задачи разработки методики расчёта режима управления средствами электропривода углом рассогласования между кривошипами в процессе реза и разработки структуры системы управления, обеспечивающей отработку заданного угла рассогласования.

Широкое использование регулируемых электроприводов привело к тому,

что современный электропривод является не только энергосиловой основой, позволяющей обеспечить производственные механизмы необходимой механической энергией, но и средством управления технологическими процессами, так как задачи по реализации качества производственных процессов в настоящее время в большинстве случаев возлагаются на системы управления регулируемые электроприводами в сочетании с системами технологической автоматики. В связи с возрастанием цен на энергоносители, в частности на электроэнергию, и ограниченными возможностями увеличения мощности энергогенерирующих установок проблема энергосбережения, в том числе электропотребления, приобретает особую актуальность.

Наиболее часто используемый в настоящее время трапецеидальный закон управления приводом НКР, не является оптимальным с точки зрения энергопотребления, что обуславливает необходимость более детального исследования функционирования механизма резания с учётом статических и динамических его свойств, а также с учётом влияния механических свойств разрезаемого проката. Поскольку мощность привода НКР в ряде случаев превышает 1,5 МВт, актуальна задача разработки методики оптимизации законов управления приводом ножниц, удовлетворяющих критериям энергопотребления и производительности участка резки, учитывающих особенности работы электропривода, к которым относятся сложный характер взаимодействия ножа с разрезаемым прокатом, переменность момента инерции и крутящего момента холостого хода. Величина момента холостого хода, обусловленная наличием неуравновешенных масс может достигать до 5...10% от номинального момента, а в НКР с копиром — достигать 30%, поэтому, при выборе закона управления они должны учитываться.

Выбор оптимального закона управления электроприводом, в общем случае является вариационной задачей, в которой требуется найти некоторую функцию времени (экстремаль), на которой при заданных начальных и конечных условиях, а также обусловленных технологическими требованиями и возможностями электромеханической системы ограничениях переменной и её производной достигается минимум некоторого функционала. При решении поставленной задачи

режим управления ножницами целесообразно разделить на две зоны (зону разгона и резки листа и зону торможения). В первой зоне требуется за заданный промежуток времени разогнать привод и осуществить рез. Поскольку, отвод листа можно начинать сразу после окончания реза, не дожидаясь подъёма ножа до исходного положения (как это принято сейчас), во второй зоне нож должен пройти оставшуюся до исходного положения часть пути за промежуток времени, величину которого можно произвольно изменять в больших пределах без снижения производительности всего комплекса резки.

1.3. Оптимизация режимов работы электромеханических систем управления механизмами комплекса резки проката

1.3.1. Циклограммы и задачи оптимизации электромеханических систем ножниц

Рассмотрим функционирование комплекса резки на основе проекта участка ножниц №2 стана 2800 ООО «Уралсталь». Раскаты поступают на рольганг перед ножницами и транспортируются за линию реза для зачистки переднего конца раската (убирается возможная косина переднего конца раската). За время транспортировки осуществляется установка раската перед порезкой с помощью устройства для выравнивания листа. Этим устройством боковая кромка раската прижимается к борту рольганга, благодаря чему обеспечивается перпендикулярность после резки торцов листа к боковым кромкам. В зависимости от конструкции устройство для выравнивания листа может требовать обязательной остановки проката перед выравниванием, или может допускать выравнивание движущегося проката. В рассматриваемом комплексе лист выравнивается при движении на пониженной скорости.

Перед зачисткой ролик мерительный перед ножницами опускается на раскат для измерения подаваемой длины. Раскаты рольгангом задаются в ножницы для обрезки переднего конца. Когда приближается линия, по которой лист должен быть обрезан, рольганги останавливаются, прижим опускается, опускается качающийся рольганг за ножницами, и ножницы включаются на рез. Отрезан-

ный конец падает на транспортер обреза. После резки, ножницы разводятся на величину достаточную для пропуска проката за линию реза. Рольганг качающийся поднимается, прижим отпускает лист, привод подающего рольганга включается. После обрезки переднего конца раскат режется ножницами на мерные длины. Измерение длины готового листа может производиться при помощи установленных на ножницах мерительных роликов с импульсными датчиками или посредством передвижного упора, расположенного за ножницами. Отрезанные листы транспортируются от ножниц качающимся рольгангом и рольгангом за ножницами.

Оставшийся на столе после отрезания последней мерной длины задний конец сбрасывается при помощи сталкивателя рольганг со сталкивателем рис. 1.2 на транспортер обреза, по которому перемещается от ножниц к сталкивателю обреза, сбрасывающему его в короб.

График перемещения и циклограмма работы комплекса резки представлены на рис. 1.29 и рис. 1.30, соответственно. Поскольку функционирование комплекса связано с последовательной работой отдельных его механизмов (выравнивающего устройства, механизма прижима листа, НПР, передвижного упора, механизма качания рольганга, сталкивателя обреза), требующих снижения скорости проката, а в ряде случаев его полной остановки, то задачи анализа работы этого участка с целью выявления возможности совмещения операций во времени и разработки принципов построения систем управления комплексами резки имеют важное значение, т. к. их решение позволит повысить производительность участка резки.

Во-первых, это позволяет сократить время выполнения отдельных операций. В частности, необходимость выравнивания листа перед резкой в зависимости от конструкции выравнивающего устройства приводит к необходимости или снижения скорости раската перед выравниванием, или его полной остановки, что является фактором, сдерживающим производительность комплекса резки. Анализ процесса выравнивания показывает, что время, необходимое для выравнивания листа зависит от геометрических параметров проката. На сегодняшний

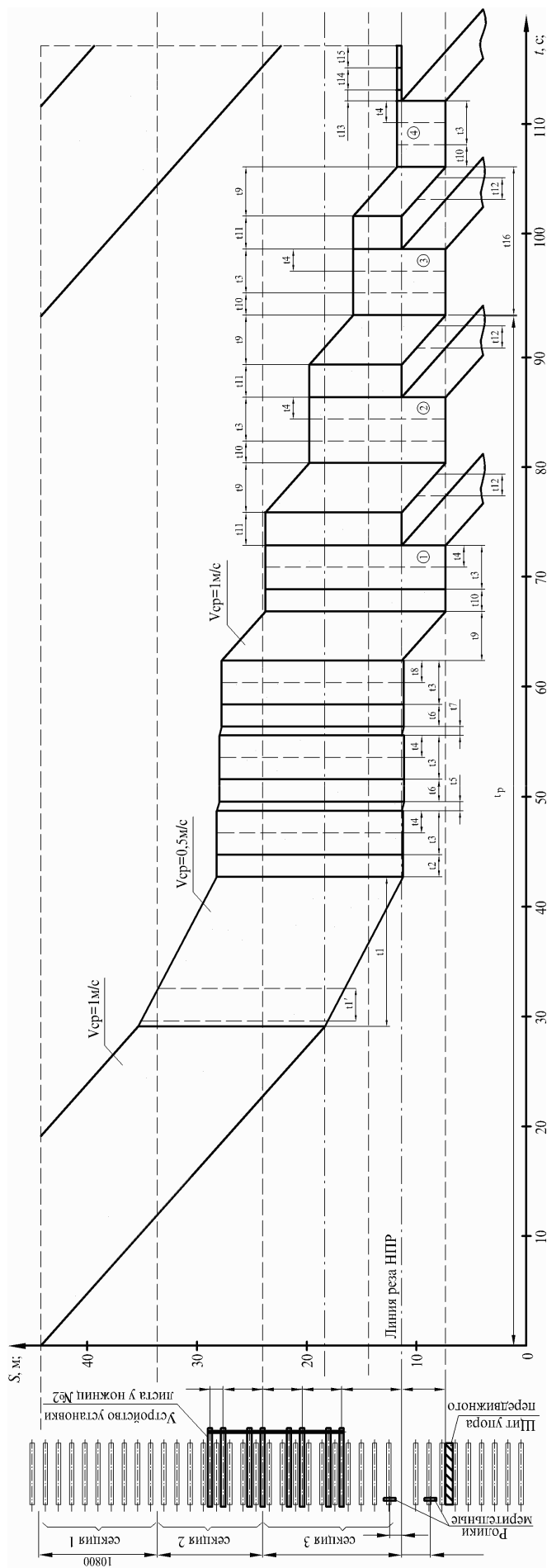


Рис. 1.29. График перемещения раската размерами $7 \times 2700 \times 17000$ при порезке на мерные длины по 4000 мм.

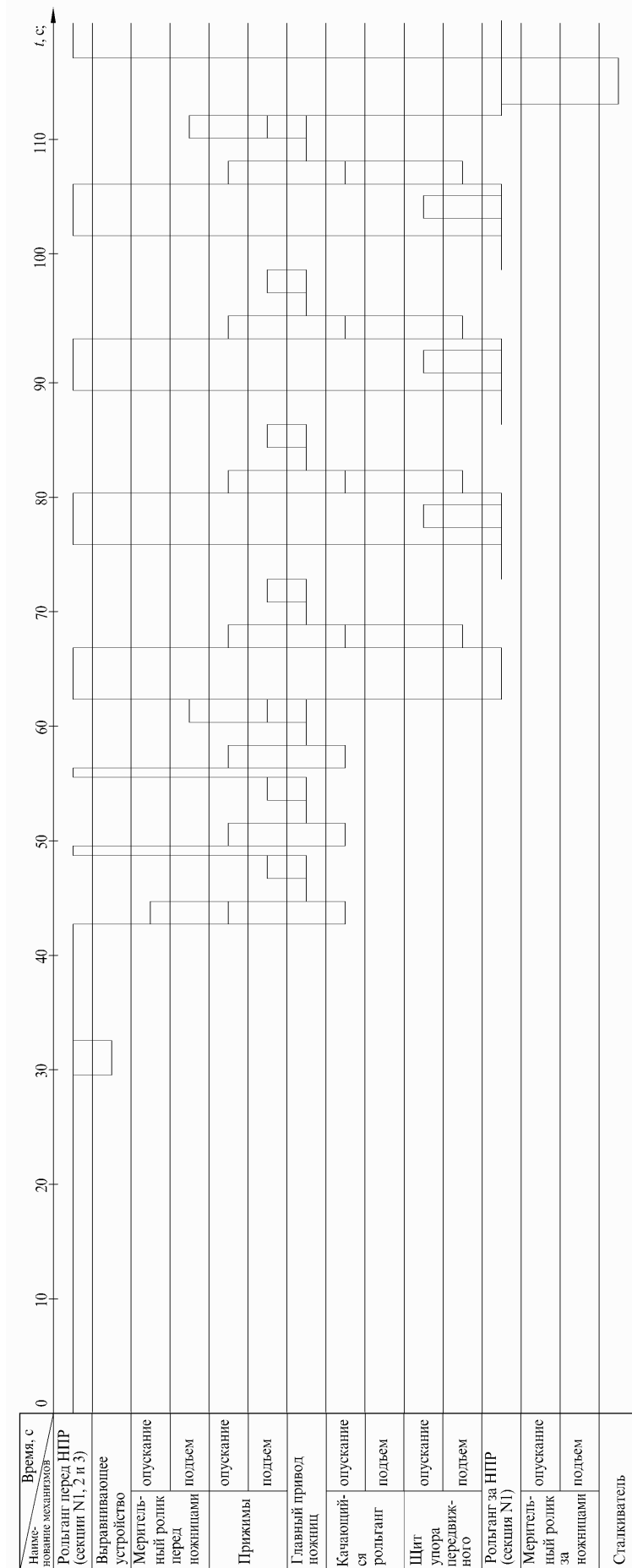


Рис. 1.30. Циклограмма работы механизмов участка ножниц размерами 7 × 2700 × 17000 мм и порезке на мерные длины по 4000 мм.

день это никак не учитывается, в то время, как оптимизация этого процесса позволит увеличить скорость подачи листа к ножницам, и, как следствие, производительность комплекса резки.

Во-вторых, это позволит совместить во времени выполнение ряда операций. В настоящее время, механизм резания включается после поворота эксцентрика рольганга качающегося на угол $\sim 150^\circ$. Актуальной представляется задача изучения возможности согласованной работы механизмов качания и резания, обеспечивающей уменьшение задержки включения механизма резания.

В-третьих, это позволит выявить механизмы, после модернизации которых, вырастет срок службы быстроизнашивающихся элементов. Например, в связи с тем, что лист или выравнивается относительно одного из бортов рольганга, или центрируется относительно оси рольганга при резке узкого проката ножи изнашиваются неравномерно. Повысить срок службы ножей между переточками в данной работе предлагается за счёт выравнивания узкого проката вдоль разных бортов рольганга с учётом износа режущей кромки ножа, что должно обеспечиваться соответствующей конструкцией выравнивающего устройства.

1.3.2. Электромеханическая система управления боковым зазором

Анализ показывает, что существенное влияние на качество обрезанной кромки листа (образование заусенца) и основные энергосиловые параметры процесса резки, а также на продолжительность службы ножей между переточками оказывает величина бокового зазора. Методы установки бокового зазора, применяющиеся на сегодняшний день, не учитывают затупления ножей, постепенного износа клиньев устройства регулировки бокового зазора и других факторов, что приводит к тому, что величина бокового зазора может значительно отличаться от оптимальной. Это обуславливает необходимость оптимизации бокового зазора. Оптимизация может производиться по усилию реза, которое минимально при оптимальной величине бокового зазора.

Боковым зазором между ножами δ называется промежуточное расстояние между верхним и нижним ножом рис. 1.15 *а, б*. Он имеет большое значение для чистоты и внешнего вида поверхности реза. В зависимости от толщины листа,

качества материала, его прочности, а также величины бокового зазора образуется большой или меньший заусенец (грат). в процессе резки и уменьшить до минимума трение ножей о прокат, следует устанавливать определённую величину бокового зазора. Оптимальной считается такая величина, при которой трещины, расходящиеся от кромок ножей, встречаются кратчайшим путём [71].

При слишком маленьком зазоре образуется нечистая поверхность реза, ползовидная или *S*-образная, увеличивается трение ножей по краю листа [71]. В виду увеличенного трения и утяжки материала возрастает потребность в силе нажима, из-за чего может произойти преждевременное затупление или выкрашивание режущей кромки инструмента. Слишком большой зазор приводит к появлению заусенцев на пластичном материале или к неровному резу хрупких материалов. При этом, образуется *S*-образный излом с сильно-шероховатой обрезной кромкой, и искривление кромки листа увеличивается. Листы из вязких материалов (например, хромо-никелево-стальные) при слишком большом зазоре могут затягиваться внутрь него и зажиматься, что ведёт к возникновению больших разрывающих напряжений и дополнительному увеличению трения между прокатом и ножами [71]. Это способствует более быстрому затуплению ножей. Как показывают опытные данные, приведённые в [46], увеличение бокового зазора между ножами от 0,35 мм до 1,05 мм, т. е. в три раза, вызывает увеличение полного усилия реза на 15%. В том случае, когда разрезаемый образец закреплён прижимами, а боковой зазор между ножами относительно мал (меньше 3% толщины), на поверхности среза появляются характерные срывы. Появление таких срывов вызывает увеличение полного усилия реза на 10...15%. Образование срывов на поверхности среза, объясняется формой сечения разрезаемого металла рис. 1.31, б. Когда разрезаемый металл сдвигается вниз, то после начала скалывания верхняя выпуклость поверхности среза встречает на своём пути нижнюю выпуклость части металла, зажатого прижимом. Так как неразрезанная часть листа препятствует свободному соскальзыванию одной выпуклости по другой, появляются срывы и смятие за счёт значительного трения этих частей.

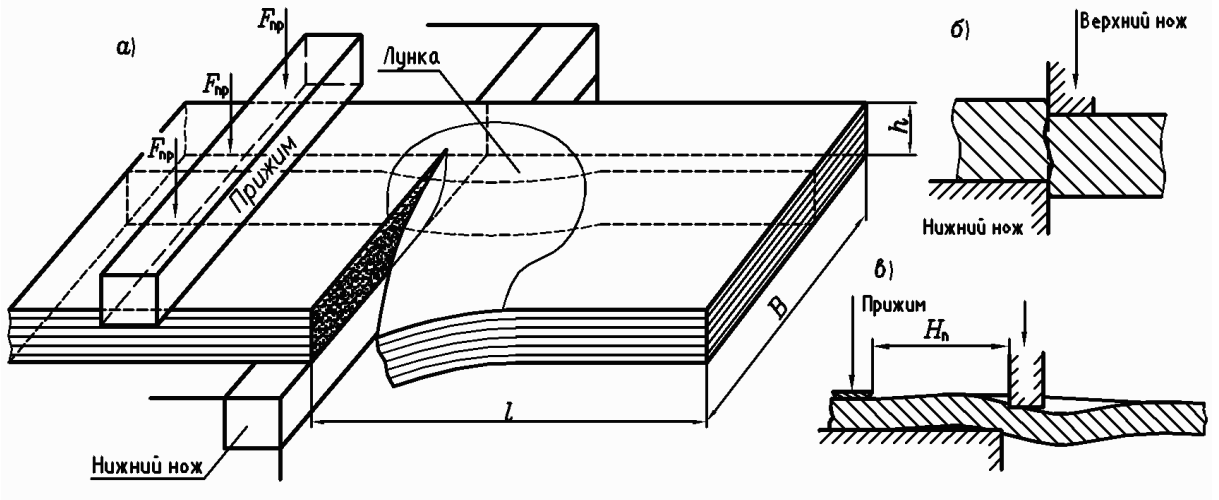


Рис. 1.31. Схематическое изображение листового металла, надрезанного на ножницах с наклонными ножами — а, вид сечения разрезаемого проката — б, изгиб листа при резке — в.

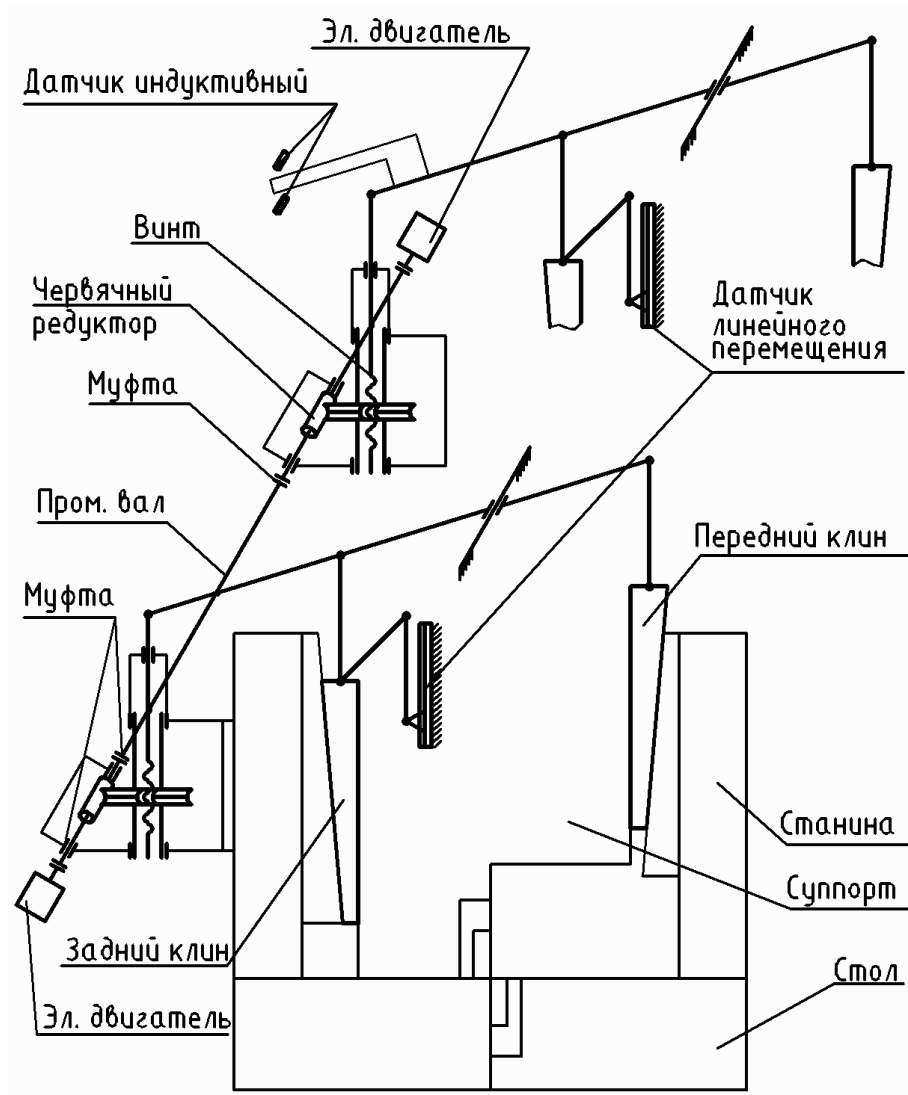


Рис. 1.32. Кинематическая схема устройства регулировки бокового зазора.

Таким образом, можно сделать вывод, что при отклонении зазора от оптимального энергозатраты на рез возрастают на 10...15%.

Обычно боковой зазор устанавливается в пределах 3...5% от толщины разрезаемого листа [61], [71]. Зазор для резки твёрдых материалов устанавливается меньше, чем для мягких. Для резки меди и латуни также требуется меньший ножевой зазор, чем для листовой стали. При длительной работе ножниц зазор между ножами по мере износа механизма и ножей увеличивается. Связанный с этим рост усилия реза рекомендуется в [61] учитывать дополнительным коэффициентом запаса 1,1...1,2.

Механизм регулировки зазора предназначен для изменения величины горизонтального зазора между ножами в зависимости от марки стали, толщины и температуры разрезаемого листа рис. 1.32. Величина зазора оказывает существенное влияние на образование заусенцев на поверхности среза. В рассматриваемом комплексе механизм регулировки бокового зазора состоит из двух червячно-винтовых, связанных между собой валом. Каждый редуктор приводится от отдельного электродвигателя и соединен с одним из двух двуплечих рычагов. Оба рычага поворачиваются на концах общей оси. Каждый рычаг тягами соединен с двумя клиньями (передним и задним), которые перемещают суппорт верхнего ножа вперед и назад по эксцентриковой шейке вала и, тем самым, и изменяет боковой зазор между ножами. Типовая схема системы регулирования бокового зазора приведена на рис. 1.33.

При включении электродвигателей два двуплечих рычага от червячно-винтовых редукторов поворачиваются и перемещают передние и задние клинья. Каждый из двух задних клиньев шарнирно соединен с датчиком линейного перемещения 177BV1 и 177BV2 (не показан), который измеряет перемещение клина и, соответственно, боковой зазор между ножами.

Поскольку усилие реза минимально при оптимальной величине бокового зазора целесообразно использовать данные об усилении реза для системы автоматической оптимизации бокового зазора. Датчик усилия реза можно разместить в расточке суппорта устройства зажима кассет.

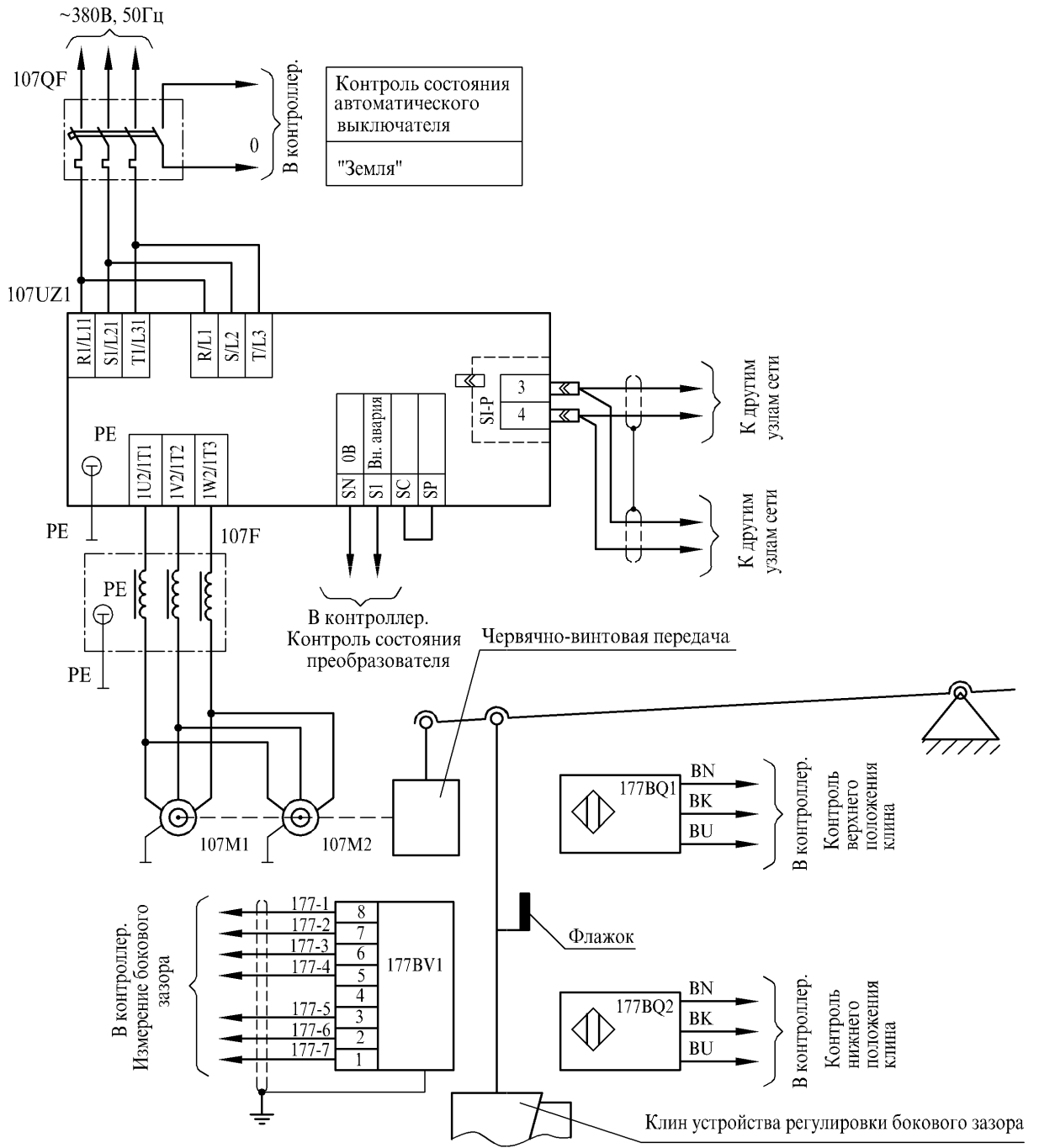


Рис. 1.33. Электрическая схема электропривода устройства регулировки бокового зазора.

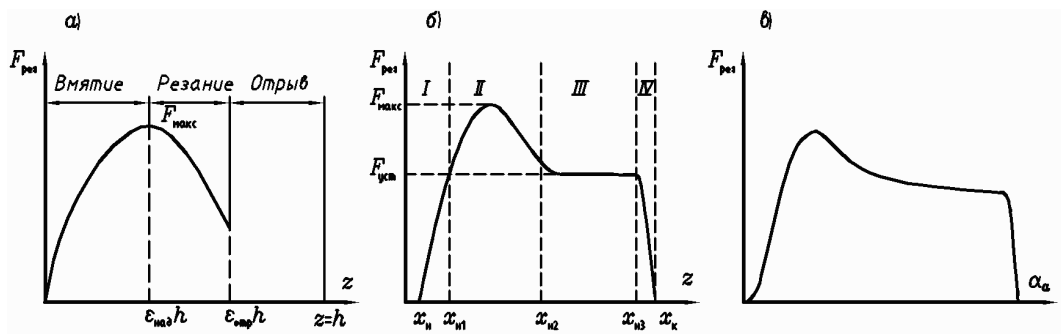


Рис. 1.34. Зависимость силы реза от величины внедрения ножа в лист. а — при параллельном резе, б — при наклонном резе, в — при резе ножницами с катящимся резом.

1.4. Математическое описание и моделирование движения ножа для задач оптимизации процессов резки проката

1.4.1. Процесс резки листа

Обобщая приведённые в [46], [68] и др. данные, процесс резки можно условно разделить на следующие четыре этапа.

1. Во время первого этапа происходит подмятие разрезаемого металла ножами и утяжка части его поверхности, не соприкасающейся с ножами. Поверхностный слой сильнее подвергается деформации, чем материал из середины листа. В начале происходит упругая деформация материала, затем, после прохождения предела упругости в зоне резки, начинается пластическая деформация.
2. Следующий этап начинается после внедрения ножа на глубину $\varepsilon_{\text{над}}h$, когда в месте наибольшей нагрузки исчерпывается способность к деформации материала. Он характеризуется появлением трещины, начинающейся во всех случаях со стороны движущегося (верхнего) ножа.
3. Третий этап соответствует началу образования трещины над нижним ножом при дальнейшем углублении трещины под верхним ножом.
4. Четвёртый этап, представляющий собой встречу двух трещин, начинается после внедрения ножа на глубину отрыва $\varepsilon_{\text{отр}}h$ и характеризует начало скалывания, которое происходит по некоторой кривой поверхности.

При резании на ножницах с параллельными ножами на этом этапе происходит скалывание по всему сечению, рез заканчивается, и отрезаемая часть металла отскакивает. При резании на ножницах с наклонными ножами жёсткость остающейся неразрезанной части листа заставляет разрезаемый металл изгибаться в зоне резания, образуя характерную лунку рис. 1.31 а [46]. След, получаемый в процессе реза рис. 1.31 б, является равнодействующей вертикального и горизонтального напряжений реза и по внешнему виду напоминает синусоидальную кривую низкой амплитуды. Его внешний вид зависит от материала, бокового зазора между ножами, направления движения верхнего ножа к нижнему.

Для определения работы и мощности реза надо знать характер изменения усилия на ножи в различные моменты времени в периоды вмятия и собственно резания металла. Экспериментальные данные, снятые на ножницах с параллельными ножами, показывают, что в период вмятия ножей усилие реза возрастает по выпуклой кривой параболического вида рис. 1.34 *а*, а в период собственно реза эта кривая становится ещё круче и обрывается в сечении, соответствующем окончанию собственно резания и началу отрыва (скалывания) [61].

При внедрении наклонных ножей в лист усилие реза пропорционально ходу ножа рис. 1.34 *б*, участок *I*. По мере внедрения ножей в материале, с одной стороны, зарождается трещина, способствующая быстрейшему разрушению, с другой стороны, материал упрочняется, что препятствует распространению трещины и разрушению листа. С ростом трещины интенсивность роста силы реза, возникающей в системе нож-лист, падает. Сила реза изменяется по некоторой параболической кривой, возрастая до максимального значения (участок *II*), а затем, падает до величины, которая в дальнейшем остаётся постоянной. Резание приобретает характер установившегося процесса (участок *III*). С момента выхода трещины из разрезаемого листа начинается быстрое падение силы реза (участок *IV*). Процесс резания завершается [6]. Рез на НКР аналогичен резу на гильотинных ножницах рис. 1.34 *в*. Постепенное падение усилия реза при установившемся процессе реза объясняется переменной величиной угла реза α .

1.4.2. Расчёт и моделирование движения ножа в пакете MATLAB

Как указывалось ранее, ножи могут иметь произвольную форму, поэтому, при моделировании ножниц предусматривается возможность задания произвольной формы режущей кромки ножа. Кривая, описывающая режущую кромку ножа, задаётся функцией $y' = f_n(x')$ в связанной с суппортом подвижной системе координат $x'O'y'$ на отрезке $[0; x'_{\text{макс}}]$ рис. 1.16. Функция $f_n(x')$ должна быть выпуклой, т. е. иметь монотонно убывающую первую производную, что определяется формой применяемых ножей. Система координат $x'O'y'$ связана с точкой (x_2, y_2) и углом наклона α_2 принадлежащего суппорту плеча l_2 . Точка O' смещена относительно (x_2, y_2) на $\Delta x'$, а ось $O'x'$ повернута по часовой стрелке

относительно плеча l_2 на угол φ_0 . При этом оси Ox и Oy образуют с осями $O'x'$ и $O'y'$ угол $\psi = \alpha_2 - \varphi_0$. Начало подвижной системы координат находится в точке

$$\begin{cases} x_{O'} = x_2 - \Delta x' \cos \psi, \\ y_{O'} = y_2 - \Delta x' \sin \psi. \end{cases} \quad (1.3)$$

Преобразование координат из $x'O'y'$ в xOy осуществляется по формулам

$$\begin{cases} x = x_{O'} + x' \cos \psi + y' \sin \psi, \\ y = y_{O'} - y' \cos \psi + x' \sin \psi. \end{cases} \quad (1.4)$$

Определим положение нижней точки ножа (x'_M, y'_M) (минимум f_H в системе xOy).

Для этого нужно найти такую точку x'_M , в которой производная

$$\left. \frac{df_H}{dx'} \right|_{x'=x'_M} = \operatorname{tg} \psi, \quad (1.5)$$

и преобразовать точку $(x'_M, f_H(x'_M))$ по (1.4) в координаты (x_M, y_M) . Т. к. $f_H(x')$ выпукла, то существует не более одной точки, в которой её производная имеет значение $\operatorname{tg} \psi$. Если (1.5) не имеет решения, то нижней точке ножа соответствует один из его концов, в котором производная ближе к $\operatorname{tg} \psi$.

Определим точку реза (x_F, y_F) ножа, которая совпадает с точкой пересечения прямой, параллельной Ox , расположенной на высоте реза $h_{\text{ср}} = h_{\text{рез}} + \Delta + h \cdot (1 - 0,5\varepsilon_{\text{отр}})$ и линии $y' = f_H(x')$. Т. к. эта линия и линия реза описаны в разных системах координат, то необходимо их привести в единую систему координат. Проще всего это сделать с прямой. Запишем её уравнение в системе координат $x'O'y'$ в виде $y'_\Pi(x') = y'_0 + x' \operatorname{tg} \psi$. Из геометрических соображений

$$y'_0 = \frac{y_{O'} - h_{\text{ср}}}{\cos(\psi)},$$

откуда находим

$$y'_\Pi(x') = \frac{y_{O'} - h_{\text{ср}}}{\cos \psi} + x' \operatorname{tg} \psi.$$

Далее следует решить уравнение $f_H(x') = y'_\Pi(x')$. В результате может появиться два корня, т. к. точка (x_M, y_M) минимума функции $f_H(x)$ расположена ниже линии реза $y = h_{\text{ср}}$, а функция $f_H(x)$ вогнута. Физический смысл будет иметь только одно из них. В случае поворота ножа по часовой стрелке (резке от оси коромысла), решение следует искать на $[x'_M, x'_{\text{макс}}]$, а в случае поворота против часовой — на отрезке $[0, x'_M]$. Аналогично находится точка врезания ножа x_A , расположенная на верхней грани листа.

Угол реза α вычисляется по формуле

$$\alpha = \psi - \operatorname{arctg}(f'_H(x'_F)), \quad (1.6)$$

где $f'_H(x')$ — производная f_H по x' .

Скрипт в MATLAB, выполняющий расчёт положения нижней точки ножа (x_M, y_M) и положения точки реза (x_F, y_F) приведён в листинге 1.7. Кривая ножа задаётся скриптом `fknife.m`, а её производная — `dfknife.m`. Решение уравнений осуществляется скриптом `GetSolve.m`.

1.4.3. Расчёты максимального усилия реза, усилия реза в зависимости от положения точки врезания

В литературе приводится много методик расчёта максимального усилия реза F_{\max} . Все они дают зависимость F_{\max} от угла реза α и толщины разрезаемого металла h . Кроме того, на F_{\max} влияют зазор между ножами δ , состояние режущих кромок (радиус затупления r), скорость резки металла (скорость деформации u_d), угол заострения ножей β , механические свойства разрезаемого металла (σ_T , σ_B , $\epsilon_{\text{над}}$, $\epsilon_{\text{отр}}$ и δ_5), длина отрезаемой полосы l и пр. Наиболее общей из них является формула Крылова–Тарасова.

Проведённые во ВНИИМЕТМАШ исследования [41] показали, что максимальное значение полного усилия реза металла на ножницах с наклонными ножами наиболее точно рассчитывается по формуле

$$F_{\max} = F_1 + F_2, \quad (1.7)$$

где F_1 — усилие собственно реза; F_2 — усилие изгиба отрезаемой части полосы.

Усилие собственно резания полосы наклонными ножами представляют формулой

$$F_1 = K_{\text{эп}} \tau_{\max} S_{\text{рк}}, \quad (1.8)$$

где $K_{\text{эп}}$ — коэффициент эпюры, учитывающий неравномерность распределения удельного сопротивления резанию по длине «режущего клина» в зависимости от угла наклона ножа; τ_{\max} — максимальное удельное сопротивление резанию; $S_{\text{рк}}$ — максимальная площадь части сечения полосы, сопротивляющаяся резанию и условно называемая площадью «режущего клина».

Коэффициент $K_{\text{ЭП}}$ определяется по графику рис. 1.35, который построен по экспериментальным данным. Как видно из графика, $K_{\text{ЭП}}$ изменяется от 1 при угле реза $\alpha = 0$ до 0,7 при $\alpha = 2^\circ$. При дальнейшем увеличении угла наклона ножа $K_{\text{ЭП}}$ остаётся постоянным. Максимальное удельное сопротивление резанию $\tau_{\text{макс}}$ определяется по формуле (1.1). Площадь «режущего клина» определяется по формуле

$$S_{\text{ПК}} = \frac{h^2 \varepsilon_{\text{отр}}}{\text{tg } \alpha}. \quad (1.9)$$

Подставив в формулу (1.8) значение $S_{\text{ПК}}$ из формулы (1.9) и значение $\varepsilon_{\text{отр}}$ из формулы (1.2), получим формулу для определения усилия собственно реза металла наклонными ножами

$$F_1 = K_{\text{ЭП}} K_{\text{отр}} \cdot \frac{h^2 \varepsilon_{\text{над}}}{\text{tg } \alpha} \cdot \tau_{\text{макс}}. \quad (1.10)$$

Усилие изгиба отрезаемой части полосы F_2 определяется по формуле

$$F_2 = z \sigma_{\text{в}} h^2, \quad (1.11)$$

где z — коэффициент, зависящий от длины отрезаемой части полосы, пластических свойств разрезаемого металла и угла наклона ножа, определяется по графику на рис. 1.36.

Окончательная формула для определения полного усилия реза металла наклонными ножами после подстановки значений F_1 и F_2 соответственно из формул (1.10) и (1.11) в формулу (1.7) будет иметь вид

$$F_{\text{макс}} = K_{\text{ЭП}} K_{\text{отр}} \cdot \frac{h^2 \varepsilon_{\text{над}}}{\text{tg } \alpha} \cdot \tau_{\text{макс}} + z \sigma_{\text{в}} h^2. \quad (1.12)$$

С учётом возможного притупления ножей усилия реза, подсчитанные по формуле (1.12) можно увеличить на 15—20%. Как указывается в [6], сравнение результатов опытов с расчётами, произведёнными по формуле 1.12, выявило расхождение 4—23%. Для сравнения, методика Crasemann, приведённая в [68], даёт расхождение 18—48%. В дальнейшем, для расчёта максимального усилия будем использовать формулу 1.12, которая, как указывается в [36], [59] и др., может быть использована и для расчёта НКР.

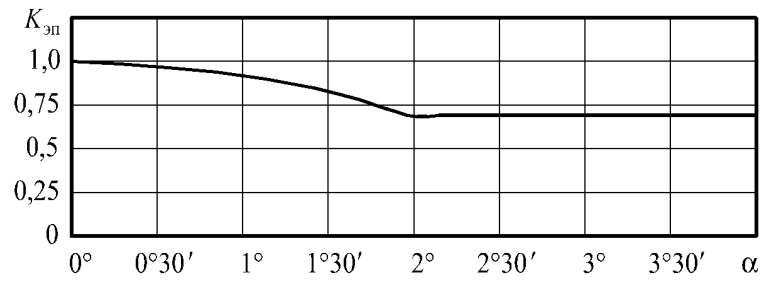


Рис. 1.35. Зависимость коэффициента эпюры от угла наклона верхнего ножа.

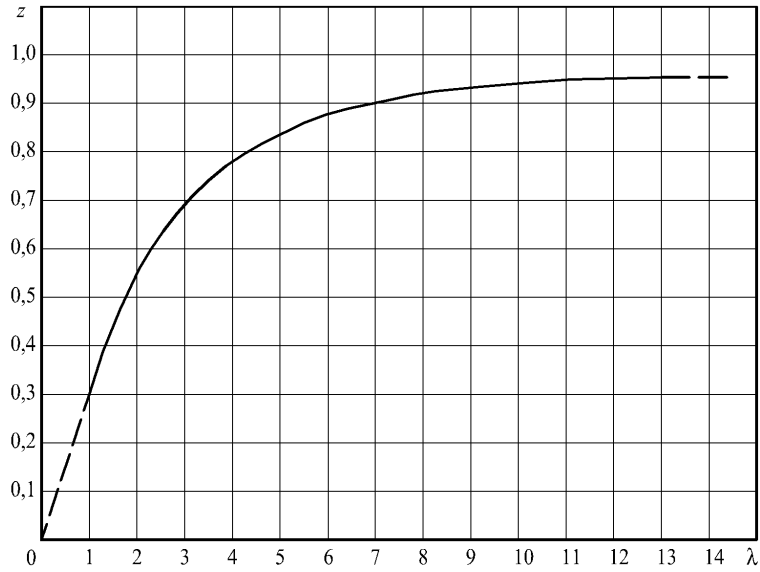


Рис. 1.36. Зависимость коэффициента z от коэффициента $\lambda = \frac{l \operatorname{tg} \alpha}{\delta_5 h}$.

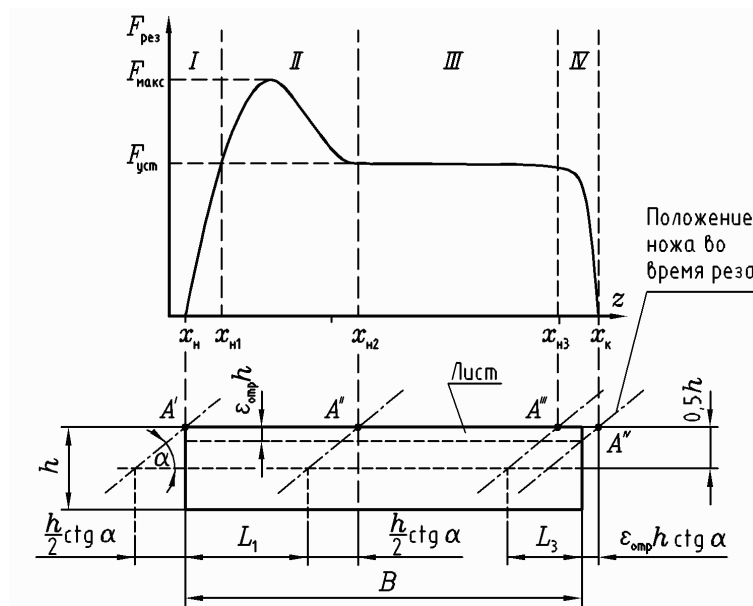


Рис. 1.37. Изменение силы реза в зависимости от положения ножа.

В [6], [68] и др. указывается, что усилие реза зависит от положения ножа относительно начала реза. Точное моделирование процесса резки — достаточно сложная задача, вместе с тем, для анализа работы системы управления достаточно имитировать изменение усилия в зависимости от положения точки врезания x_A относительно края листа (рис. 1.37). В [68] приведены эмпирические формулы для определения положения ножа по средней плоскости листа, в котором начинается установившийся процесс резания

$$L_1 \approx (1,2 \dots 1,5) \cdot \frac{h}{2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (1.13)$$

и точки, начиная с которой, сила реза уменьшается

$$L_3 \approx (1 \dots 1,3) \cdot \frac{h}{2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (1.14)$$

где h — толщина разрезаемого листа; α — угол наклона верхнего ножа.

Следует отметить, что более целесообразно связать зависимость усилия резки не со средней плоскостью листа, а с точкой врезания ножа в металл A , что и было сделано в дальнейшем.

Составим формулу для расчёта усилия реза, соответствующую описанию, приведённому в параграфе 1.4. Принимаем, что на участке I усилие возрастает линейно, от нуля до величины $F_{уст}$ на участке II изменяется по параболе, на III оно постоянно и равно $F_{уст}$, а на IV — усилие спадает по параболе. При этом, усилие реза будет описываться уравнением

$$F_{рез}(x_A) = \begin{cases} a \cdot x_A, & \text{при } x_A \in [x_H; x_{H1}], \\ a_1 \cdot x_A^2 + b_1 \cdot x_A + c_1, & \text{при } x_A \in [x_{H1}; x_{H2}], \\ F_{уст}, & \text{при } x_A \in [x_{H2}; x_{H3}], \\ a_2 \cdot x_A^2 + b_2 \cdot x_A + c_2, & \text{при } x_A \in [x_{H3}; x_K], \\ 0, & \text{при любом другом } x_A, \end{cases} \quad (1.15)$$

где $F_{уст} = k \cdot F_{макс}$ — усилие при установившемся процессе резки; k — отношение усилия при установившемся резе к максимальному значению, которое исходя из графика, приведённого в [36], можно принять равным $k = 0,72$; $a, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$ и c_2 — коэффициенты уравнений; x_H и x_K — начало и конец процесса резки; x_{H1}, x_{H2} и x_{H3} — точки, разграничивающие различные участки графика силы реза.

Для простоты будем считать, что лист находится в начале координат. Нижняя грань листа совпадает с осью абсцисс, а боковая грань, от которой начинается рез, — с осью ординат ($x_H = 0$). Рассмотрим участки *I* и *II*. Усилие реза появляется, когда нож касается листа в точке A' ($x_A = 0$). Установившийся процесс начинается, когда точка врезания находится в точке A'' , т. е. на расстоянии

$$x_{H2} = L_1 + \frac{h}{2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1,25h \operatorname{ctg} \alpha. \quad (1.16)$$

Примем, что линейный участок *I* завершается, когда усилие достигает установившегося значения $F_{уст}$ в точке x_{H1} , откуда имеем уравнение

$$F(x_{H1}) = ax_{H1} = F_{уст}. \quad (1.17)$$

При переходе от участка *I* к участку *II* в точке x_{H1} усилие изменяется непрерывно, без скачков, из чего следует уравнение

$$F(x_{H1}) = a_1 x_{H1}^2 + b_1 x_{H1} + c_1 = F_{уст}. \quad (1.18)$$

Кроме того, естественно требовать, чтобы график усилия не имел в этой точке излома, (производная функции $F_{рез}$ была непрерывна)

$$\left. \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x_A=x_{H1}} = 2a_1 x_{H1} + b_1 = a. \quad (1.19)$$

Принимаем, что усилие достигает максимума в точке $x_A = \frac{x_{H1} + x_{H2}}{2}$, откуда получаем ещё два уравнения

$$a_1 \cdot \left(\frac{x_{H1} + x_{H2}}{2} \right)^2 + b_1 \cdot \frac{x_{H1} + x_{H2}}{2} + c_1 = F_{\max}; \quad (1.20)$$

$$2 \cdot a_1 \cdot \frac{x_{H1} + x_{H2}}{2} + b_1 = 0. \quad (1.21)$$

Решив систему из уравнений (1.17) — (1.21) в пакете MAPLE, получим

$$\begin{aligned} x_{H1} &= \frac{F_{уст} x_{H2}}{4F_{\max} - 3F_{уст}}; \\ a &= \frac{F_{уст}}{x_{H1}}; \\ a_1 &= \frac{1}{4} \cdot \frac{(4F_{\max} - 3F_{уст})^2}{x_{H2}^2 \cdot (F_{уст} - F_{\max})}; \end{aligned}$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(4F_{\text{макс}} - 3F_{\text{уст}}) \cdot (F_{\text{уст}} - 2F_{\text{макс}})}{x_{\text{н2}} \cdot (F_{\text{уст}} - F_{\text{макс}})};$$

$$c_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{F_{\text{уст}}^2}{F_{\text{уст}} - F_{\text{макс}}}.$$

Рассмотрим теперь участок зоны *IV*. Усилие начинает спадать (положение *A'''*), когда точка врезания занимает положение

$$x_{\text{н3}} = B - L_3 + \frac{h}{2} \cdot \text{ctg } \alpha = B - 0,15h \text{ ctg } \alpha.$$

Принимаем, что усилие в точке сопряжения участков *III* и *IV* не имеет разрыва

$$a_2 x_{\text{н3}}^2 + b_2 x_{\text{н3}} + c_2 = F_{\text{уст}}, \quad (1.22)$$

и что график усилия в этой точке не имеет излома

$$2a_2 x_{\text{н3}} + b_2 = 0. \quad (1.23)$$

Будем считать, что рез заканчивается, когда точка ножа, лежащая на линии $y = h \cdot (1 - \varepsilon_{\text{отр}})$ выходит из проката (точка «врезания», связанная с ножом, занимает положение *A^{IV}*, находящееся вне заготовки)

$$x_{\text{к}} = B + \varepsilon_{\text{отр}} h \text{ ctg } \alpha,$$

откуда получаем уравнение

$$a_2 x_{\text{к}}^2 + b_2 x_{\text{к}} + c_2 = 0. \quad (1.24)$$

Решив совместно уравнения (1.22) – (1.24), получаем

$$a_2 = \frac{-F_{\text{уст}}}{(x_{\text{к}} - x_{\text{н3}})^2};$$

$$b_2 = \frac{2F_{\text{уст}} x_{\text{н3}}}{(x_{\text{к}} - x_{\text{н3}})^2};$$

$$c_2 = \frac{F_{\text{уст}} x_{\text{к}} \cdot (x_{\text{к}} - 2x_{\text{н3}})}{(x_{\text{к}} - x_{\text{н3}})^2}.$$

Скрипт для пакета MATLAB, который определяет величину усилия в зависимости от положения ножа, приведён в листинге 1.10.

1.5. Выводы по главе

1. В результате проведённого анализа ЭМС комплекса резки листового проката выявлены их недостатки, основными из которых являются: отклонение траектории движения ножа от оптимальной, что приводит к искривлению обрезанной кромки листа; установка бокового зазора может существенно отличаться от оптимальной, что приводит к повышению образования на поверхности реза заусенцев и увеличению энергозатрат на рез; недостаточное совмещение операций, выполняемых механизмами комплекса резки, что приводит к снижению производительности.

2. Анализ существующих механизмов резания и тенденций их развития показывает, что дальнейшее совершенствование механических систем синхронизации движения ножа и систем их управления имеет ряд ограничений, которые не позволяют обеспечить оптимальную траекторию движения ножа.

3. Наиболее часто используемый трапецеидальный закон управления главным приводом ножниц не является оптимальным с точки зрения энергопотребления, что обуславливает необходимость, с одной стороны, более детального исследования функционирования механизма резания с учётом статических и динамических его свойств, а также влияния механических свойств разрезаемого проката, а с другой стороны синтеза более совершенных алгоритмов управления механизмом резания.

4. Поскольку работа участка резки связана с последовательной работой механизмов комплекса резки (выравнивающего устройства, прижима листа, НПР, передвижного упора, механизма качания рольганга), требующим снижения скорости проката, вплоть до полной остановки, и его остановки, то анализ работы этого участка с целью выявления возможности совмещения ряда операций во времени и разработки принципов построения систем управления комплексами резки имеет важное значение, т. к. позволит повысить производительность как участка резки, так и всего стана. Например, время, необходимое для выравнивания листа зависит от геометрических параметров проката. На сегодняшний день это никак не учитывается, в то время, как оптимизация этого процесса

позволит увеличить скорость подачи листа к ножницам, и, как следствие, производительность комплекса резки. Кроме того, выявлена возможность повышения производительности комплекса резки за счёт согласованной работы механизмов качания рольганга и механизма резания ножниц.

5. Выявлена возможность увеличения срока службы ножей между переточками за счёт выравнивания узкого проката вдоль разных бортов рольганга с учётом износа режущей кромки ножа. Лист в существующих конструкциях выравнивается относительно только одного из бортов рольганга или центрируется относительно оси рольганга, что приводит к неравномерному износу ножей.

6. Выполнено математическое описание процессов резки и разработана модель для пакета MATLAB/SIMULINK, имитирующая взаимодействие ножа с прокатом и предназначенная для использования в качестве составной части моделей ЭМС ножниц различного кинематического исполнения.

7. Рассмотрены основные параметры ножниц и разрезаемого проката, указано их влияние на качество резки и энергосиловые параметры процесса резания. Выявлено, что в рассматриваемых пределах изменения величины бокового зазора, траектории движения ножа и скорости реза эти параметры влияют на качество и силу реза независимо друг от друга.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НОЖНИЦАМИ С КАТЯЩИМСЯ РЕЗОМ

Компьютерная реализация математических моделей, разработка которых осуществляется в данной главе, необходима для проведения исследований существующих и вновь разрабатываемых алгоритмов управления главными электроприводами НПП с целью оценки их функционирования в условиях, максимально приближенных к реальным. Модели ЭМС ножниц включают в себя модели механизма резания и системы управления электроприводом. Системы управления электропривода унифицированы. Разработкой моделей НКР, учитывающих динамику механизма резания, ранее ни кто не занимался, (т. к. задачи оптимизации процесса резки решались механическими средствами). Вместе с тем, именно механика ножниц в существенной степени определяет режимы как работы электропривода, так и обработки проката. Поэтому, в данной работе существенное внимание уделяется математическому описанию механической части ножниц. Для моделирования ЭМС управления необходимо определить действующие на валах электродвигателей статические и динамические моменты. Для этого, осуществляется расчёт положений и скоростей звеньев механизма и их центров масс, на основе которого моделируется движение ножа, и рассчитывается сила реза (см. раздел 1.4.), определяются статические моменты, обусловленные силой реза, неуравновешенными массами и действием механизма прижима верхнего суппорта к копиру (для ножниц с копиром). На основе планов положений и скоростей осуществляется расчёт динамики механической части ЭМС ножниц, описываемой дифференциальными уравнениями Лагранжа второго рода. Ниже приведены математические модели двухкривошипных ножниц с коромыслом, копиром и однокривошипных ножниц с коромыслом.

2.1. Математические модели электромеханической системы

управления двухкривошипными ножницами с коромыслом

2.1.1. Кинематический расчёт двухкривошипных ножниц

Описание кинематического расчёта можно найти в работе [11]. Его недостатком является то, что для определения координат суппорта необходимо ре-

шить систему двух нелинейных уравнений, что делает неудобным его использование в задачах моделирования. Кроме того, необходимый для определения динамических моментов расчёт скоростей звеньев механизма в указанной работе не приводится. Поэтому, для задач моделирования разработана собственная методика кинематического расчёта двухкривошипных ножниц. Для выполнения расчёта должны быть заданы следующие параметры механизма: длины звеньев $l_a, l_b, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$ и жёсткий угол β ; координаты $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$ точек крепления кривошипов a и b ; положения кривошипов α_a, α_b и их угловые скорости ω_a и ω_b . Расчётная схема для плана положений приведена на рис. 2.1. Все углы отсчитываются в положительном направлении против часовой стрелки. При расчёте положений звеньев механизма искомыми переменными являются углы наклона звеньев 1–6 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$); координаты точек (шарниров) 1, 2, 3, 4 и 5 ($(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ и (x_5, y_5)) и векторы звеньев $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3, \vec{l}_4, \vec{l}_5$ и \vec{l}_6 .

Введём систему координат xOy . Начало координат выберем в точке O , в которой закреплено коромысло 5. Положение механизма однозначно задаётся углами поворота кривошипов α_a и α_b . Положение механизма можно также задать и какими-либо двумя другими обобщёнными координатами, например, $(\tilde{L}, \tilde{\alpha})$, где \tilde{L} — модуль радиус-вектора точки 3, $\tilde{\alpha}$ — угол его наклона.

Поскольку аналитический метод определения искомых величин трудоёмок решение получаемых систем находилось численными методами, в процессе решения использовались уравнения связи

$$l_4^2 = \left[x_5 - \left(\tilde{L} \cos \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \cos \alpha_3(\tilde{L}) \right) \right]^2 + \left[y_5 - \left(\tilde{L} \sin \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \sin \alpha_3(\tilde{L}) \right) \right]^2.$$

Для определения скоростей звеньев механизма получена система уравнений в матричной форме

$$\begin{pmatrix} l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_2 \sin(\alpha_3 - \beta) & 0 & -l_5 \sin \alpha_5 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_2 \cos(\alpha_3 - \beta) & 0 & -l_5 \cos \alpha_5 \\ l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_3 \sin \alpha_3 & -l_4 \sin(\alpha_4 + \pi) & 0 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_3 \cos \alpha_3 & -l_4 \cos(\alpha_4 + \pi) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_{23} \\ \omega_4 \\ \omega_5 \end{pmatrix} = \quad (2.1)$$

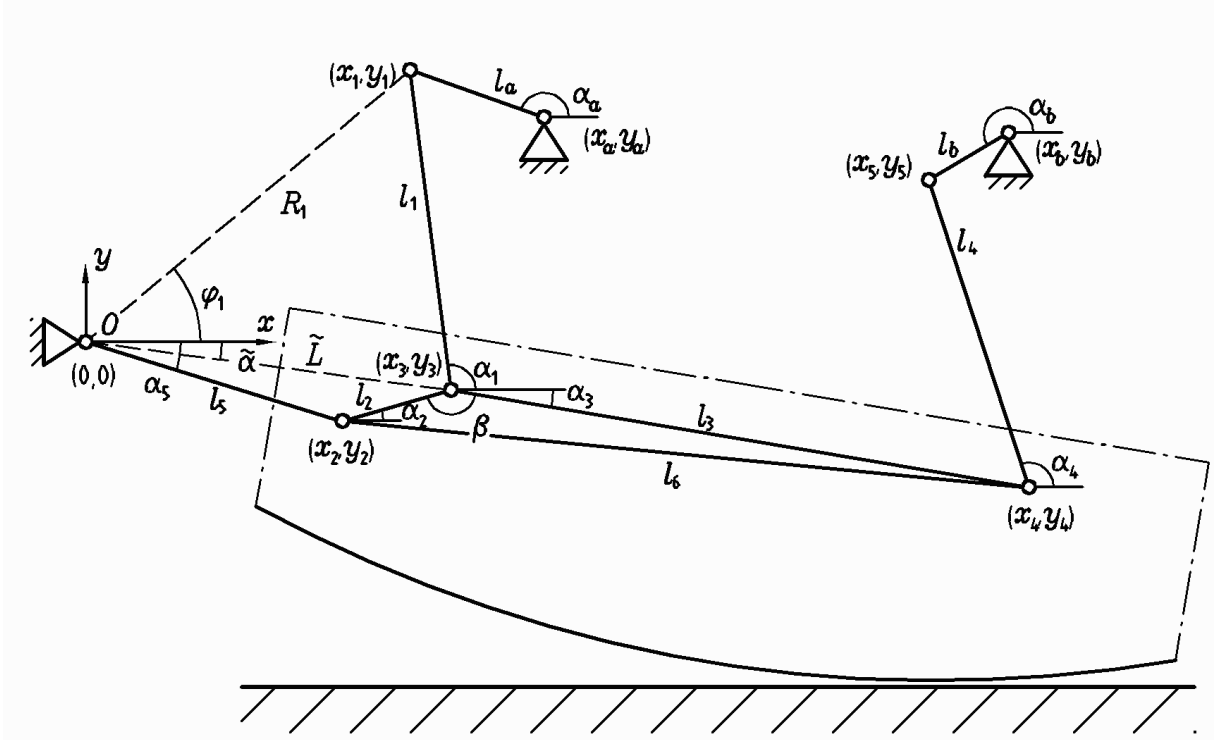


Рис. 2.1. Кинематическая схема ножниц.

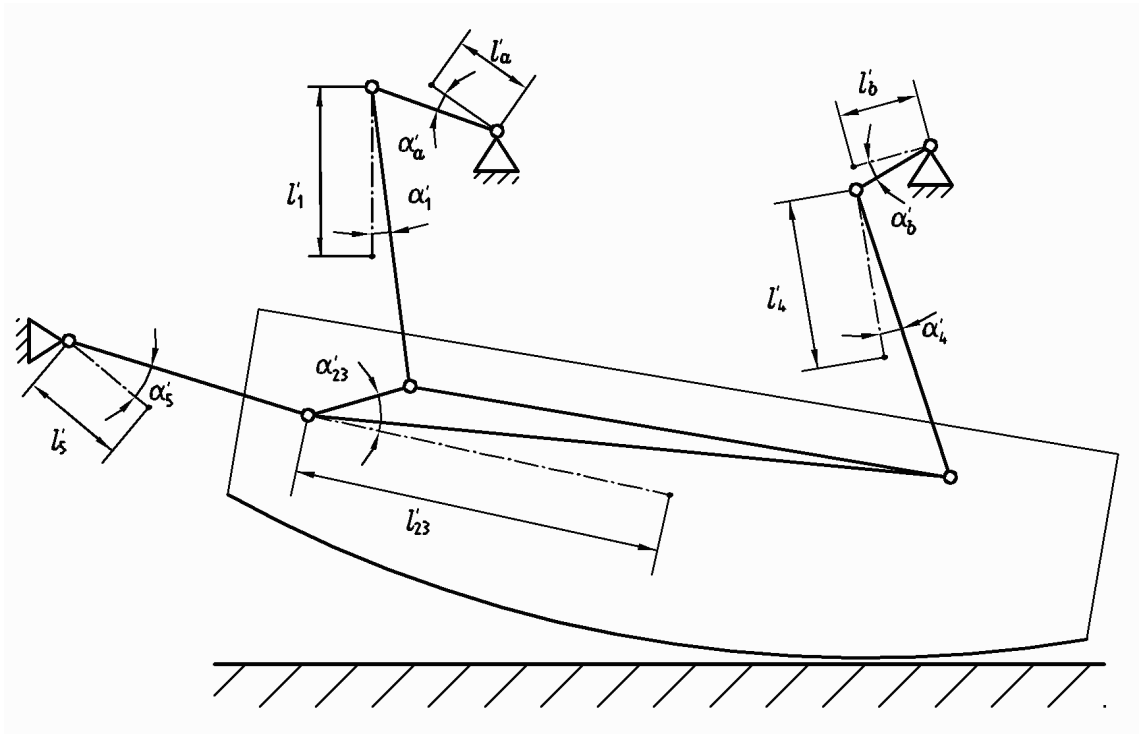


Рис. 2.2. Положения центров масс.

$$= \begin{pmatrix} -l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ -l_a \omega_a \cos \alpha_a \\ l_b \omega_b \sin \alpha_b - l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ l_b \omega_b \cos \alpha_b - l_a \omega_a \cos \alpha_a \end{pmatrix}.$$

Решение данной системы трудоёмко, поэтому оно осуществлялось средствами MATLAB [43, 15].

Подробный ход вывода и решения уравнений кинематики механизма резания двухкривошипных НКР с коромыслом приведён в приложении №2 и в работе [21]. Для расчёта динамики механизма и расчёта моментов на валах кривошипов от неуравновешенных масс необходимо определить мгновенные положения и скорости центров масс механизма (рис. 2.2). Зависимости, описывающие положения центров масс и их скоростей, также приведены в приложении №2.

2.1.2. Расчёт динамики электромеханической системы двухкривошипных ножниц с коромыслом

Динамические процессы ЭМС электропривода, в том числе и механизма резания НКР, можно условно разделить на процессы, происходящие в механической части электропривода (редукторе, механизме резания, системе «нож-лист»), процессы, происходящие в контуре момента (в силовой части преобразователя, электромагнитной системе двигателя), и процессы, происходящие в системе управления электроприводом.

Рассмотрим математическое описание процессов, происходящих в силовой части ПЧ–АД. Система частотного управления обеспечивает поддержание постоянства потокосцепления ротора $\Psi_2 = \text{const}$. При совмещении оси Ox с век-

тором потокосцепления ротора состояние АД описывается системой уравнений

$$\begin{cases} u_{1x} = i_{1x}R_1 - \omega_{0\text{эл}}\Psi_{1y} + \frac{d\Psi_{1x}}{dt}, \\ u_{1y} = i_{1y}R_1 + \omega_{0\text{эл}}\Psi_{1x} + \frac{d\Psi_{1y}}{dt}, \\ 0 = i'_{2x}R'_2 + \frac{d\Psi_{2x}}{dt}, \\ 0 = i'_{2y}R'_2 + (\omega_{0\text{эл}} - p_{\text{п}}\omega)\Psi_{2x}, \\ M = \frac{3}{2}p_{\text{п}}\frac{L_{12}}{L'_2}(i_{1y}\Psi_{2x} - i_{1x}\Psi_{2y}), \end{cases}$$

где u_{1x} , u_{1y} — проекции вектора напряжения статора на оси Ox и Oy ; i_{1x} , i_{1y} — проекции вектора тока статора на оси Ox и Oy ; R_1 — активное сопротивление фазы статора; $\omega_{0\text{эл}}$ — синхронная скорость поля АД; Ψ_{1y} , Ψ_{1x} — проекции вектора потокосцепления статора на оси Ox и Oy ; i'_{2x} , i'_{2y} — проекции приведённого к цепи статора вектора тока обмотки ротора на оси Ox и Oy ; R'_2 — активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к цепи статора; $\omega_{\text{эл}}$ — электрическая скорость вращения ротора относительно статора; Ψ_{2x} , Ψ_{2y} — проекции вектора потокосцепления ротора на оси Ox и Oy ; $p_{\text{п}}$ — число пар полюсов статора АД; L_{12} — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; L'_2 — собственная индуктивность обмотки ротора, приведённая к цепи статора; M — электромагнитный момент на роторе.

Намагничивающим током АД при управлении с ориентацией по потоку является ток i_{1x} , а момент пропорционален току i_{1y} . При этом $\Psi_{2x} = \Psi_{2\text{макс}} = \text{const}$, $\Psi_{2y} = 0$ и $i'_{2x} = 0$. Проекция потокосцеплений статора и ротора на оси xOy

$$\Psi_{1x} = L_1 I_{1x} + L_{12} I'_{2x}; \quad \Psi_{1y} = L_1 I_{1y} + L_{12} I'_{2y}; \quad (2.2)$$

$$\Psi_{2x} = L'_2 I'_{2x} + L_{12} I'_{1x}; \quad \Psi_{2y} = 0 = L'_2 I'_{2y} + L_{12} I'_{1y}. \quad (2.3)$$

Основой построения систем с векторным управлением является информация о мгновенном значении пространственном положении вектора потокосцепления в воздушном зазоре. Раньше для измерения потокосцепления осуществлялось с помощью датчиков Холла. В настоящее время используются математические модели АД, являющиеся частью ПО контроллера, встроенного в ПЧ.

Для реализации управления потоком и моментом двигателя по отклонению необходимо измерить мгновенные реальные трёхфазные токи статора и поток в

воздушном зазоре, осуществить преобразование трёхфазных переменных к эквивалентным двухфазным и произвести координатное преобразование их к осям, ориентированным по полю. Определённые таким образом преобразованные текущие значения i_{1x} и i_{1y} остаётся сравнить с их заданными значениями, получить сигналы управления потоком и моментом в осях xOy , а затем осуществить обратное координатное и двухфазно-трёхфазное преобразования и получить действительные сигналы для управления трёхфазным преобразователем частоты. Функциональная схема одной из возможных реализаций СУ представлена на рис. 2.3.

Система управления состоит из трёх крупных блоков: блока вычисления текущих значений переменных БВТП; блока регуляторов переменных БРП и блока вычисления заданных значений переменных — управляющих воздействий БВЗП. Блок БВТП преобразует измеренные значения потока в воздушном зазоре $\Psi_{\mu a}$ и $\Psi_{\mu b}$ и измеренные с помощью датчиков тока действительные трёхфазные переменные токи i_{1a} и i_{1b} в ориентированные по полю значения потокосцепления ротора $\Psi_{2\text{макс}}$, намагничивающего тока i_{1x} и активного тока i_{1y} . Он состоит из блоков фазных преобразований БФП1 и БФП2, блока векторного фильтра БВФ.

Блок БФП1 осуществляет трёхфазно-двухфазное преобразование потокосцепления в воздушном зазоре в соответствии с формулами

$$\Psi_{\mu\alpha} = \sqrt{3/2}\Psi_{\mu a}; \quad \Psi_{\mu\beta} = \sqrt{2}(1/2\Psi_{\mu a} + \Psi_{\mu b}), \quad (2.4)$$

а также рассчитывает потокосцепление ротора

$$\Psi_{2\alpha} = \frac{L'_2}{L_{12}}\Psi_{\mu\alpha} - (L'_2 - L_{12})i_{1\alpha}; \quad \Psi_{2\beta} = \frac{L'_2}{L_{12}}\Psi_{\mu\beta} - (L'_2 - L_{12})i_{1\beta}. \quad (2.5)$$

Значения $i_{1\alpha}$ и $i_{1\beta}$ вычисляются блоком БФП2 по формулам

$$i_{1\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}}i_{1A}; \quad i_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{1B} - i_{1C}).$$

Блок векторного фильтра БВФ решает задачу определения мгновенного пространственного угла $\varphi_{0\text{эл}}$ вектора потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_2$. Расчёт осуществляется по выражениям

$$\Psi_{2\text{макс}} = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}; \quad \cos \varphi'_{0\text{эл}} = \frac{\Psi_{2\alpha}}{\Psi_{2\text{макс}}}; \quad \sin \varphi'_{0\text{эл}} = \frac{\Psi_{2\beta}}{\Psi_{2\text{макс}}}.$$

Полученные на выходе БВФ функции $\cos \varphi_{0\text{эл}}$ и $\sin \varphi_{0\text{эл}}$ используются для координатного преобразования токов $i_{1\alpha}$ и $i_{1\beta}$, которое осуществляется блоком БКП1. На его выходе получают составляющие тока статора i_{1x} и i_{1y} , постоянные по значению (для статического режима):

$$i_{1x} = i_{1\alpha} \cos \varphi_{0\text{эл}} + i_{1\beta} \sin \varphi_{0\text{эл}}; \quad i_{1y} = -i_{1\alpha} \sin \varphi_{0\text{эл}} + i_{1\beta} \cos \varphi_{0\text{эл}}.$$

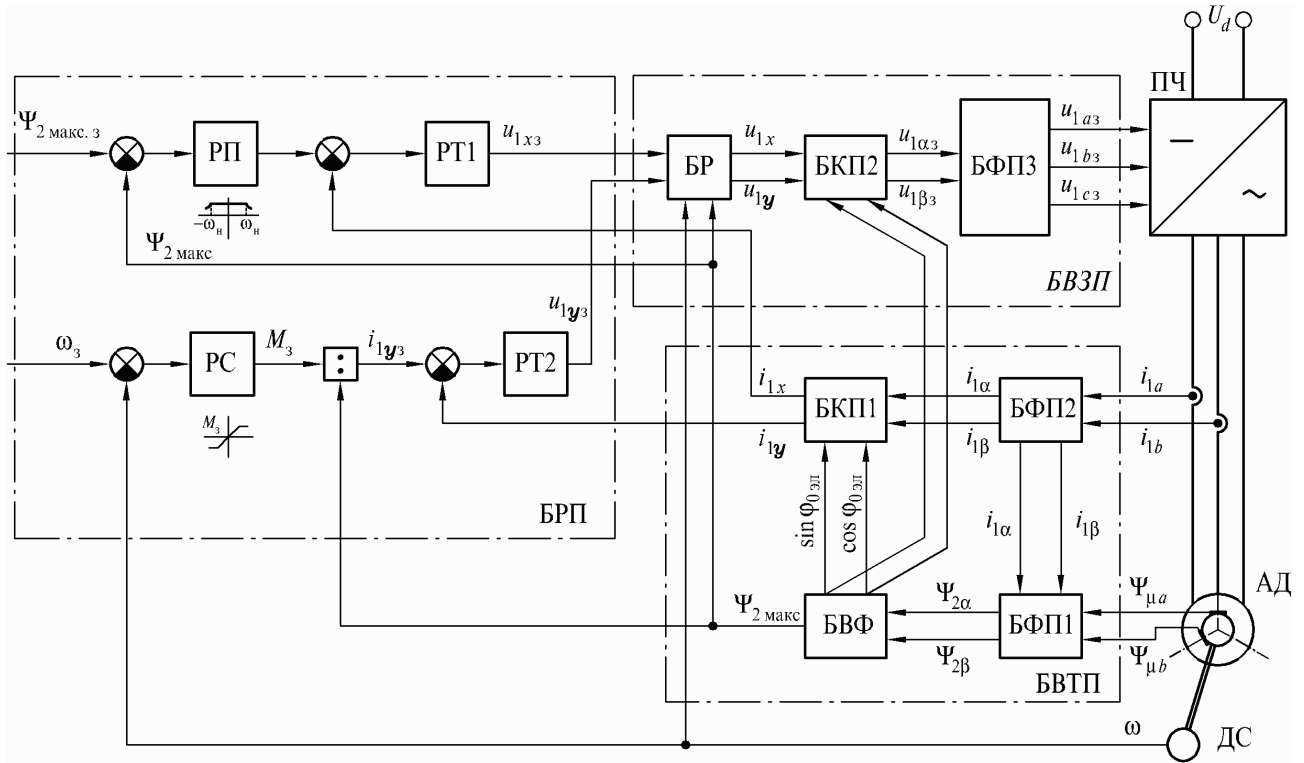


Рис. 2.3. Функциональная схема системы регулирования скорости АД с управлением по вектору потокосцепления его ротора.

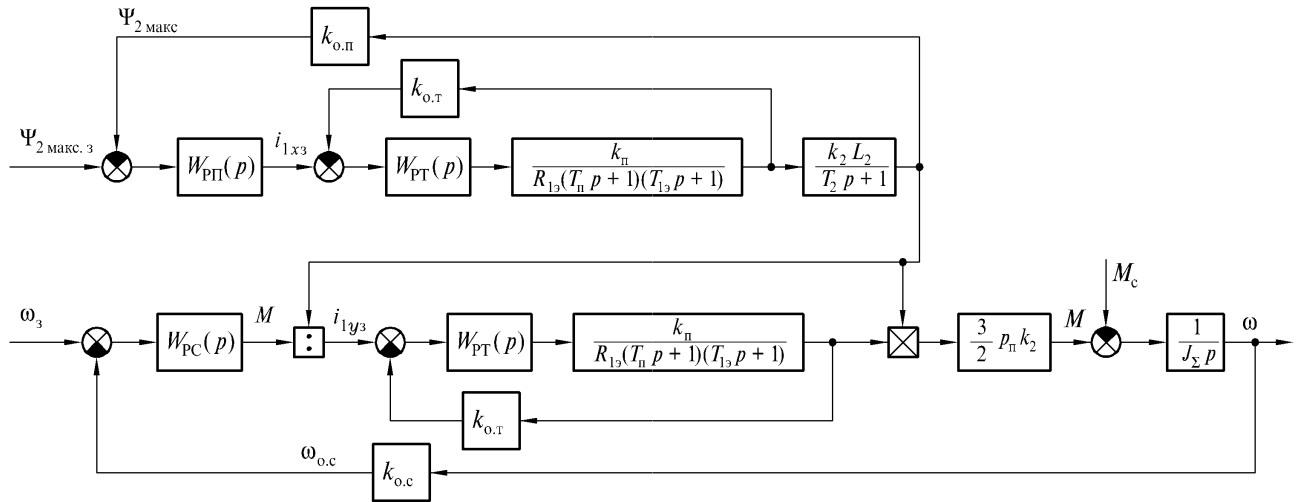


Рис. 2.4. Структурная схема системы ПЧ–АД при ориентации координат xOy по потокосцеплению ротора.

Эти значения, а также текущие значения потокосцепления $\Psi_{2\text{макс}}$ и скорость ω поступают в блок регуляторов переменных БРП и используются для регулирования по отклонению от заданных значений. В рассматриваемом варианте схемы канал регулирования потока (регулятор РП) введён подчинённый контур регулирования намагничивающего тока i_{1x} (регулятор РТ1). В контур регулирования скорости (регулятор РС) для получения возможности регулирования момента в режимах ослабления поля введён блок деления БД, определяющий заданное значение активного тока $i_{1yз}$ по заданному значению момента $M_з$ и текущему значению потокосцепления $\Psi_{2\text{макс}}$. Кроме того, предусмотрен подчинённый контур регулирования активного тока (регулятор РТ2). Все регуляторы пропорционально-интегральные для обеспечения астатического регулирования каждой переменной.

Получаемые на выходе регуляторов тока РТ1 и РТ2 управляющие воздействия $u'_{1xз}$ и $u'_{1yз}$ оказывают влияние как на свою регулируемую переменную, так и на регулируемую переменную другого канала. Для устранения взаимного влияния в схеме предусмотрен блок развязки БР, который вычисляет управляющие воздействия. Вычисленные блоком развязки БР заданные значения $u_{1xз}$ и $u_{1yз}$, ориентированные по полю, трансформируются блоком координатного преобразования БКПЗ в эквивалентные величины $u_{1\alphaз}$ и $u_{1\betaз}$, ориентированные относительно статора по формулам

$$u_{1\alpha} = u_{1x} \cos \varphi_{0\text{эл}} - u_{1y} \sin \varphi_{0\text{эл}}; \quad u_{1\beta} = u_{1x} \sin \varphi_{0\text{эл}} + u_{1y} \cos \varphi_{0\text{эл}}.$$

Блок БФПЗ осуществляет двухфазно-трёхфазное преобразование

$$u_{1aз} = \sqrt{\frac{2}{3}} u_{1\alpha}; \quad u_{1bз} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} u_{1\alpha} + u_{1\beta} \right); \quad u_{1cз} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} u_{1\alpha} - u_{1\beta} \right),$$

и на его выходе формируются трёхфазные задающие напряжения $u_{1aз}$, $u_{1bз}$ и $u_{1cз}$ для управления преобразователем частоты.

Структурная схема системы ПЧ–АД при ориентации координат xOy по потокосцеплению ротора представлена на рис. 2.4. На схеме обозначены k_2 — коэффициент электромагнитной связи ротора, $k_2 = L_{12}/L'_2$; k_{Π} — эквивалентный статический коэффициент передачи между составляющими напряжений $u_{1xз}$, $u_{1yз}$

управления преобразователем и составляющими в осях xOy выходных напряжений преобразователя u_{1x} , u_{1y} ; $R_{1\sigma}$ — эквивалентное активное сопротивление цепи статора, $R_{1\sigma} = R_1 + k_2^2 R_2'$; $T_{1\sigma}$ — электромагнитная постоянная времени этой цепи, $T_{1\sigma} = \sigma L_1 / R_{1\sigma}$; T_{π} — эквивалентная постоянная времени цепи управления преобразователем; T_2 — электромагнитная постоянная времени цепи ротора $T_2 = L_2' / R_2'$; $k_{o.t}$ — коэффициент обратной связи по току; $k_{o.\pi}$ — коэффициент обратной связи по потокосцеплению; $k_{o.c}$ — коэффициент обратной связи по скорости; σ — коэффициент рассеяния магнитного поля АД, $\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2}$.

Исследования показали, что при реальных параметрах электромеханической системы ножниц динамические процессы, происходящие во внутренних контурах ПЧ (контурах регулирования составляющих вектора тока статора), не оказывают существенного влияния на динамику электропривода ножниц. Поэтому настроенный замкнутый контур момента адекватно описывается апериодическим звеном с передаточной функцией

$$W_M(s) = \frac{k_M}{T_M s + 1},$$

где k_M — коэффициент пропорциональности, численно равный номинальному моменту двигателя; T_M — постоянная времени замкнутого контура момента, равная 0,01 с. Модель системы управления содержит ПИ-регуляторы положения и скорости. Контур положения и скорости настроены на симметричный оптимум. Полоса пропускания контура скорости соответствует одной десятой минимальной частоты упругих колебаний привода, что позволило не учитывать наличие упругих связей между приводами [13], [44].

Поскольку, разрабатываемые в дальнейшем алгоритмы, требуют точной отработки задания положения, то на контуры момента и скорости вводятся производные задающего воздействия. В модели кривошипные рассматриваются не связанными жёстко друг с другом, т. к. предусматривается электрическая синхронизация кривошипов. Каждый двигатель должен обрабатывать своё заданное положение, поэтому в модели системы управления нет связей выравнивания нагрузки. Случай, когда оба двигателя работают на общий вал редуктора, аналогичен работе однокривошипных ножниц и рассматривается в разделе 2.3.2.

Поскольку механизм имеет две степени свободы, то наиболее простым методом расчёта механизма является метод обобщённых координат [31]. Запишем уравнения Лагранжа для двухкривошипных ножниц с катящимся резом

$$\begin{cases} M_a = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \dot{\alpha}_a} - \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_a}, \\ M_b = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \dot{\alpha}_b} - \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_b}. \end{cases} \quad (2.6)$$

где M_a, M_b — моменты на кривошипных валах; $E_{\text{к}}$ — кинетическая энергия механизма ножниц.

Величина $E_{\text{к}}$ вычисляется по формуле

$$E_{\text{к}} = \sum_k \frac{m_k (v'_k)^2}{2} + \sum_j \frac{J_j \omega_j^2}{2},$$

где m_k — масса k -го звена ($k \in \{1, 2, 3, 4\}$); v'_k — модуль скорости центра масс k -го звена; J_j — момент инерции j -го звена ($j \in \{1, 2, 3, 4, 5, a, b\}$); ω_j — угловая скорость вращения j -го звена.

Перепишем уравнения для кривошипов в виде:

$$\begin{cases} \int \left(M_a + \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_a} \right) dt = \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \dot{\alpha}_a}, \\ \int \left(M_b + \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_b} \right) dt = \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \dot{\alpha}_b}. \end{cases} \quad (2.6^*)$$

Величину $\frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \dot{\alpha}_i} = \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \omega_i}$ ($i \in \{a, b\}$) можно найти из следующих равенств

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \omega_i} &= \sum_k \frac{1}{2} \frac{\partial (m_k (v'_k)^2)}{\partial \omega_i} + \sum_j \frac{1}{2} \frac{\partial (J_j \omega_j^2)}{\partial \omega_i} = \sum_k \frac{m_k 2v'_k \partial v'_k}{2\partial \omega_i} + \sum_j \frac{J_j 2\omega_j \partial \omega_j}{2\partial \omega_i} = \\ &= \sum_k m_k v'_k \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_i} + \sum_j J_j \omega_j \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_i}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что в силу линейности систем уравнений (2.1) относительно ω_a и ω_b производные $\frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a}$ и $\frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b}$ при фиксированных положениях кривошипов будут константами. Т. к. $\frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a}$ и $\frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b}$ выражаются через ω_j линейно, то эти производные также будут константами.

В силу линейности $v'_k = v'_k(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, \omega_b)$ и $\omega_j = \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, \omega_b)$ относительно ω_i частные производные $\frac{\partial v'_k}{\partial \omega_i}$ и $\frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_i}$ можно найти по формулам

$$\frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a} = \frac{v'_k(\alpha_a, \alpha_b, \Delta\omega, \omega_b) - v'_k(\alpha_a, \alpha_b, 0, \omega_b)}{\Delta\omega}; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b} = \frac{v'_k(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, \Delta\omega) - v'_k(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, 0)}{\Delta\omega}; \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a} = \frac{\omega_j(\alpha_a, \alpha_b, \Delta\omega, \omega_b) - \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, 0, \omega_b)}{\Delta\omega}; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b} = \frac{\omega_j(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, \Delta\omega) - \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, 0)}{\Delta\omega}, \quad (2.10)$$

где $\Delta\omega$ — некоторая произвольная ненулевая величина.

По полученным из уравнения (2.6*) значениям $\frac{\partial E_K}{\partial \omega_i}$ найдём значения скоростей ω_i . Заметим, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_K}{\partial \omega_a} &= \sum_k m_k v'_k \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a} + \sum_j J_j \omega_j \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a} = \\ &= \sum_k m_k v'_{ka} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a} + \sum_j J_j \omega_{ja} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a} + \sum_k m_k v'_{kb} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a} + \sum_j J_j \omega_{jb} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_K}{\partial \omega_b} &= \sum_k m_k v'_k \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b} + \sum_j J_j \omega_j \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b} = \\ &= \sum_k m_k v'_{ka} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b} + \sum_j J_j \omega_{ja} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b} + \sum_k m_k v'_{kb} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b} + \sum_j J_j \omega_{jb} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b}, \end{aligned}$$

где $v'_{ka} = v'_k(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, 0)$, $\omega_{ja} = \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, \omega_a, 0)$ — составляющие скоростей v'_k и ω_j , вызываемые вращением кривошипа a ; $v'_{kb} = v'_k(\alpha_a, \alpha_b, 0, \omega_b)$; $\omega_{jb} = \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, 0, \omega_b)$ — составляющие скоростей v'_k и ω_j , вызываемые вращением кривошипа b .

Обозначим

$$J_{\text{пр}a}(\alpha_a, \alpha_b) = \sum_k m_k \cdot \frac{v'_{ka}}{\omega_a} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a} + \sum_j J_j \frac{\omega_{ja}}{\omega_a} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a}; \quad (2.11)$$

$$J_{\text{пр}ab}(\alpha_a, \alpha_b) = \sum_k m_k \cdot \frac{v'_{kb}}{\omega_b} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_a} + \sum_j J_j \frac{\omega_{jb}}{\omega_b} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_a}; \quad (2.12)$$

$$J_{\text{пр}b}(\alpha_a, \alpha_b) = \sum_k m_k \cdot \frac{v'_{kb}}{\omega_b} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b} + \sum_j J_j \frac{\omega_{jb}}{\omega_b} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b}; \quad (2.13)$$

$$J_{\text{пр } ba}(\alpha_a, \alpha_b) = \sum_k m_k \cdot \frac{v'_{ka}}{\omega_a} \cdot \frac{\partial v'_k}{\partial \omega_b} + \sum_j J_j \frac{\omega_{ja}}{\omega_a} \cdot \frac{\partial \omega_j}{\partial \omega_b}. \quad (2.14)$$

Тогда, уравнения примут вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \omega_a} = J_{\text{пр } a}(\alpha_a, \alpha_b) \cdot \omega_a + J_{\text{пр } ab}(\alpha_a, \alpha_b) \cdot \omega_b, \\ \frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \omega_b} = J_{\text{пр } ba}(\alpha_a, \alpha_b) \cdot \omega_a + J_{\text{пр } b}(\alpha_a, \alpha_b) \cdot \omega_b. \end{cases} \quad (2.15)$$

Разрешив данную систему уравнений, найдём ω_a и ω_b .

В силу линейной зависимости v'_k и ω_j от ω_i можно найти отношения v'_{ki}/ω_i и ω_{ji}/ω_i по формулам

$$\frac{v'_{ka}}{\omega_a} = v'_k(\alpha_a, \alpha_b, 1, 0); \quad \frac{v'_{kb}}{\omega_b} = v'_k(\alpha_a, \alpha_b, 0, 1); \quad (2.16)$$

$$\frac{\omega_{ja}}{\omega_a} = \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, 1, 0); \quad \frac{\omega_{jb}}{\omega_b} = \omega_j(\alpha_a, \alpha_b, 0, 1). \quad (2.17)$$

Теперь определим производные $\frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_a}$ и $\frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_b}$. Изменение кинетической энергии механизма обусловлено работой dA , производимой им на рез, а также изменением потенциальной энергии, вызванным перемещением неуравновешенных масс (силами трения в механических передачах пренебрегаем)

$$\frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial (E_{\text{рез}} + E_{\text{п}})}{\partial \alpha_i}. \quad (2.18)$$

Работа на рез определяется скалярным произведением силы реза $\vec{F}_{\text{рез}}(x_F, \alpha)$ на элементарное перемещение $d\vec{x}_F$ режущей кромки ножа вдоль листа:

$$dE_{\text{рез}} = -dA = -F_{\text{рез}}(x_F, \alpha) \sin \alpha dx_F \approx -F_{\text{рез}}(x_F, \alpha) \Delta x_F \sin \alpha, \quad (2.19)$$

где x_F — точка врезания; α — угол резания.

Считая, что нож движется в одном направлении, разрезая металл, и не возвращается назад, можно силу $F_{\text{рез}}$ считать активной и при математическом описании пренебречь зависимостью её от направления движения ножа

$$\frac{\partial E_{\text{рез}}}{\partial \alpha_i} \approx \frac{-A}{\Delta \alpha_i} = \frac{-F_{\text{рез}}(x_F, \alpha) \sin \alpha [x_F(\alpha_i + \Delta \alpha_i) - x_F(\alpha_i)]}{\Delta \alpha_i}, \quad (2.20)$$

где A — работа при повороте i -го кривошипа на угол $\Delta \alpha_i$.

Теперь определим производные по $\frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial \alpha_i}$. Пусть кривошип b зафиксирован. Повернём кривошип a на малый угол $\Delta \alpha$. При этом центр масс k -го звена переместится на величину $\Delta a \vec{r}_k$. Потенциальная энергия механизма $E_{\text{п}}$ возрастёт на

величину

$$\Delta_a E_{\Pi} = \sum \Delta_a r_{yk} m_k g,$$

где $\Delta_a r_{yk}$ — проекция перемещения $\Delta_a \vec{r}_k$ центра масс k -го звена на ось Oy при повороте кривошипа a на небольшой угол $\Delta\alpha$; m_k — масса k -го звена; $g \approx 9,8$ Н/кг — ускорение свободного падения.

Аналогично при закреплённом кривошипе a , поворачивая кривошип b на малый угол $\Delta\alpha$, получим изменение потенциальной энергии

$$\Delta_b E_{\Pi} = \sum \Delta_b r_{yk} m_k g,$$

где $\Delta_b r_{yk}$ — проекция перемещения $\Delta_b \vec{r}_k$ центра масс k -го звена при повороте кривошипа на b на угол $\Delta\alpha$ на ось Oy ; m_k — масса k -го звена.

Увеличение потенциальной энергии механизма связано моментами от неуравновешенных масс выражениями

$$\Delta_a E_{\Pi} = M_{\Pi a} \Delta\alpha; \quad \Delta_b E_{\Pi} = M_{\Pi b} \Delta\alpha,$$

или

$$M_{\Pi a} \approx \frac{\Delta_a E_{\Pi}}{\Delta\alpha} = \frac{g \sum \Delta_a r_{yk} m_k}{\Delta\alpha}; \quad M_{\Pi b} \approx \frac{\Delta_b E_{\Pi}}{\Delta\alpha} = \frac{g \sum \Delta_b r_{yk} m_k}{\Delta\alpha}. \quad (2.21)$$

Откуда, переходя к дифференциалам, будем иметь

$$M_{\Pi a} = g \sum m_k \frac{\partial r_{yk}}{\partial \alpha_a}; \quad M_{\Pi b} = g \sum m_k \frac{\partial r_{yk}}{\partial \alpha_b}. \quad (2.22)$$

Частные производные $\frac{\partial r_{yk}}{\partial \alpha_a}$ и $\frac{\partial r_{yk}}{\partial \alpha_b}$ равны проекциям $\frac{\vec{v}_{ka}}{\omega_a}$ и $\frac{\vec{v}_{kb}}{\omega_a}$ на ось Oy .

2.1.3. Компьютерная модель электромеханической системы в пакете MATLAB

В целях экономии машинного времени процесс моделирования разделён на две части. В первой идёт процесс расчёта положений точек механизма при различных α_a и α_b (скриптом `Create2krData`, приведённым в листинге 2.3). Результаты расчёта сохраняются на диске. Во второй осуществляется процесс моделирования ЭМС управления ножницами с использованием интерполированных данных о положении звеньев механизма и рассчитанных на их основе скорости и ускорения остальных звеньев.

Модель двухкривошипных ножниц в пакете MATLAB приведена на рис. 2.5. Она включает в себя блок формирования задания Subsystem 2krA рис. 2.6, подмодели системы управления электроприводом Subsystem 2krB рис. 2.7 и механической части ножниц Subsystem 2krC рис. 2.8. Блок Subsystem 2krD рис. 2.9 осуществляет интерполяцию рассчитанных на первом этапе значений положений точек врезания ножа в лист, нижней точки ножа, угла резания и пр. Расчёт усилия резки осуществляется блоком Subsystem FA рис. 2.35, а расчёт моментов резки (переменные M_{ares} и M_{bres}) осуществляется блоком Subsystem 2krE рис. 2.10. Отображение переходных процессов и результатов моделирования производится блоком Subsystem 2krF, а расчёт энергозатрат за цикл резки — Subsystem 2krG.

Блок задания (Subsystem 2krA) выдаёт управляющие сигналы на контуры положения, скорости и момента обоим кривошипам. Блок системы управления (Subsystem 2krB) содержит в себе трёхконтурную систему регулирования с комбинированными связями по заданию, включающую регуляторы положения (РПа и РПб) и скоростей (РСа и РСб) кривошипов, а также настроенные контуры моментов (КМа и КМб). Блок (Subsystem 2krC) включает в себя блок Subsystem 2krI (рис. 2.11), осуществляющий расчёт скоростей кривошипов и моментов от неуравновешенных масс, а также возвращающий индексы в массивах данных, соответствующих углам поворота кривошипов. Подсистемы Subsystem 2krJ циклически округляют входной сигнал. Собственно расчёт осуществляется скриптом `Omega_s2kr` (листинг 2.7). Положение точек врезания ножа в лист, точек приложения силы реза, углов резания при движении ножа как к оси коромысла, так и обратно, а также нижней точки ножа осуществляется скриптом `C1cKn2kr` (листинг 2.11), вызываемым блоком «Matlab Function» в подсистеме Subsystem 2krD. Кроме того, подсистема Subsystem 2krD осуществляет расчёт скоростей движения точек врезания ножа (v_{A1} и v_{A2}). Блок Subsystem 1krG рассчитывает как энергозатраты каждого двигателя ножниц, так и суммарные затраты. Энергозатраты включают в себя механические и электрические потери.

Для двухкривошипной модели ножниц написан скрипт `Plot2kr`, приве-

дённый в листинге 2.12, осуществляющий отображение механизма резания

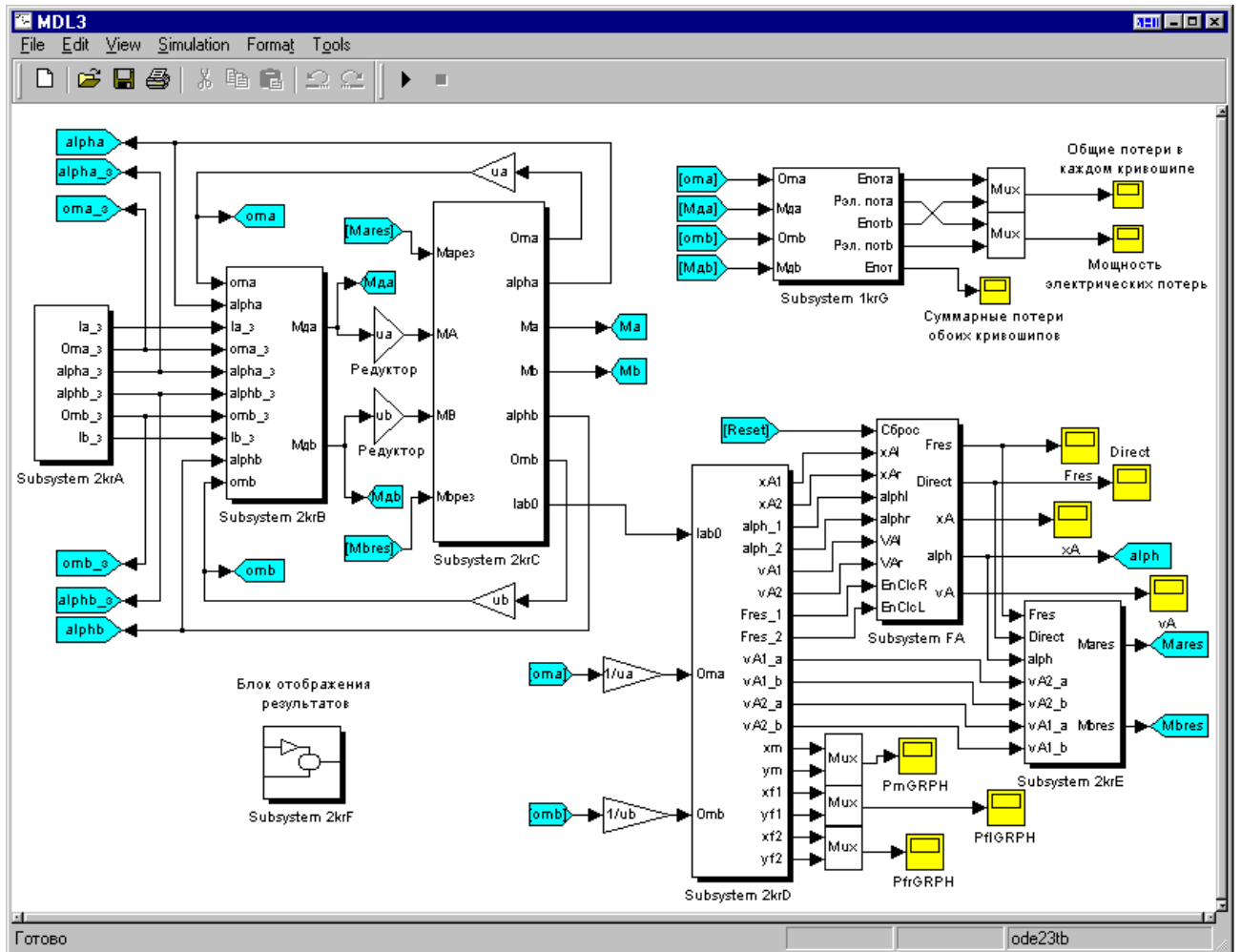


Рис. 2.5. Модель двухкровошипных ножниц поперечной резки.

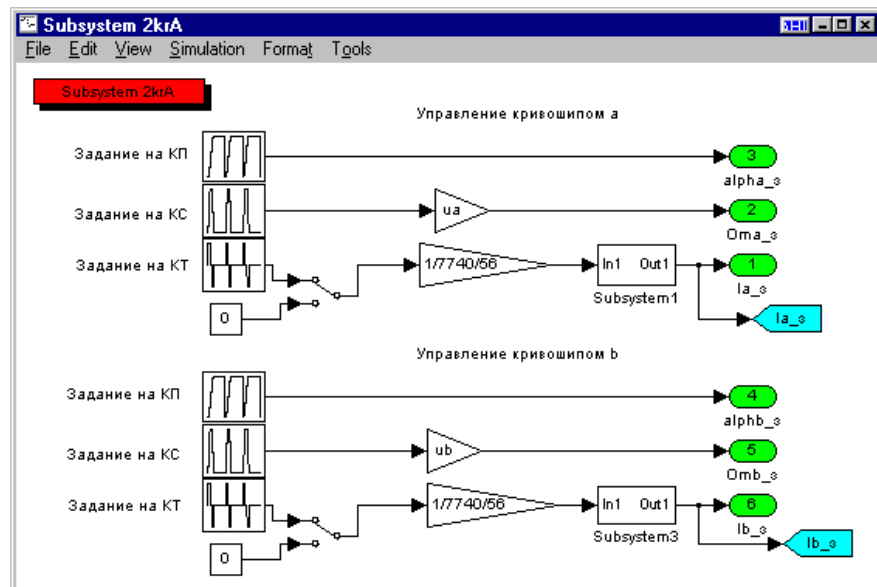


Рис. 2.6. Блок формирования задания.

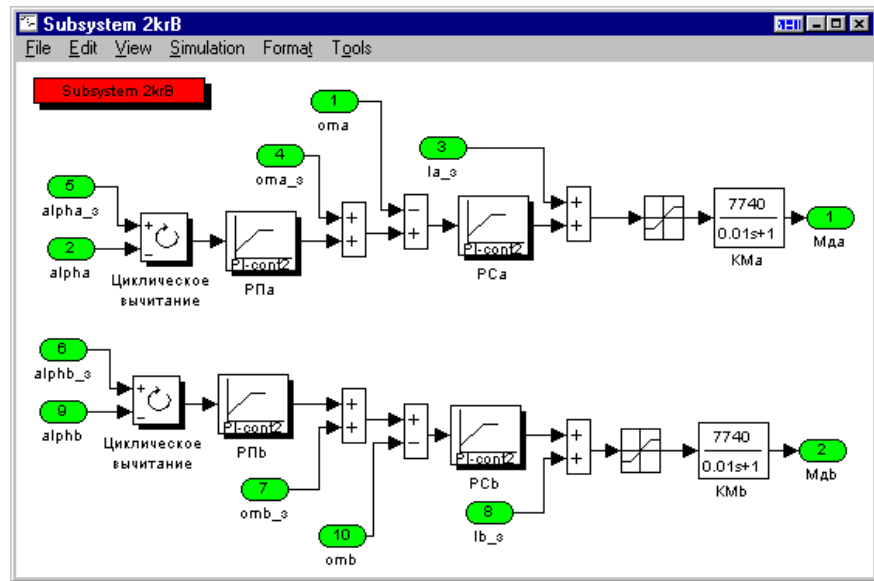


Рис. 2.7. Блок системы управления электроприводом.

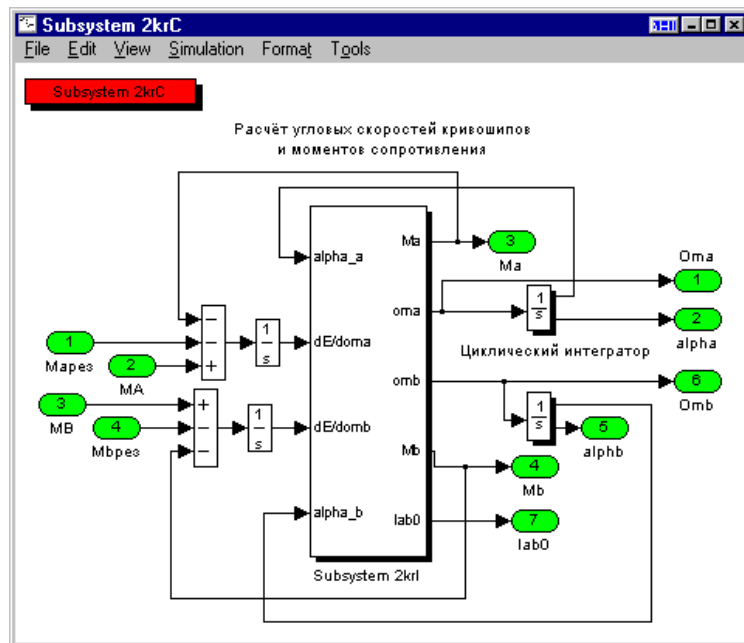


Рис. 2.8. Подмодель механической части ножниц.

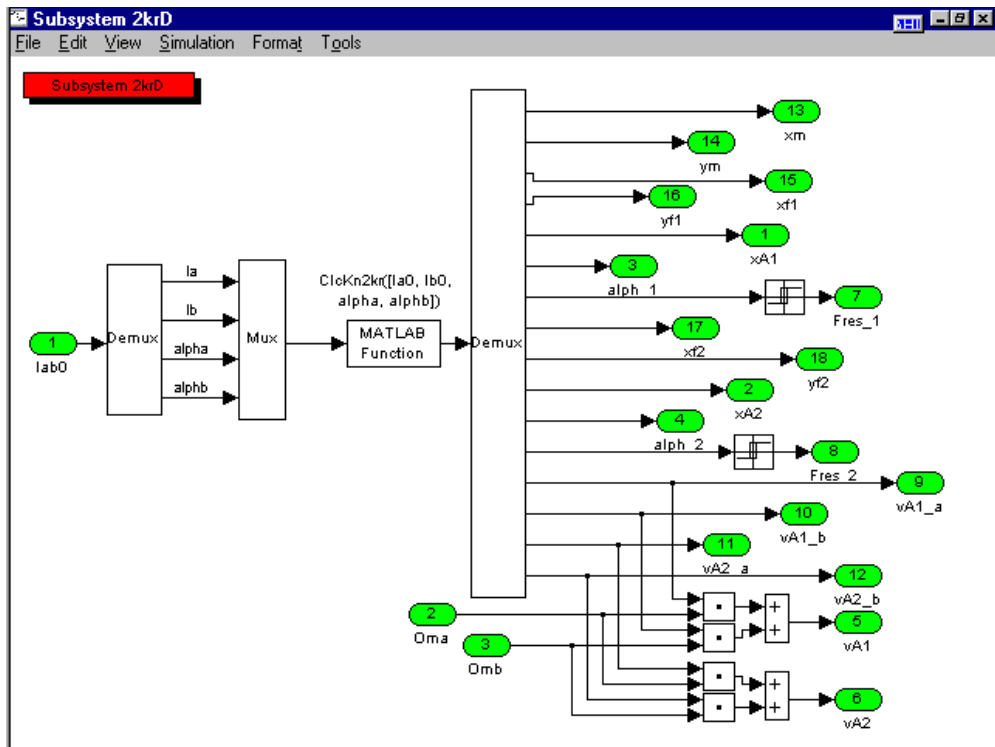


Рис. 2.9. Блок интерполяции основных данных ножа.

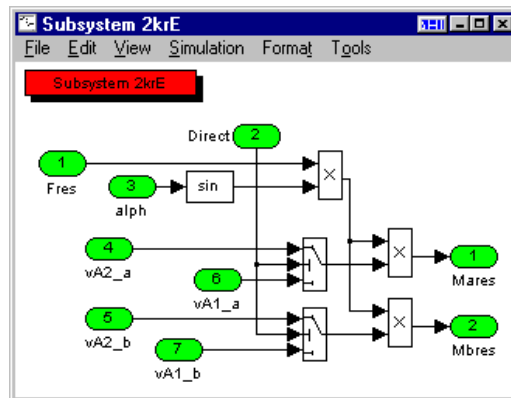


Рис. 2.10. Блок расчёта моментов резки.

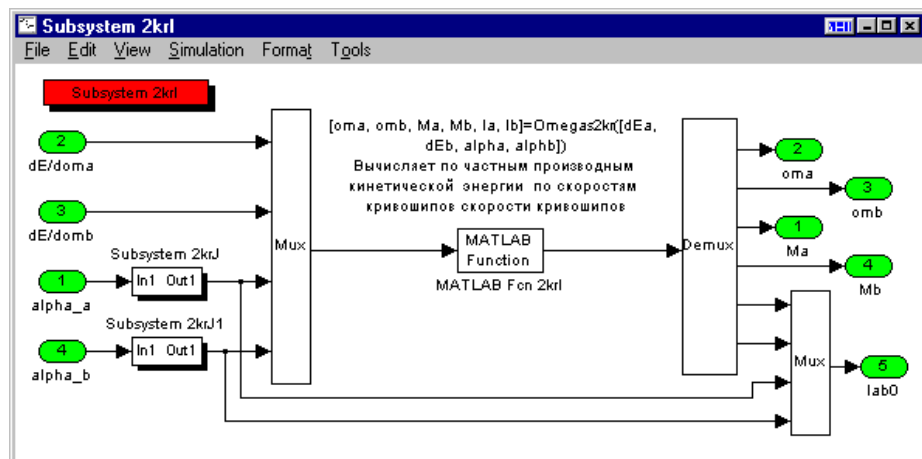


Рис. 2.11. Блок расчёта скоростей.

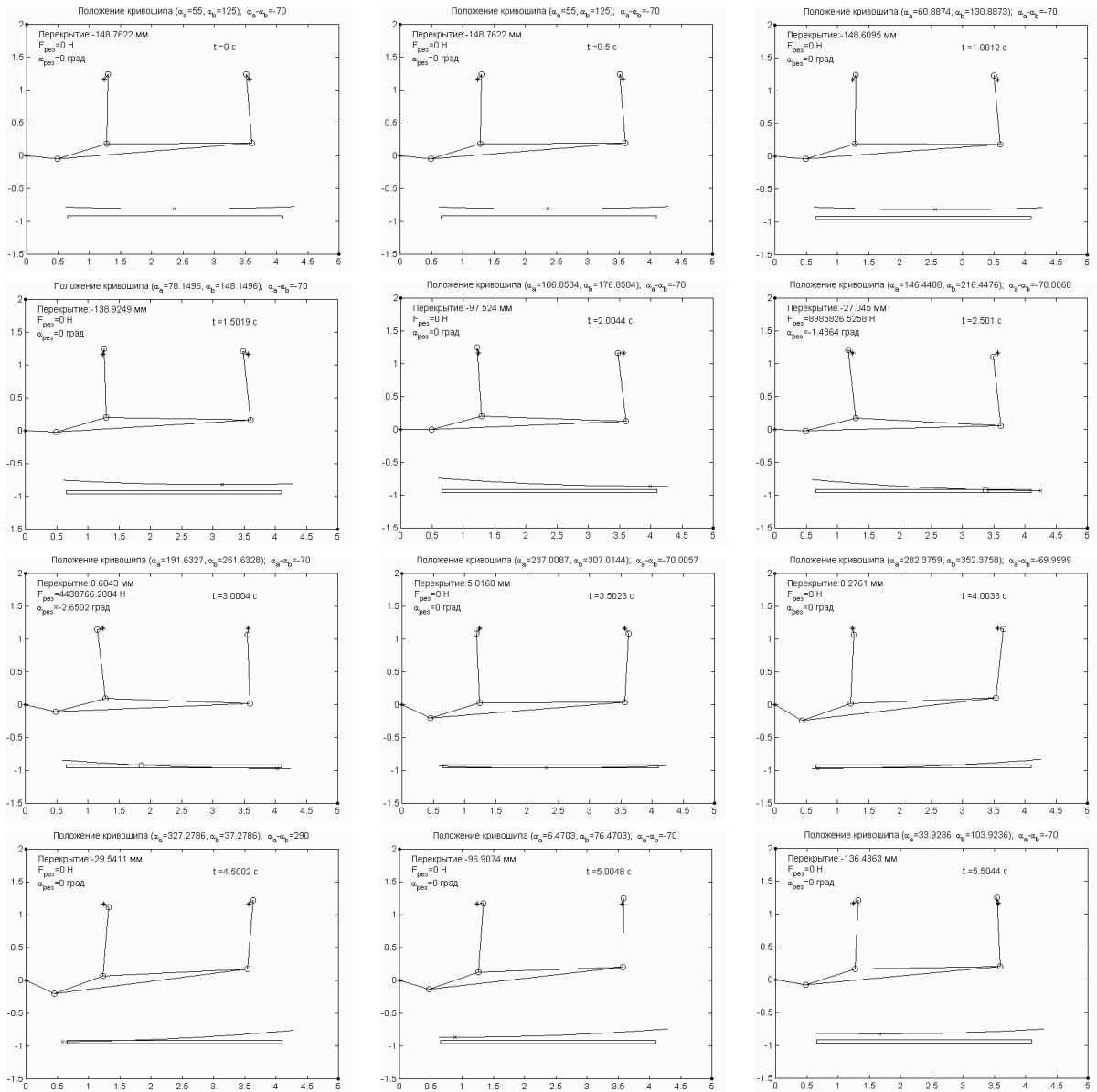


Рис. 2.12. Положения механизма резания двухкривошипных ножниц в некоторые моменты времени.

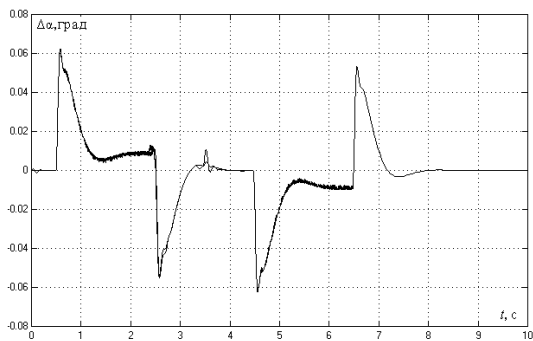


Рис. 2.13. Графики ошибок обработки заданий положений кривошипов.

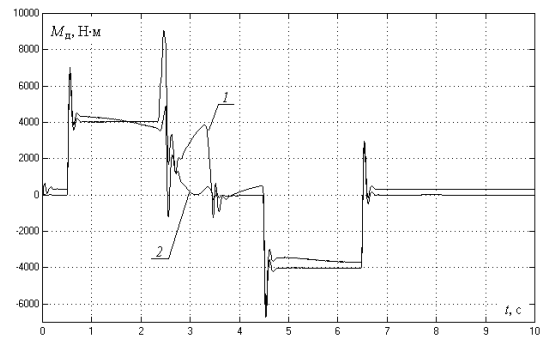


Рис. 2.14. Графики моментов двигателей *a*— 1 и *b*— 2.

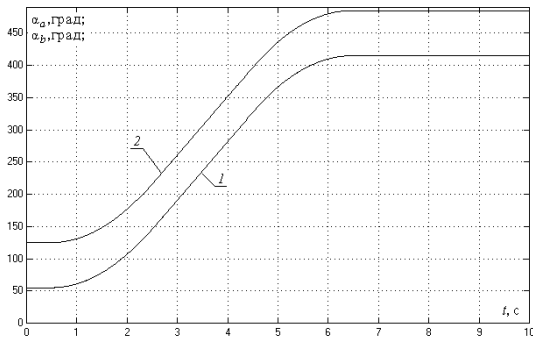


Рис. 2.15. Графики обработки заданий положений кривошипа a — 1 и b — 2.

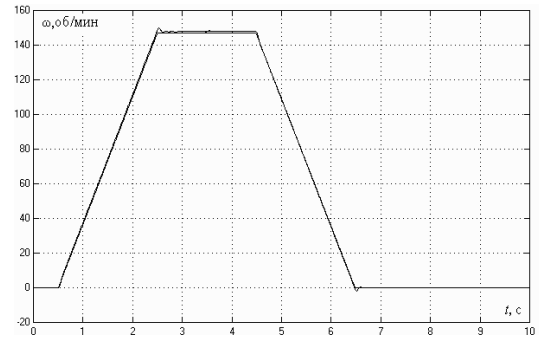


Рис. 2.16. Графики обработки заданий скорости.

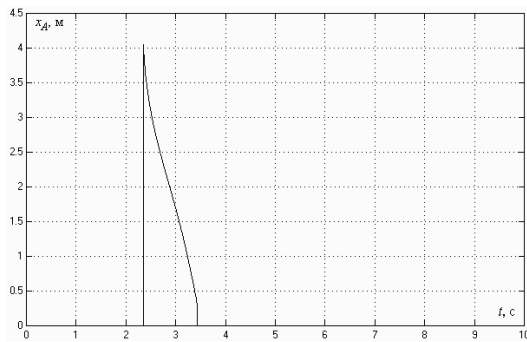


Рис. 2.17. График перемещения точки врезания x_A .

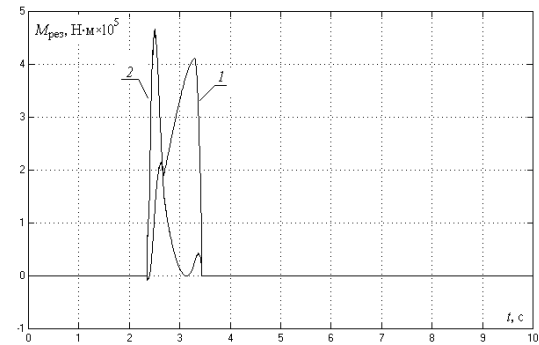


Рис. 2.18. Графики моментов реза a — 1 и b — 2.

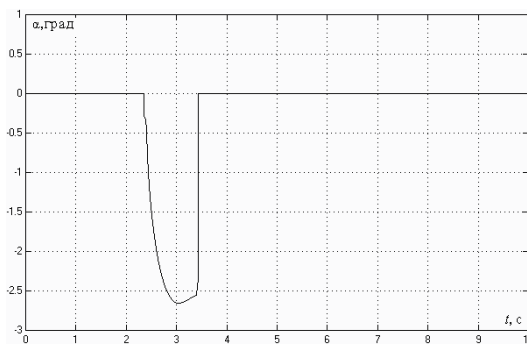


Рис. 2.19. График изменения угла реза α .

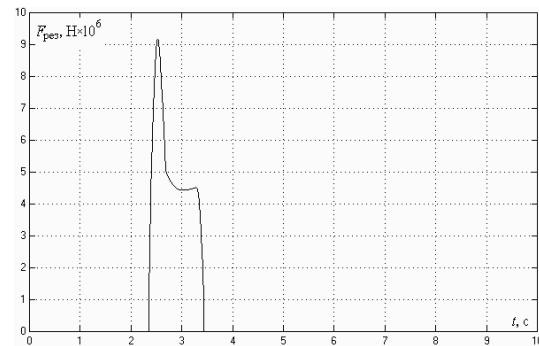


Рис. 2.20. График изменения силы реза $F_{\text{рез}}$.

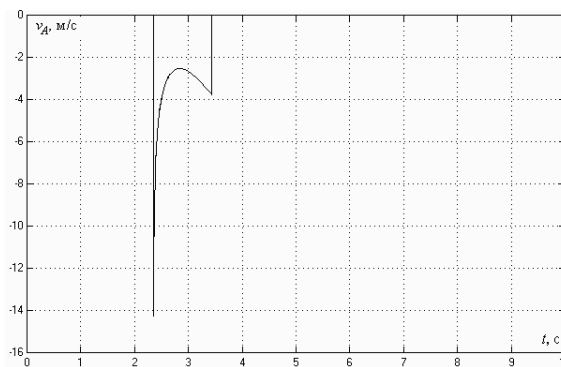


Рис. 2.21. График скорости точки врезания v_A .

в различные моменты времени. Данный скрипт использовался для отладки модели и алгоритмов оптимизации, а также для анализа их функционирования. На рис. 2.12 приведены положения механизма резания, которые он занимает за цикл резки проката. Из графиков видно, что собственно фаза резки проката имеет небольшую продолжительность по сравнению с ходом ножниц. Продолжительность контакта ножа с разрезаемым прокатом длится дольше, чем рез. Из этого следует, что в целях повышения производительности всего комплекса резки отводить отрезанный лист можно сразу после окончания фазы резки.

Графики отработки заданий положений и скоростей электроприводами кривошипов во время цикла резки при постоянном угле рассогласования между кривошипами приведены на рис. 2.15 и 2.16. Из графика рис. 2.13 видно, что максимальная динамическая ошибка отработки положения не превышает $0,07^\circ$. Из графиков моментов реза (рис. 2.18) следует, что в процессе резки нагрузка перераспределяется с кривошипа b на кривошип a . Причём, средняя загрузка двигателей моментом реза не одинакова. Из графика рис. 2.14 видно, что основную часть нагрузки двигателей за цикл резки составляют динамические моменты, а не моменты реза. Из-за малого угла реза α (рис. 2.19) в момент врезания (см. рис. 2.17) наблюдается значительный пик в усилии резки (рис. 2.20). Этим же объясняется большая скорость перемещения точки врезания v_A в момент врезания (рис. 2.21).

2.2. Математические модели электромеханической системы управления двухкривошипными ножницами с копиром

Динамика электропривода ЭМС двухкривошипных НКР с копиром мало отличается от рассмотренной ранее динамики двухкривошипных НКР с коромыслом и определяется особенностями механической части электропривода. Расчёты кинематики и динамики двухкривошипных ножниц с копиром аналогичны расчётам ножниц с коромыслом, и, поэтому, ниже основное внимание уделяется различиям между этими расчётами.

2.2.1. Планы положений и скоростей

Расчётная схема для плана положений двухкривошипных ножниц с копиром приведена на рис. 2.22. Если форма копира имеет вид окружности заданного радиуса, то расчёт планов положений и скоростей полностью совпадает с приведённым в разделе 2.1.1. Если копир имеет переменный радиус кривизны, то в расчёте имеется ряд отличий, рассмотренных ниже.

Для расчёта кинематики должна быть задана функция f_k , описывающая траекторию движения оси катка при его качении по поверхности копира

$$x_2(y_2) = f_k(y_2); \quad y_2 \in [y_{2\text{мин}}; y_{2\text{макс}}]. \quad (2.23)$$

Эту траекторию можно получить, откладывая радиусы катка от поверхности копира по нормали к ней. Кроме того, для расчёта в пакете MATLAB плана скоростей должна быть задана первая производная функции (2.23)

$$x'_2(y_2) = f'_k(y_2). \quad (2.24)$$

Для расчёта динамики должны быть заданы масса ползуна прижима суппорта к копиру m_p и усилие прижима в функции от положения ползуна $F_p = f_p(x_p)$. Для простоты выкладок полагаем, что $F_p(x_p)$ настолько велика, что ни при каких используемых на практике скоростях вращения кривошипов нож не будет отрываться от копира, что соответствует работе механизма в штатной ситуации.

Определим расстояние от точки (x_2, y_2) до точки (x_1, y_1)

$$\tilde{N} = \sqrt{(x_1 - x_2(y_2))^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

Угол наклона $\alpha_{\tilde{N}}$ линии \tilde{N} определим по формуле

$$\alpha_{\tilde{N}}(y_2) = \arcsin \frac{y_1 - y_2}{\tilde{N}(y_2)}.$$

Угол между линией \tilde{N} и звеном l_2 по теореме косинусов

$$\beta_{\tilde{N}} = \arccos \frac{\tilde{N}^2(y_2) + l_2^2 - l_1^2}{2l_2\tilde{N}(y_2)}.$$

Угол наклона звена l_2

$$\alpha_2 = \alpha_{\tilde{N}} - \beta_{\tilde{N}} = \arcsin \frac{y_1 - y_2}{\tilde{N}(y_2)} - \arccos \frac{\tilde{N}^2(y_2) + l_2^2 - l_1^2}{2l_2\tilde{N}(y_2)}. \quad (2.25)$$

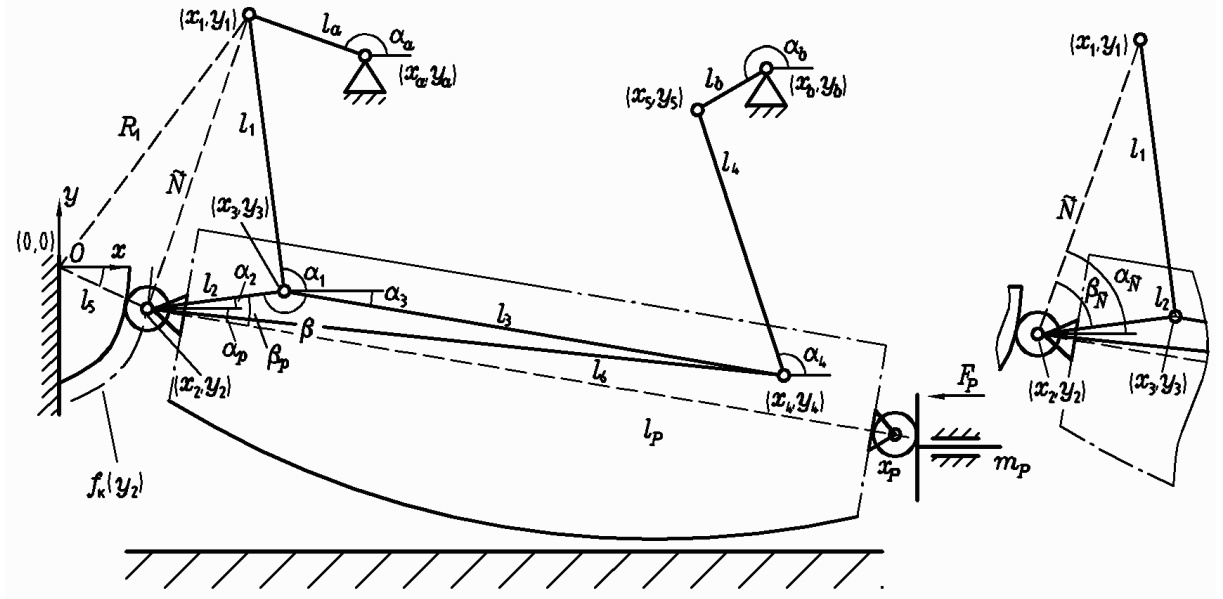


Рис. 2.22. Кинематическая схема ножниц.

Угол наклона звена l_3

$$\alpha_3(y_2) = \alpha_2(y_2) + \beta - 180^\circ. \quad (2.26)$$

В приведённых выше уравнениях неизвестной величиной является координата y_2 точки 2 (оси катка). Для её определения можно воспользоваться уравнением связи

$$l_4^2 = (x_2(y_2) + l_2 \cos \alpha_2(y_2) + l_3 \cos \alpha_3 - x_5)^2 + (y_2 + l_2 \sin \alpha_2(y_2) + l_3 \sin \alpha_3 - y_5)^2, \quad (2.27)$$

которое должно решаться совместно с уравнениями (2.25) и (2.26).

Аналогично описанному выше для двухкривошипных ножниц с коромыслом определим область значений величины y_2 , в которой может находиться решение (2.27). Во-первых, расстояние между точками (x_2, y_2) и (x_1, y_1) не может превышать расстояния $l_1 + l_2$. Если пренебречь связью, накладываемой звеном 4, то по мере движения точки (x_2, y_2) вниз точка 4 будет подниматься вверх. Поэтому, при слишком малом значении y_2 можно получить решение, при котором звенья расположатся аналогично рис. 1004.2, а, что в реальности наблюдаться не может. Следовательно, решение (2.27) нужно искать в области

$$\max(y_{2\text{мин}}, y_2^*, y_2^{**}) \leq y_2 \leq y_{2\text{макс}}, \quad (2.28)$$

где y_2^* — корень уравнения

$$(x_1 - x_2(y_2^*))^2 + (y_1 - y_2^*)^2 = (l_1 + l_2)^2, \quad (2.29)$$

а y_2^{**} — точка минимума функции

$$f(y_2) = (x_2(y_2) + l_2 \cos \alpha_2(y_2) + l_3 \cos \alpha_3 - x_5)^2 + (y_2 + l_2 \sin \alpha_2(y_2) + l_3 \sin \alpha_3 - y_5)^2. \quad (2.30)$$

Уравнение (2.30) может иметь два корня, выбирать в качестве y_2^* в таком случае следует наименьший.

Координаты точки (x_3, y_3) определяются выражениями

$$x_3 = x_2 + l_2 \cos \alpha_2; \quad y_3 = y_2 + l_2 \sin \alpha_2. \quad (2.31)$$

Угол α_1 вычисляется по формуле

$$\alpha_1 = \arccos \frac{x_1 - x_3}{l_1}. \quad (2.32)$$

Угол α_4 может быть определён по формуле

$$\alpha_4 = \arccos \frac{x_5 - x_4}{l_4}. \quad (2.33)$$

Координаты точки (x_4, y_4)

$$x_4 = x_3 + l_3 \cos \alpha_3; \quad y_4 = y_3 + l_3 \sin \alpha_3. \quad (2.34)$$

Угол α_6 может быть определён по формуле

$$\alpha_6 = \arccos \frac{l_2 \cdot \cos \alpha_2 + l_3 \cdot \cos \alpha_3}{l_6}, \quad (2.35)$$

где

$$l_6 = \sqrt{l_2^2 + l_3^2 - 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos \beta}.$$

Угол наклона α_P линии l_P и положение точки P определим по формулам

$$\alpha_P = \alpha_2 - \beta_P; \quad x_P = x_2 + l_P \cos \alpha_P; \quad y_P = y_2 + l_P \sin \alpha_P. \quad (2.36)$$

Расчёт мгновенных скоростей для двухкривошипных ножниц с копиром в целом совпадает с расчётом для ножниц с коромыслом, но имеются некоторые особенности. Скорость \vec{v}_5 точки (x_2, y_2) определяется по формуле

$$\vec{v}_5 = (v_{5y} \cdot f'_k(y_2), v_{5y}), \quad (2.37)$$

где v_{5y} — проекция скорости v_5 на ось Oy ; $f'_k(y_2)$ — производная функции $f_k(y_2)$, описывающая форму копира по координате y . Поэтому, вместо системы (2.38) надо решать систему

$$\begin{pmatrix} l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_2 \sin(\alpha_3 - \beta) & 0 & -f'_k(y_2) \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_2 \cos(\alpha_3 - \beta) & 0 & -1 \\ l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_3 \sin \alpha_3 & -l_4 \sin(\alpha_4 + \pi) & 0 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_3 \cos \alpha_3 & -l_4 \cos(\alpha_4 + \pi) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_{23} \\ \omega_4 \\ v_{5y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ -l_a \omega_a \cos \alpha_a \\ l_b \omega_b \sin \alpha_b - l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ l_b \omega_b \cos \alpha_b - l_a \omega_a \cos \alpha_a \end{pmatrix}. \quad (2.38)$$

Расчёт скорости перемещения точки x_P можно выполнить по формуле

$$v_P = v_{5x} - l_P \omega_{23} \sin \alpha_P. \quad (2.39)$$

2.2.2. Расчёт динамики электромеханической системы двухкривошипных ножниц

Расчёт динамики двухкривошипных ножниц с копиром, по сравнению с расчётом ножниц с коромыслом имеет следующие особенности. В расчёте вместо звена 5 нужно учитывать привод прижима суппорта к копиру. Производные $\frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_i}$ определяются не только силой резания, но и силой прижима к копиру $F_P(x_P, v_P)$

$$\frac{\partial E_{\text{к}}}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial (E_{\text{рез}} + E_{\text{п}} + E_P)}{\partial \alpha_i}, \quad (2.40)$$

где

$$\frac{\partial E_P}{\partial \alpha_i} \approx -F_P(x_P, v_P) \frac{v_P(\alpha_a, \alpha_b, \omega_i)}{\omega_i} = -F_P(x_P, v_P) \frac{v_P(\alpha_a, \alpha_b, 1)}{\omega_i}.$$

Расчёт моментов сил $\frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial \alpha_i}$ от неуравновешенных масс практически совпадает с ранее приведённым для двухкривошипных ножниц с коромыслом с той лишь разницей, что не учитывается коромысло 5.

2.3. Математические модели электромеханической системы управления однокривошипными ножницами

2.3.1. Планы положений и скоростей

Для выполнения кинематического и динамического расчёта должны быть заданы следующие параметры механизма [23]: длины звеньев l_a , l_2 и l_5 ; координаты (x_a, y_a) точки крепления шарнира a ; положение центра масс суппорта 23, задаваемое относительно звена l_2 величинами l'_{23} и α'_{23} , а также его момент инерции J_{23} относительно центра масс и сама его масса m_{23} ; моменты инерции J_a и J_5 кривошипа a и коромысла 5 относительно их осей вращения, а также их массы m_a и m_5 и положения центров масс l'_a , α'_a и l'_5 , α'_5 ; угол поворота α_a кривошипа a и его угловая скорость ω_a .

Расчётная схема плана положений приведена на рис. 2.23. Чтобы выкладки имели единообразный вид, на ней, по возможности, использованы те же обозначения, что и на рассмотренных ранее двухкривошипных схемах. При расчёте положений звеньев механизма искомыми переменными являются углы по-

воротов α_2 и α_5 звеньев 2 и 5; координаты (x_2, y_2) и (x_3, y_3) точек (шарниров)

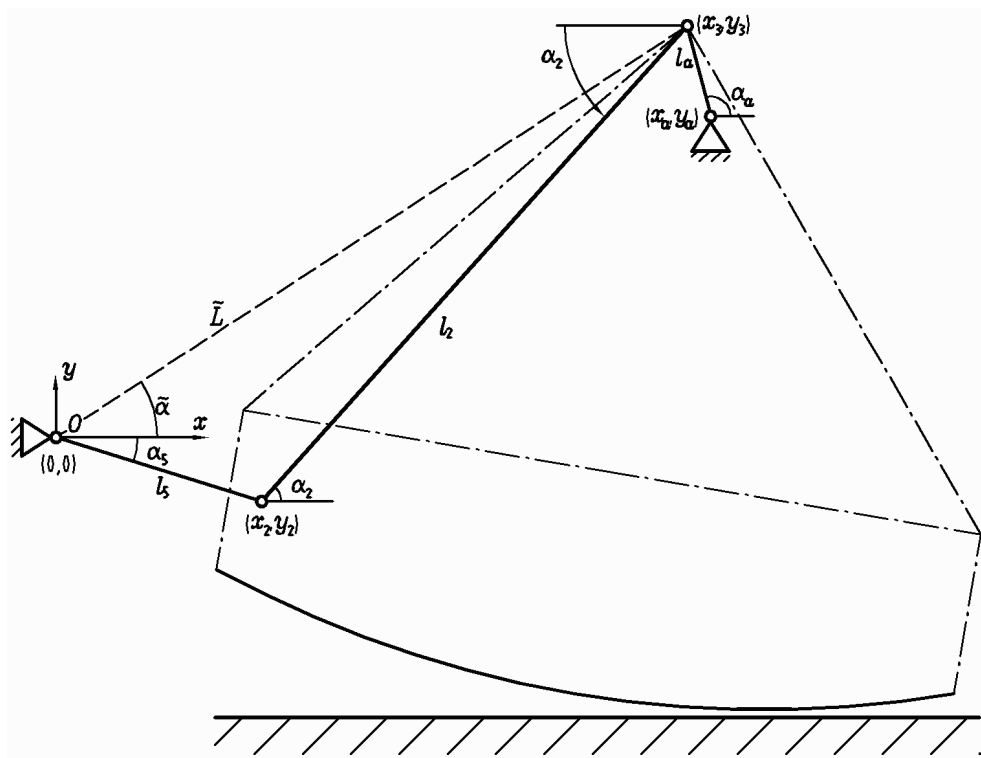


Рис. 2.23. Кинематическая схема ножниц.

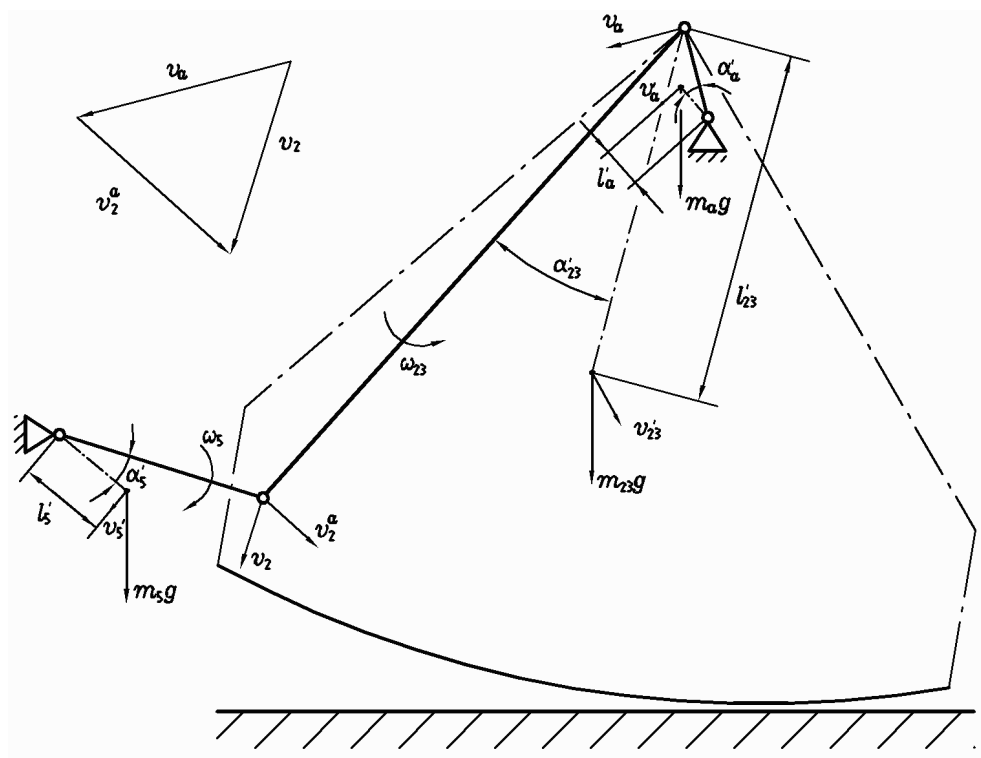


Рис. 2.24. План скоростей.

2 и 3; векторы звеньев \vec{l}_2 и \vec{l}_5 . Введём систему координат xOy . Начало координат выберем в точке O , в которой закреплено коромысло 5.

Положение точки (x_3, y_3) задаётся углом поворота кривошипа

$$x_3 = x_a + l_a \cos \alpha_a; \quad y_3 = y_a + l_a \sin \alpha_a.$$

Длина и угол наклона радиус-вектора \tilde{L} точки 3

$$\tilde{L} = \sqrt{x_3^2 + y_3^2}; \quad \tilde{\alpha} = \operatorname{arctg} \frac{y_3}{x_3}.$$

Угол поворота α_5 звена 5 определим по теореме косинусов

$$l_2^2 = \tilde{L}^2 + l_5^2 - 2\tilde{L}l_5 \cos(\tilde{\alpha} - \alpha_5),$$

откуда находим

$$\alpha_5 = \tilde{\alpha} - \arccos \frac{\tilde{L}^2 + l_5^2 - l_2^2}{2\tilde{L}l_5}.$$

Найдём координаты точки (x_2, y_2) шарнира 2

$$x_2 = l_5 \cos \alpha_5; \quad y_2 = l_5 \sin \alpha_5.$$

Угол наклона звена 3 определяется выражением

$$\alpha_2 = \arccos \frac{x_3 - x_2}{l_2}.$$

Расчётная схема для плана скоростей приведена на рис. 2.24. В результате расчёта плана скоростей должны быть получены значения линейных скоростей v_2 шарнира 2 (подвижного конца коромысла 5) и v_a шарнира 3 конца кривошипа a , а также угловые скорости ω_{23} ножа (звена 2) и ω_5 коромысла (звена 5).

Скорость шарнира 3

$$v_a = (-l_a \omega_a \sin \alpha_a; l_a \omega_a \cos \alpha_a).$$

Угловые скорости звеньев 2 и 5 найдём из плана скоростей

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_a + \vec{v}_2^a.$$

Абсолютная скорость v_2 шарнира 2 определяется выражением

$$v_2 = \vec{\omega}_5 \times \vec{l}_5,$$

а относительная

$$\vec{v}_2^a = \vec{\omega}_{23} \times \vec{l}_2.$$

Составим систему уравнений

$$\begin{cases} -\omega_5 l_5 \sin \alpha_5 = -l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_2 \omega_{23} \sin(\alpha_2 + 180^\circ), \\ \omega_5 l_5 \cos \alpha_5 = l_a \omega_a \cos \alpha_a + l_2 \omega_{23} \cos(\alpha_2 + 180^\circ), \end{cases}$$

и, упростив до

$$\begin{cases} \omega_5 l_5 \sin \alpha_5 = l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_2 \omega_{23} \sin \alpha_2, \\ \omega_5 l_5 \cos \alpha_5 = l_a \omega_a \cos \alpha_a - l_2 \omega_{23} \cos \alpha_2, \end{cases}$$

решим её.

Выразим скорость вращения коромысла ω_5 через остальные величины, используя первое уравнение

$$\omega_5 = \frac{l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_2 \omega_{23} \sin \alpha_2}{l_5 \sin \alpha_5},$$

и подставим во второе

$$l_5 \cos \alpha_5 \frac{l_a \omega_a \sin \alpha_a}{l_5 \sin \alpha_5} - l_5 \cos \alpha_5 \frac{l_2 \omega_{23} \sin \alpha_2}{l_5 \sin \alpha_5} = l_a \omega_a \cos \alpha_a - l_2 \omega_{23} \cos \alpha_2;$$

$$\omega_a l_a \sin \alpha_a \operatorname{ctg} \alpha_5 - \omega_{23} l_2 (\sin \alpha_2 \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_2).$$

Откуда находим скорость вращения суппорта ω_{23}

$$\omega_{23} = \frac{\omega_a l_a (\sin \alpha_a \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_a)}{l_2 (\sin \alpha_2 \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_2)},$$

и относительную скорость шарнира 2

$$\vec{v}_2^a = (-\omega_{23} l_2 \sin(180^\circ + \alpha_2); \omega_{23} l_2 \cos(180^\circ + \alpha_2)).$$

2.3.2. Расчёт динамики электромеханической системы однокривошипных ножниц

Электропривод однокривошипных ножниц (а также двухкривошипных НКР с механической синхронизацией кривошипов) осуществляется, как правило, от двух двигателей с индивидуальными преобразователями. Применение такого технического решения обусловлено тем, что суммарный момент инерции роторов двух двигателей меньше, чем момент инерции одного двигателя соответствующей мощности. Это обеспечивает снижение суммарного динамического

момента при пусках и торможениях привода ножниц и тем самым обуславливает снижение суммарных токов и энергозатрат. Преобразователи ножниц включаются по схеме «ведущий–ведомый» рис. 2.25. Ведущий преобразователь выполняет функцию регулирования скорости привода и выдаёт задание на регулятор момента ведомого преобразователя. Регулятор скорости ведомого преобразователя отключён. Двигатели механически связаны друг с другом через двухпоточный редуктор рядом зубчатых передач. При выборе частоты среза регулятора скорости меньше одной десятой от минимальной частоты упругих колебаний привода упругими свойствами зубчатых передач и промежуточных валов редуктора можно пренебречь. Это позволяет упростить исследуемую систему управления, заменив два контура момента одним эквивалентным контуром.

Математическое описание системы ПЧ–АД электропривода однокривошипных ножниц аналогично приведённому в разделе 2.1.2. Для расчёта динамики привода однокривошипных ножниц необходимо определить приведённый момент инерции механизма резания, определить соотношение между силой реза и моментом на валу кривошипа, а также определить функциональную зависимость крутящего момента, вызванного неуравновешенными массами, от положения эксцентрикового вала.

Расчёт скоростей центров масс и приведённого момента инерции. Найдём приведённый к валу двигателя момент инерции, исходя из равенства кинетических энергий исходной и приведённой систем

$$\frac{J_{\text{пр}}\omega_a^2}{2} = \frac{J_5\omega_5^2}{2} + \frac{J_a\omega_a^2}{2} + \frac{J_{23}\omega_{23}^2}{2} + \frac{m_{23}(v'_{23})^2}{2}, \quad (2.41)$$

где v'_{23} — скорость центра масс суппорта с ножом. Скорость центра масс v'_{23} складывается из переносной скорости v_a шарнира 3 и относительной $v'_{23}{}^a$ шарнира 2 относительно точки 3

$$\vec{v}'_{23} = \vec{v}'_{23}{}^a + \vec{v}_a,$$

где

$$\vec{v}'_{23}{}^a = \left(-\omega_{23}l'_{23} \sin(180^\circ + \alpha_2 + \alpha'_{23}); \omega_{23}l'_{23} \cos(180^\circ + \alpha_2 + \alpha'_{23}) \right),$$

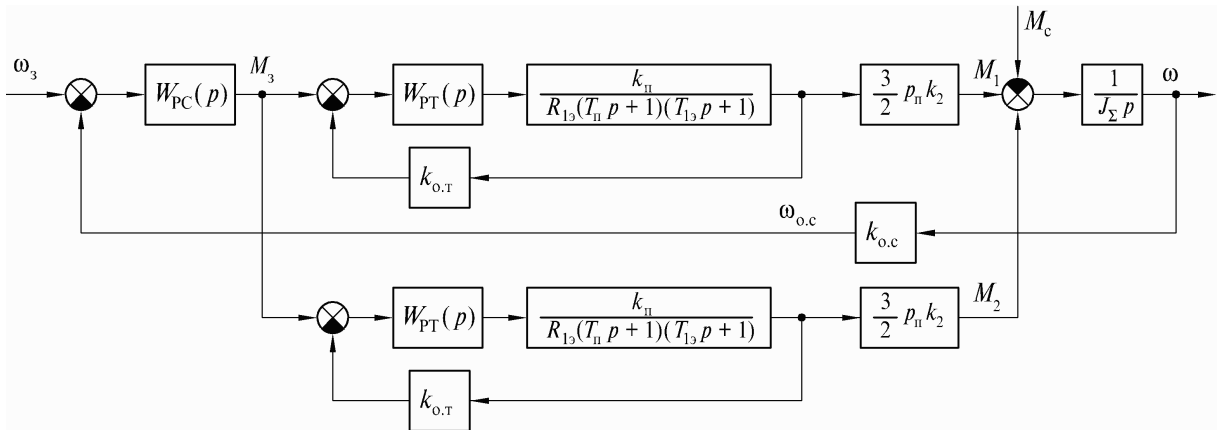


Рис. 2.25. Структурная схема электропривода однокривошипных ножниц.

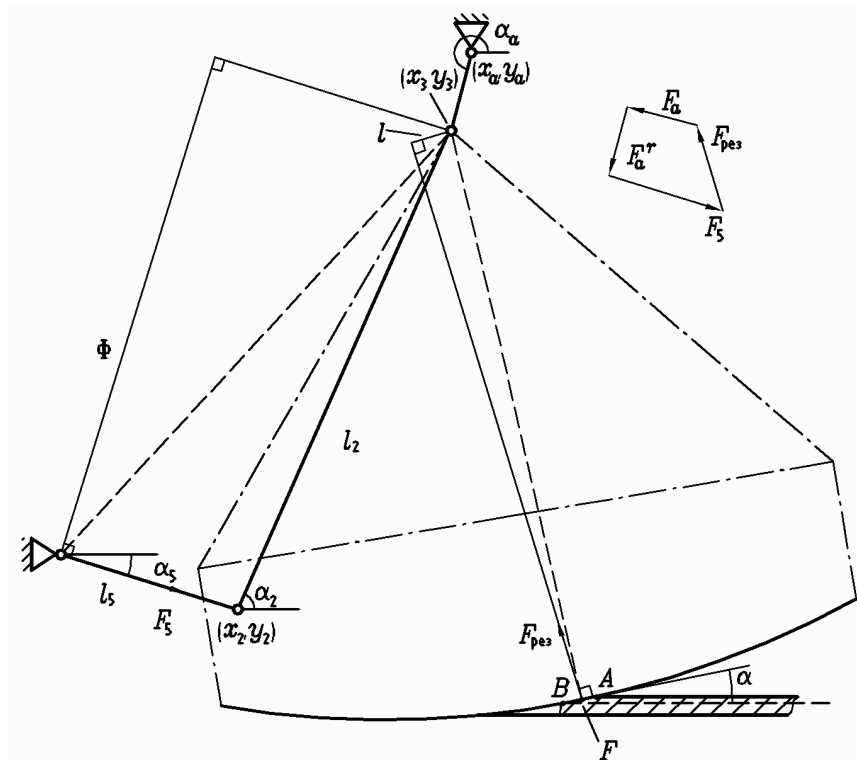


Рис. 2.26. Однокривошипные ножницы. Силовой расчёт.

или

$$\vec{v}'_a = \left(\omega_{23} l'_{23} \sin(\alpha_2 + \alpha'_{23}); -\omega_{23} l'_{23} \cos(\alpha_2 + \alpha'_{23}) \right).$$

Из (2.41) находим

$$J_{\text{пр}} = J_5 \left(\frac{\omega_5}{\omega_a} \right)^2 + J_a + J_{23} \left(\frac{\omega_{23}}{\omega_a} \right)^2 + m_{23} \left(\frac{v'_{23}}{\omega_a} \right)^2. \quad (2.42)$$

Механизм совершает сложные движения, и в общем случае его момент инерции будет переменным и зависеть от угла поворота кривошипа. Определим динамический момент $M_{\text{д}}$ на валу кривошипа из равенства мощностей

$$M_{\text{д}} \frac{d\alpha_a}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{J_{\text{пр}} \omega_a^2}{2} \right) = \frac{\omega_a^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\text{пр}}}{dt} + \frac{J_{\text{пр}} 2\omega_a d\omega_a}{2dt},$$

или, сокращая на $\omega_a = d\alpha_a/dt$,

$$M_{\text{д}} = \frac{\omega_a}{2} \cdot \frac{dJ_{\text{пр}}}{dt} + \frac{J_{\text{пр}} d\omega_a}{dt}.$$

Принимая во внимание, что

$$\frac{dJ_{\text{пр}}}{dt} = \frac{dJ_{\text{пр}}}{d\alpha_a} \cdot \frac{d\alpha_a}{dt},$$

получим

$$M_{\text{д}} = \frac{\omega_a^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\text{пр}}}{d\alpha_a} + J_{\text{пр}} \varepsilon_a.$$

Поскольку аналитические выкладки для отыскания $dJ_{\text{пр}}/d\alpha_a$ трудоёмки, определять эту величину будем приближенно по формуле

$$\frac{dJ_{\text{пр}}}{d\alpha_a} \approx \frac{\Delta J_{\text{пр}}}{\Delta \alpha_a} = \frac{J_{\text{пр}}(\alpha_a + \Delta \alpha_a) - J_{\text{пр}}(\alpha_a)}{\Delta \alpha_a},$$

где $\Delta \alpha_a$ — некоторая малая постоянная величина.

Силовой расчёт. Определим создаваемый силой реза $F_{\text{рез}}$ крутящий момент $M_{\text{рез}}$ на кривошипном валу a в соответствии с расчётной схемой, изображённой на рис. 2.26. Перед выполнением силового расчёта нужно определить точку (x_F, y_F) приложения силы реза $F_{\text{рез}}$, саму $F_{\text{рез}}$ и угол реза α по приведённой ранее методике.

Запишем условия равновесия суппорта верхнего ножа

$$\sum F_{X_i} = 0; \quad \sum F_{Y_i} = 0; \quad \sum M_i = 0,$$

где $\sum F_{x_i}$, $\sum F_{y_i}$ — проекции на оси x и y сил, действующих на суппорт; $\sum M_i$ — сумма моментов сил относительно точки (x_3, y_3) .

На суппорт действуют следующие силы: сила реакции коромысла F_5 с плечом Φ относительно точки (x_3, y_3) ; усилие резания $F_{\text{рез}}$ с плечом l относительно точки (x_3, y_3) ; сила от крутящего момента на кривошипном валу F_a , момент которой относительно точки (x_3, y_3) равен нулю, т. к. линия действия этой силы проходит через неё; сила реакции F_a^r эксцентрикового вала a , момент которой относительно точки (x_3, y_3) также равен нулю.

Определим моменты $\mu_{\text{рез}}$ и μ_5 , создаваемые единичными силами $\frac{F_{\text{рез}}}{|F_{\text{рез}}|}$ и $\frac{F_5}{|F_5|}$ соответственно, относительно шарнира 3

$$\mu_{\text{рез}} = (-\sin \alpha, \cos \alpha) \times (x_F - x_3, y_F - y_3);$$

$$\mu_5 = (\cos \alpha_5, \sin \alpha_5) \times \vec{l}_2,$$

где α — угол реза; x_F, y_F — координаты точки приложения силы реза.

Из уравнения моментов определим усилие F_5 на коромысле

$$F_5 = -F_{\text{рез}} \cdot \frac{\mu_{\text{рез}}}{\mu_5}.$$

Силу реакции эксцентрикового вала и силу крутящего момента определим из векторного уравнения

$$\vec{F}_a^r + \vec{F}_a + \vec{F}_5 + \vec{F}_{\text{рез}} = 0,$$

или

$$\vec{F}_a^r + \vec{F}_a = -\vec{F}_5 - \vec{F}_{\text{рез}}.$$

В проекциях на оси xOy это векторное уравнение примет вид

$$\begin{cases} F_a^r \cos \alpha_a - F_a \sin \alpha_a = -F_5 \cos \alpha_5 + F_{\text{рез}} \sin \alpha, \\ F_a^r \sin \alpha_a + F_a \cos \alpha_a = -F_5 \sin \alpha_5 - F_{\text{рез}} \cos \alpha. \end{cases}$$

В матричной форме уравнение примет вид

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_a & -\sin \alpha_a \\ \sin \alpha_a & \cos \alpha_a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_a^r \\ F_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -F_5 \cos \alpha_5 + F_{\text{рез}} \sin \alpha \\ -F_5 \sin \alpha_5 - F_{\text{рез}} \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

Разрешив данное уравнение относительно F_a и F_a^r , определим приведённый момент силы резания по формуле $M_{\text{рез}} = F_a \cdot l_a$.

Учёт крутящего момента от неуравновешенных масс. При повороте кривошипа a на угол $\Delta\alpha_a$ центры масс звеньев перемещаются на $\Delta\vec{r}_i$. При этом потенциальная энергия i -го звена ($i \in \{a, 23, 5\}$) возрастает на величину

$$dE_i = m_i g \Delta r_{iy},$$

где Δr_{iy} — проекция перемещения $\Delta\vec{r}_i$ на ось Oy ; m_i — масса i -го звена. Мощность привода, расходуемая на увеличение потенциальной энергии, составит

$$P_{\Pi}(t) = \frac{dE_{\Pi}}{dt} = \sum_i m_i g \frac{dr_{iy}}{dt} = \sum_i \frac{m_i g v'_{iy}}{dt},$$

где v'_{iy} — проекция скорости центра масс i -го звена на ось Oy .

С другой стороны, эта мощность равна $P_{\Pi}(t) = M_{\Pi} \omega_a$, где M_{Π} — часть момента сопротивления, учитывающая момент от неуравновешенных масс. Отсюда находим

$$\omega_a M_{\Pi} = \frac{dE_{\Pi}}{dt} = g \sum m_i v'_{iy},$$

или

$$M_{\Pi} = g \sum_i m_i \frac{v'_{iy}}{\omega_a}. \quad (2.43)$$

Скорости v'_{iy} можно определить по формулам

$$v'_{ay} = \omega_a l'_a \cdot \cos(\alpha_a + \alpha'_{23}); \quad (2.44)$$

$$v'_{5y} = \omega_5 l'_5 \cdot \cos(\alpha_5 + \alpha'_5); \quad (2.45)$$

$$v'_{23y} = v_{ay} - \omega_{23} l'_{23} \cdot \cos(\alpha_2 + \alpha'_{23}). \quad (2.46)$$

Поскольку при фиксированном α_a скорости \vec{v}'_i прямо пропорциональны ω_a , то отношения $\frac{v'_{iy}}{\omega_a}$ не зависят от ω_a и могут быть определены для какой-либо одной заданной скорости ω_a , например, $\omega_a = 1$ рад/с, и тогда выражение (2.43) примет вид

$$M_{\Pi} = g \sum_i m_i v'_{iy*}, \quad (2.43^*)$$

где v'_{iy*} — проекция скорости центра масс i -го звена на ось Oy при $\omega_a = 1$ рад/с.

2.3.3. Компьютерная модель электромеханической системы однокривошипных ножниц в пакете MATLAB

Моделирование проводится в два этапа [20, 25]. На первом этапе осуществляется расчёт положений всех звеньев механизма и их центров масс, статических моментов, моментов инерции и т. д. для заданного ряда значений независимых переменных (в нашем случае единственной независимой переменной является α_a). На втором этапе, моделируется электромеханическая система управления, при этом используются интерполированные данные механической части, полученные на первом этапе.

Процесс моделирования выполняется в следующей последовательности. Запускается скрипт `IniClacs1kr`, который содержит следующие данные, необходимые для расчёта: длины звеньев, положения центров масс звеньев, их массы и моменты инерции, и др. Для выполнения операции векторного умножения, используемого в `Calc1kr`, была разработана функция `MultyV` (листинг 1.4).

На первом этапе загружается сценарий `Inicalcs1kr` (см. листинг 2.13), объявляющий глобальными рабочие переменные и вызывающий скрипты `inicom` и `KinData1kr`. В первом (листинг 1.6) объявляются глобальными переменные, связанные с ножом и листом, а также устанавливаются константы механических свойств листа. Во втором описаны кинематические и динамические параметры механизма резания, данные о моментах инерциях и массах отдельных элементов и т. д. (листинг 2.14). Затем вызывается функция `Calc1kr` (см. листинг 2.15), осуществляющая расчёт для разных положений кривошипа l_a приведённого момента инерции, момента от неуравновешенных масс, положений ножа, отношения $M_{\text{рез}}$ к $F_{\text{рез}}$ и пр.

Для расчёта данных, связанных с ножом, функция `Calc1kr` вызывает функцию `GetPosKnife` (листинг 1.7).

Поскольку на первом этапе неизвестно, в каком направлении будет моделироваться рез, функция `GetPosKnife` для каждого значения α_a рассчитывает положения точек врезания A и приложения силы реза F как при резе к оси водила, так и при резе в противоположном направлении. Функции, задающие

форму режущей кромки ножа и её производную, описаны в файлах `fkknife` и `dfknife` (листинги 1.8 и 1.9).

Полученные на первом этапе данные могут сохраняться при необходимости на диске с помощью команды «`save`». На рис. 2.27 приведены графики момента инерции и производной момента инерции по углу поворота кривошипа. На рис. 2.28 приведен график статического момента, вызванного наличием неуравновешенных масс, в функции от угла поворота кривошипа. Из графиков видно, что указанные величины изменяются в больших пределах. Зависимости отношения момента реза к усилию реза $M_{\text{рез}}/F_{\text{рез}}$ и угла реза α от угла поворота эксцентрикового вала приведены на рис. 2.29 и 2.30, соответственно. Из графиков видно, что коэффициент передачи силы реза к моменту — переменный и уменьшается в начале реза и увеличивается к его окончанию. Угол реза вначале процесса резки возрастает (что будет способствовать уменьшению силы реза), а к окончанию реза убывает. Всё это будет способствовать вначале реза к уменьшению момента реза, а к окончанию реза — к его увеличению. На рис. 2.31 приведена траектория нижней точки ножа при полном обороте кривошипного вала, а на рис. 2.32 — приведена траектория в зоне реза. Из графиков видно, что перекрытие в процессе реза непостоянно.

Модель системы управления и механической части ножниц, предназначенная для осуществления второго этапа, изображена на рис. 2.33. На рисунке обозначены РС — регулятор скорости; КМ — замкнутый контур момента; u — передаточное число редуктора. Расчёт положений точек ножа и силы реза производится в блоках `Subsystem 1krA` и `Subsystem FA` (рис. 2.34, 2.35). Направление, в котором производится рез, определяется блоком `Subsystem FB` рис. 2.36.

Блоки «`Matlab Function`» содержат в себе вызовы функции `linterp` (листинг 1.5), выдающие по заданному углу `alpha_a` интерполированные значения момента инерции, момента от неуравновешенных масс и т. д. Усилие реза моделируется с помощью функции `ForceRes` (листинг 1.10).

Для однокривошипной модели ножниц написан скрипт `Plot1kr` (листинг 2.16), осуществляющий отображение механизма резания в различные

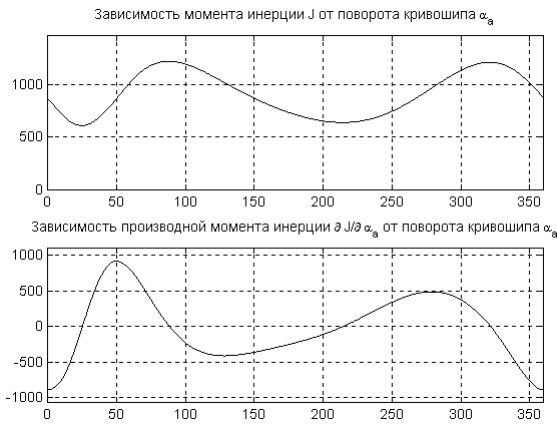


Рис. 2.27. Графики момента инерции J и производной $\frac{dJ}{d\alpha_a}$ момента инерции по углу поворота кривошипа α_a .

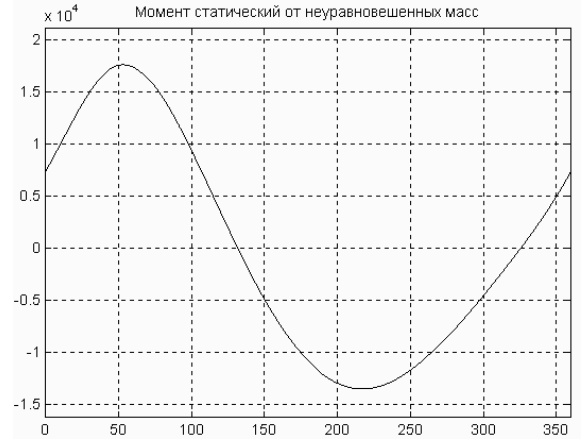


Рис. 2.28. График статического момента в функции от угла поворота кривошипа.

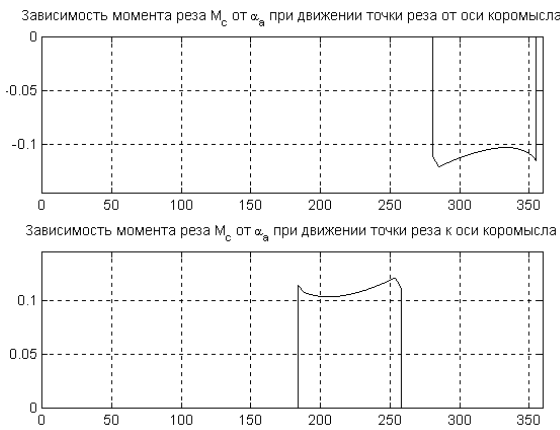


Рис. 2.29. Зависимость отношения $M_{рез}/F_{рез}$ от угла поворота эксцентрикового вала α_a .

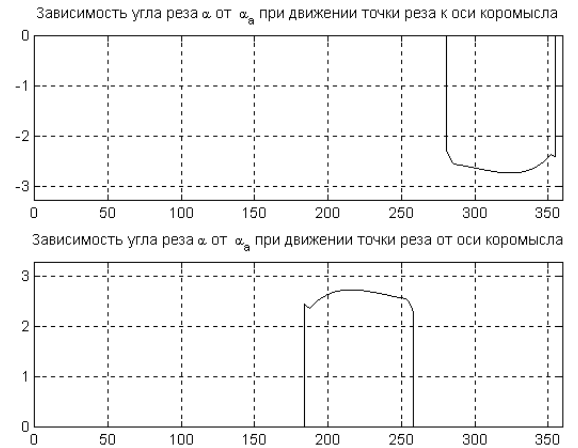


Рис. 2.30. Зависимость угла реза $\alpha_{рез}$ от угла поворота эксцентрикового вала α_a .

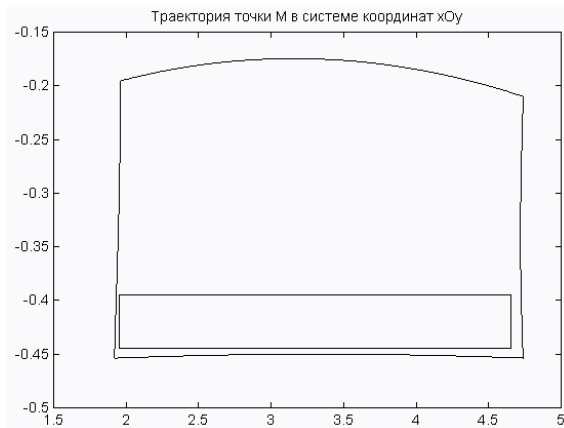


Рис. 2.31. Траектория нижней точки ножа M .



Рис. 2.32. Траектория нижней точки ножа M при резке.

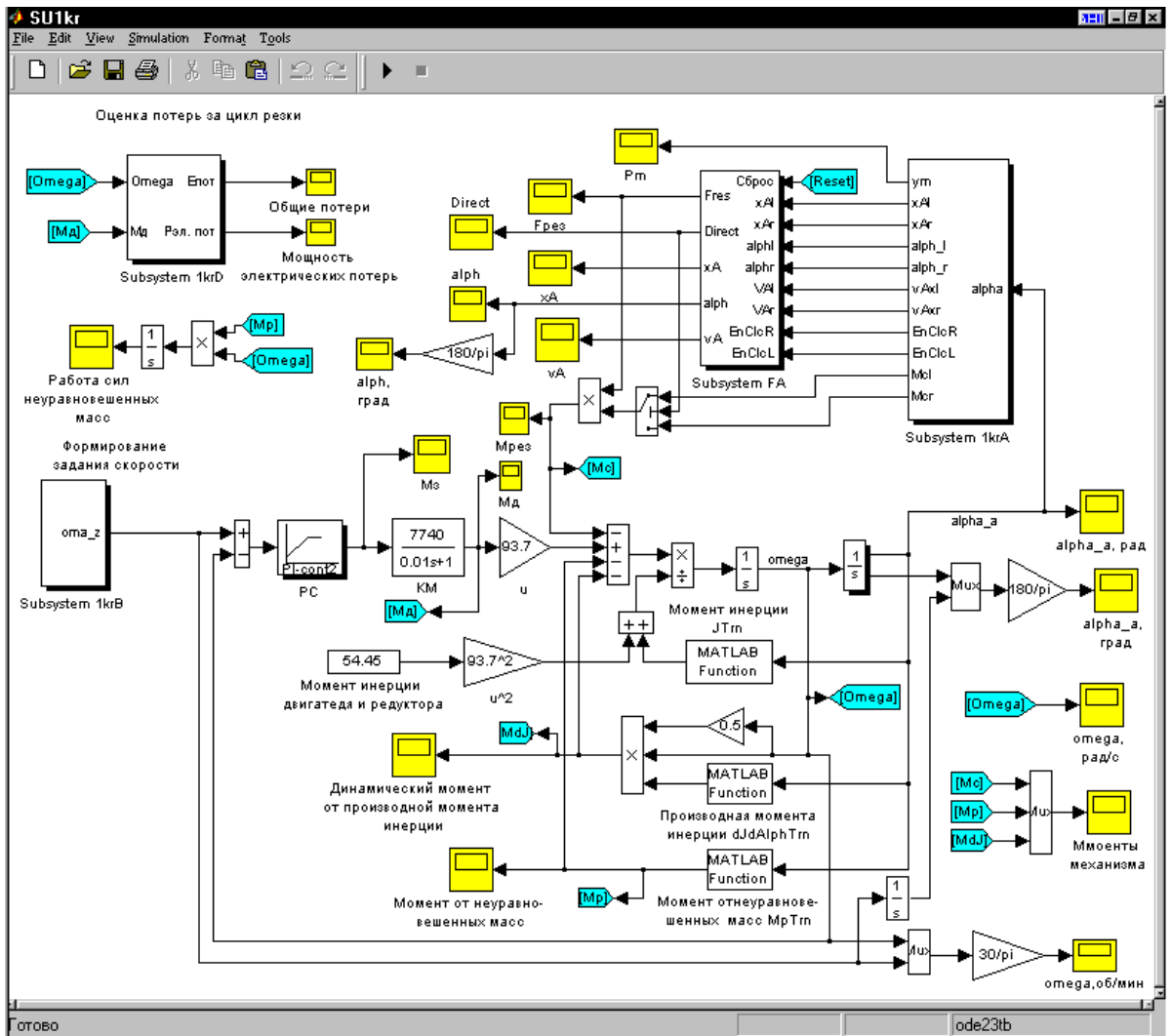


Рис. 2.33. Модель однокривошипных ножниц в пакете MATLAB.

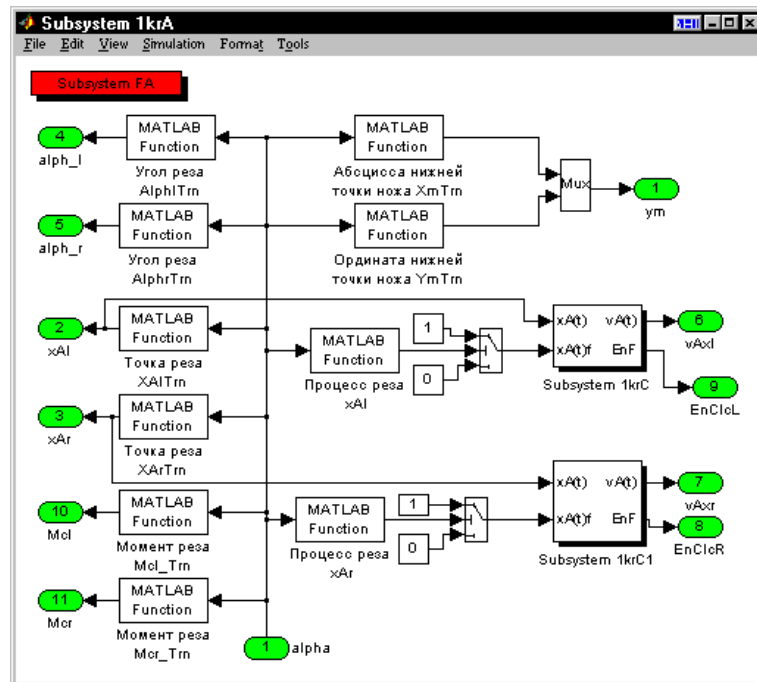


Рис. 2.34. Блок определения положений нижней точки ножа, точек врезания, угла реза, отношения силы реза $F_{рез}$ к моменту $M_{рез}$ на кривошипном валу, вызываемому этой силой.

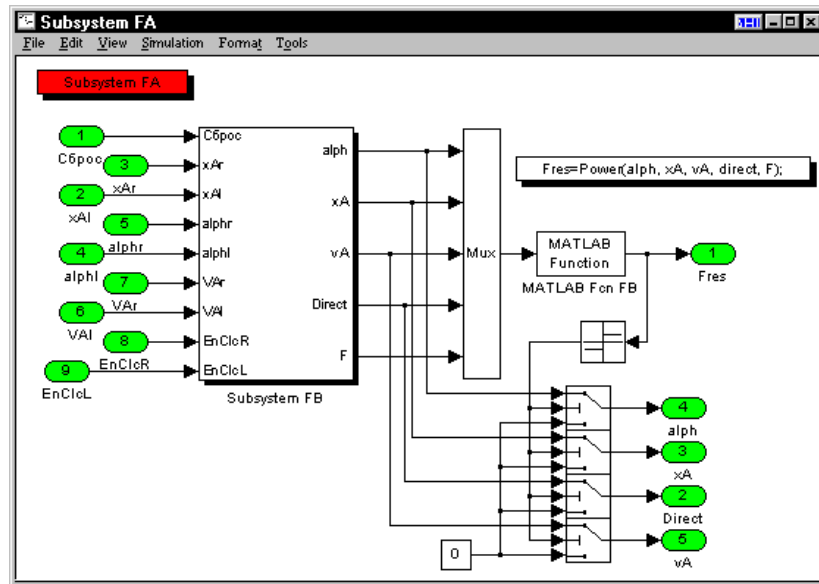


Рис. 2.35. Блок расчёта силы реза.

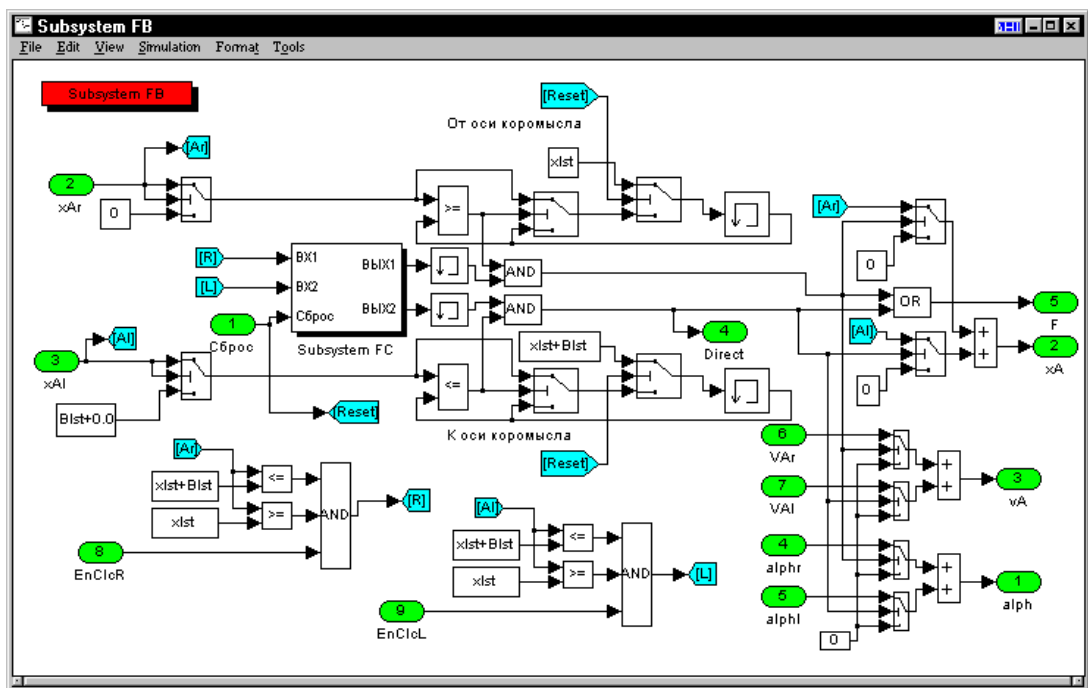


Рис. 2.36. Блок определения направления реза.

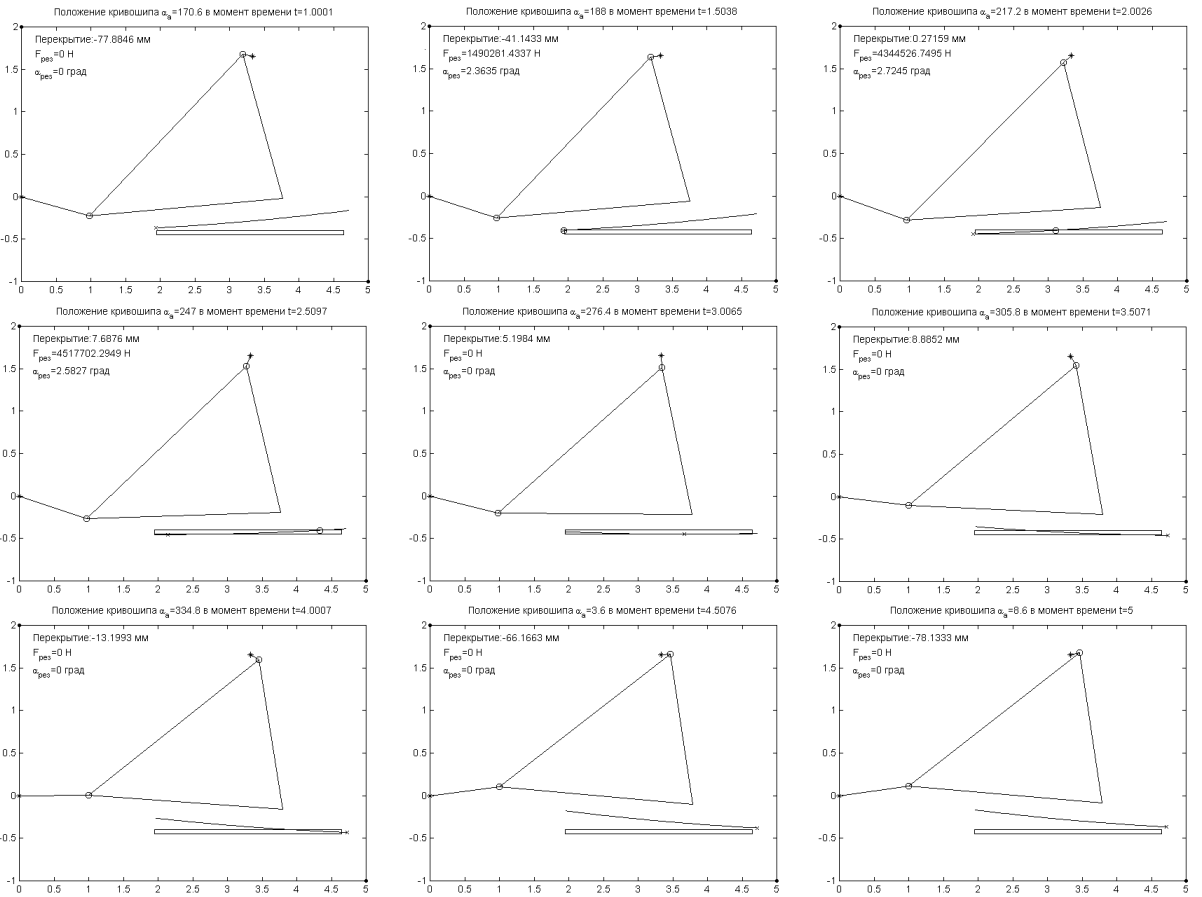


Рис. 2.37. Положения механизма резания двухкривошипных ножниц в некоторые моменты времени.

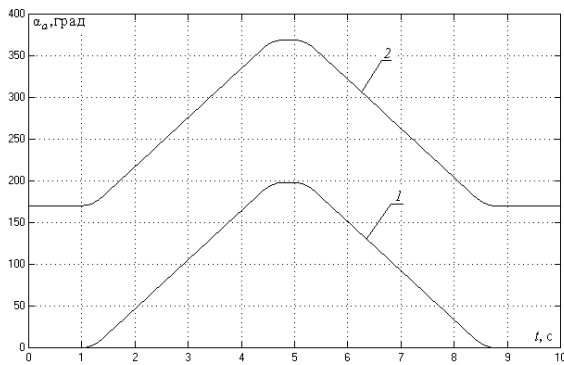


Рис. 2.38. Графики задания положения кривошипа 1 и его отработки 2.

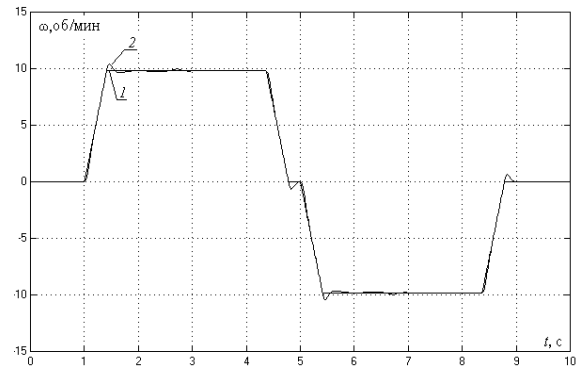


Рис. 2.39. Графики задания скорости 1 и его отработки 2.

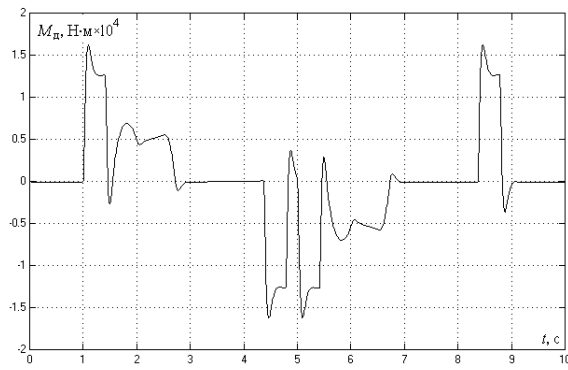


Рис. 2.40. График момента двигателей.

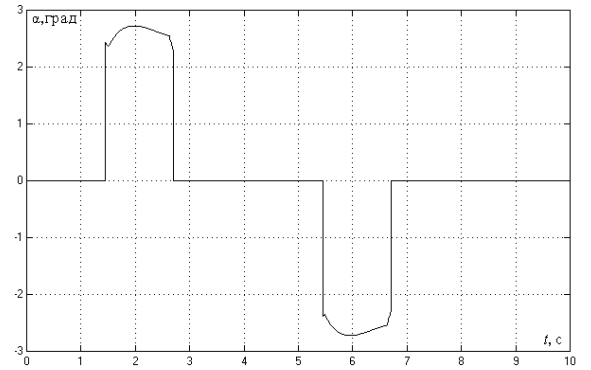


Рис. 2.41. График изменения угла реза α .

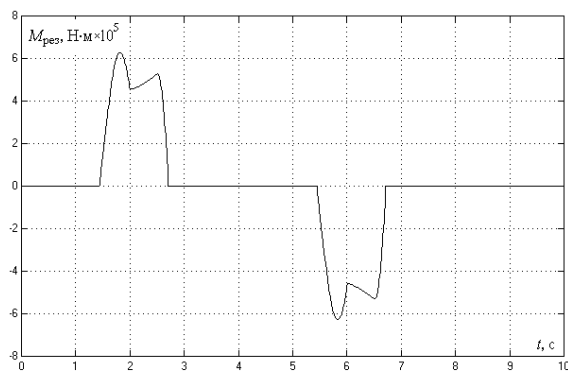


Рис. 2.42. График момента реза.

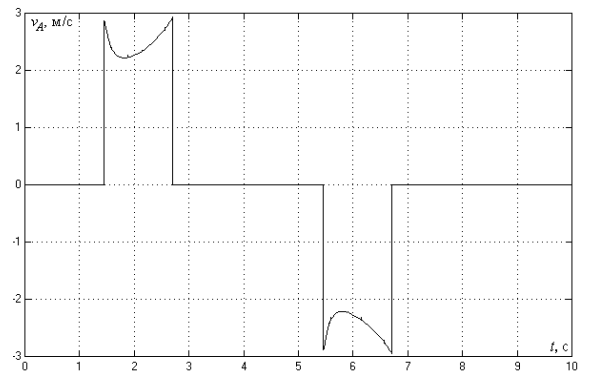


Рис. 2.43. График скорости точки врезания v_A .

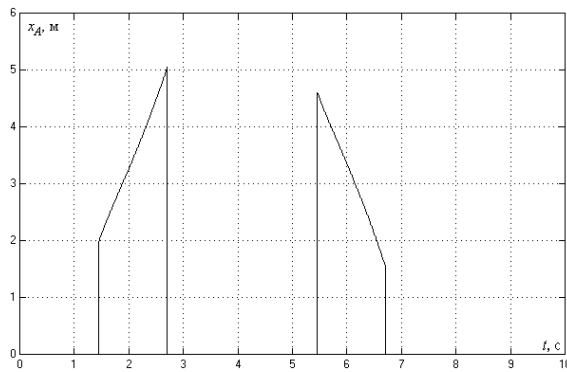


Рис. 2.44. График перемещения точки врезания x_A .

моменты времени. Данный скрипт использовался для отладки модели и алгоритмов оптимизации, а также для анализа их функционирования. На рис. 2.37 приведены положения механизма резания, которые он занимает за цикл резки проката. Из графиков видно, что процесс резки заканчивается раньше, чем нож выходит из контакта с прокатом. Из этого следует, что в целях повышения производительности всего комплекса резки отводить отрезанный лист можно сразу после окончания фазы резки, пока нож ещё находится в контакте с прокатом.

Результаты моделирования системы управления приведены на рис. 2.38—2.44. Графики отработки задания угла поворота кривошипного вала α_a и его заданной скорости ω_a приведены на рис. 2.38 и 2.39. Из графиков видно, что процесс резки практически не оказывает влияния на отработку положения и скорости. Из графика момента двигателя рис. 2.40 видно, что динамический момент превышает момент реза почти в два раза. Из графика рис. 2.42 видно, что момент реза является переменным, что объясняется как неравномерностью силы реза (обусловленной переменным углом реза рис. 2.41), так и неравномерностью движения точки врезания рис. 2.43 и рис. 2.44 при равномерном вращении кривошипа рис. 2.39.

2.4. Исследование вариантов реализации оптимальных траекторий средствами двухдвигательных электроприводов

Оптимальной считается траектория, при которой режущая кромка ножа катится как колесо большого диаметра по прямой линии $M'M''$ рис. 1.16. При этом, смещение ножа относительно разрезаемого проката минимально, за счёт чего обеспечивается высокое качество (малая деформация) отрезаемой кромки листа. На сегодняшний день синхронизация скоростей вращения кривошипов осуществляется механически с помощью синхронизирующих и паразитных шестерён. При этом кривошипы жёстко связаны и их мгновенные скорости вращения (если не учитывать возможного раскрытия люфтов и появления упругих колебаний в механических передачах) по модулю равны. Траектория движения ножа определяется исключительно конструктивными параметрами ножниц.

Выбор оптимальных параметров может производиться по различным кри-

териям [4]: кинематическому, учитывающему близость движения подвижного ножа на участке резания к идеальному обкатыванию по прямой $M'M''$, скоростному, требующему наименьшего изменения скорости v_F перемещения вдоль разрезаемого листа точки резания (x_F, y_F) , и силовому, требующему минимизации максимального усилия резания $F_{\text{макс}}$. Оптимизация по силовому критерию может приводить к потере точности обкатывания, т. е. к ухудшению кинематического критерия. Скоростной критерий в рассматриваемых на практике пределах изменения конструктивных параметров ножниц меняется незначительно [5]. Поэтому выбор оптимальных параметров двухкривошипных ножниц с катящимся резом производится вначале по кинематическому критерию (выполняется проектировочный расчёт кинематических параметров, обеспечивающих для трёх положений механизма расположение подвижного ножа, соответствующее идеальному его обкатыванию по заданной прямой). Затем по силовому критерию (производится выбор формы режущей кромки подвижного ножа, обеспечивающий снижение пиков нагрузки, характерных для двухкривошипных ножниц с круговой режущей кромкой). Однако из-за несовершенства кинематики подбором кинематических параметров не удаётся обеспечить движение ножа ножниц полностью совпадающим с обкатыванием. Другим существенным недостатком двухкривошипных ножниц является непостоянство усилия резания в процессе разделения материала с пиковой нагрузкой в начале внедрения ножа, которое объясняется тем, что в ножницах с катящимся резом дугообразный нож первоначально внедряется в металл сверху, аналогично гильотинным ножницам [12]. В отличие от гильотинных ножниц, имеющих постоянный угол резания α , в ножницах с катящимся резом угол резания переменный. От начала внедрения дугообразного ножа до конца внедрения угол резания изменяется от нуля до максимальной величины, принятой в расчётах ножниц. С внедрением ножа в металл растёт удельное сопротивление резанию, которое достигает максимальной величины на небольшой глубине внедрения, равной $\varepsilon_{\text{над}}h$. При таком заглублении ножи находятся в отрицательном перекрытии и имеют небольшой угол реза, который значительно меньше расчётного в установившемся процессе резания

при перекачивании дугообразного ножа вдоль прямого ножа. Небольшой угол резания при максимальном удельном сопротивлении резанию ведёт к пиковой нагрузке в начале внедрения дугообразного ножа в металл, которая в несколько раз превосходит нагрузку при установившемся процессе резания, т. к. величина силы резания обратно пропорциональна тангенсу угла резания.

В данной работе предлагается использовать электрическую синхронизацию вращения кривошипов вместо механической, что позволит повысить качество реза и сделать $F_{рез}$ более равномерным за счёт более точной реализации катящегося движения ножа. Повысить точность обкатывания можно, изменяя в процессе реза угол рассогласования между кривошипами, вращая их с разными мгновенными скоростями [24].

Известно, что при резке толстых листов, использование отрицательного перекрытия благоприятно отражается на качестве резки [10], т. к. при врезании ножа на глубину необходимую только для резки листов смещение ножа относительно проката оказывается минимальным, и лист меньше искривляется. В ножницах с катящимся резом при уменьшении величины перекрытия уменьшается угол резания. Как указывается в [10] меньшие углы резания благоприятно отражаются на качестве резки листов, хотя и требуют большего усилия реза. Изменяя угол рассогласования, можно в процессе реза поддерживать заданную величину перекрытия Δ . Имеет смысл поддерживать заданную величину перекрытия только для ножей дугообразной формы с постоянным радиусом кривизны, т. к. для ножей иной формы при постоянном перекрытии будет меняться угол реза α по длине реза.

Ордината нижней точки режущей кромки ножа (или её продолжения) определяется формулой

$$y_M = y_2 + (R - h') \cdot \sin(\alpha_2 + \psi') - R,$$

где R — радиус режущей кромки (рис. 2.45); ψ' — угол наклона отрезка, соединяющего точку 2 с центром окружности, описывающей режущую кромку ножа; h' — разность между радиусом ножа и длиной этого отрезка.

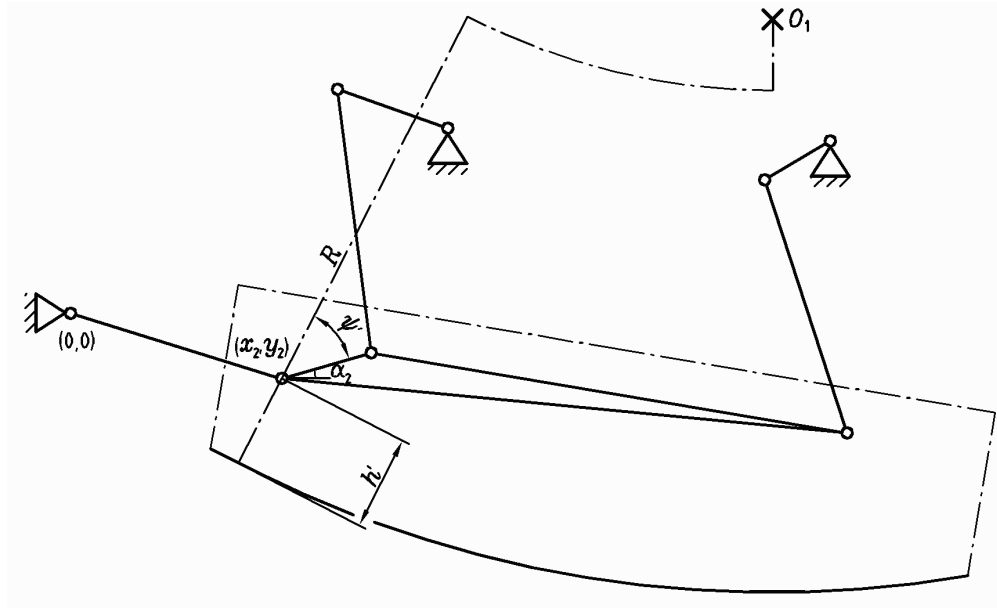


Рис. 2.45. К определению положения точки M при расчёте величины перекрытия.

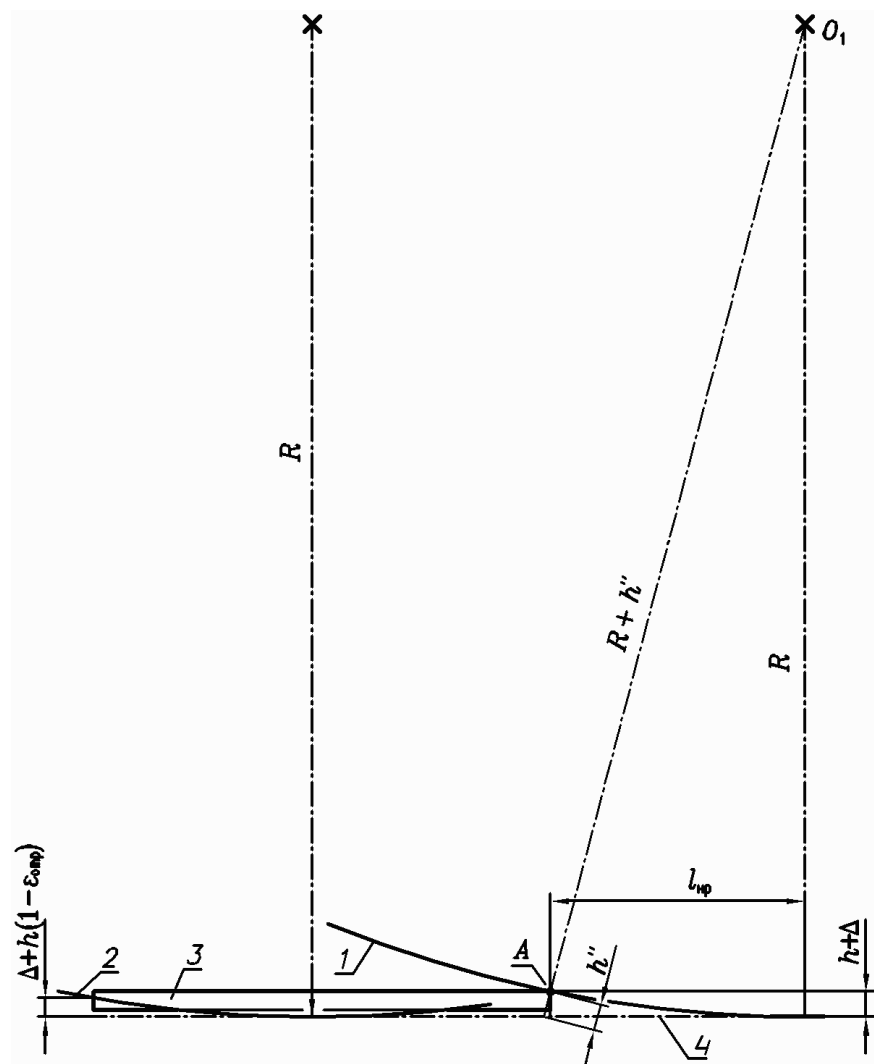


Рис. 2.46. Желаемое положение режущей кромки при врезании ножа 1 и при окончании реза 2 . Разрезаемый лист — 3 и линия перекрытия 4 . Точка врезания — A с координатами (x_A, y_A) .

Перекрытие при этом определяется как

$$\Delta = y_M - h_{\text{н}},$$

где $h_{\text{н}}$ — положение верхней грани нижнего ножа.

Требуемое перекрытие должно по возможности выдерживаться с момента начала врезания ножа в лист и до окончания реза см. рис. 2.46.

$$\frac{R + h''}{h''} = \frac{R}{\Delta + h},$$

откуда находим

$$h'' = \frac{R(\Delta + h)}{R - \Delta - h}.$$

Расстояние от края листа до нижней точки ножа в момент врезания составляет

$$l_{\text{нр}} = \sqrt{(R + h'')^2 - R^2} - \sqrt{h''^2 - (\Delta + h)^2}.$$

При движении точки врезания x_A по направлению к оси коромысла требуемое перекрытие должно обеспечиваться при перемещении точки (x_M, y_M) от $x_{\text{л}} + B + l_{\text{нр}}$ до $x_{\text{л}}$, а при движении точки врезания в обратном направлении — при перемещении (x_M, y_M) от $x_{\text{л}} - l_{\text{нр}}$ до $x_{\text{л}} + B$. Абсциссу нижней точки ножа можно найти по формуле

$$x_M = x_2 + (R - h') \cdot \cos(\alpha_2 + \psi').$$

Поиск закона изменения угла рассогласования, обеспечивающего заданное перекрытие в процессе реза, осуществляется следующим образом. Задаёмся некоторым значением среднего положения кривошипов $\alpha_3 = \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2}$.

Принимаем различные значения угла рассогласования $\Delta\tilde{\alpha}_{ab}$ из заданного отрезка значений $[\Delta\alpha_{ab_{\text{мин}}}, \Delta\alpha_{ab_{\text{макс}}}]$.

Рассчитываем положение нижней точки ножа $(x_M; y_M)$ при различных значениях углов поворота кривошипов

$$\alpha_a = \alpha_3 + \frac{\Delta\tilde{\alpha}_{ab}}{2}; \quad \alpha_b = \alpha_3 - \frac{\Delta\tilde{\alpha}_{ab}}{2}.$$

Если при данных значениях α_3 и $\Delta\tilde{\alpha}_{ab}$ обеспечивается требуемое перекрытие ($y_M - h_{\text{н}} = \Delta$), то переходим к поиску при следующем значении $\alpha_{3i} = \alpha_{3i-1} + \Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ — шаг расчёта.

Целесообразно начинать расчёт с некоторого заданного положения α_{30} , при котором нож режет лист (например, когда нижняя точка ножа находится на равном расстоянии от обоих краёв листа). Затем расчёт производить для двух средних положений кривошипов, расходящихся к краям листа

$$\alpha'_{3i} = \alpha_{30} + \frac{\Delta\alpha}{2} \cdot i; \quad i = 1, 2, \dots,$$

и

$$\alpha''_{3i} = \alpha_{30} - \frac{\Delta\alpha}{2} \cdot i,$$

до тех пор, пока нижние точки не достигнут краёв листа ($x'_M \geq x_{\text{л}} + B$ и $x''_M \leq x_{\text{л}}$). После этого расчёт может быть прекращён.

Заметим, что вращение кривошипов может осуществляться в одном направлении или в противоположных. В последнем случае угол поворота кривошипа b связан с углом поворота кривошипа a соотношением $\alpha_b = -\alpha_a - \Delta\alpha_{ab}$. Определим средний угол как

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2}.$$

Тогда углы поворота кривошипов выражаются как

$$\alpha_a = \alpha_3 - \frac{\Delta\alpha_{ab}}{2}; \quad \alpha_b = -\alpha_3 - \frac{\Delta\alpha_{ab}}{2}.$$

Схема алгоритма, осуществляющего расчёт режима управления углом рассогласования на основе изложенной выше методики, приведена на рис. 2.47, а исходный текст скрипта для пакета MATLAB — в листинге 2.17. Отображение результатов расчёта осуществлялось с помощью скрипта, приведённого в листинге 2.18. Для двухкривошипных ножниц с катящимся резом исследованы возможности формирования заданных траекторий движения ножа несколькими вариантами управления углом рассогласования. Исследованы следующие варианты: 1) нереверсивное вращение кривошипов в одном направлении; 2) нереверсивное вращение кривошипов в противоположных направлениях; 3) реверсивное вращение кривошипов.

В результате было установлено, что при нереверсивном вращении кривошипов нельзя обеспечить постоянное перекрытие ни при резке к оси коромысла

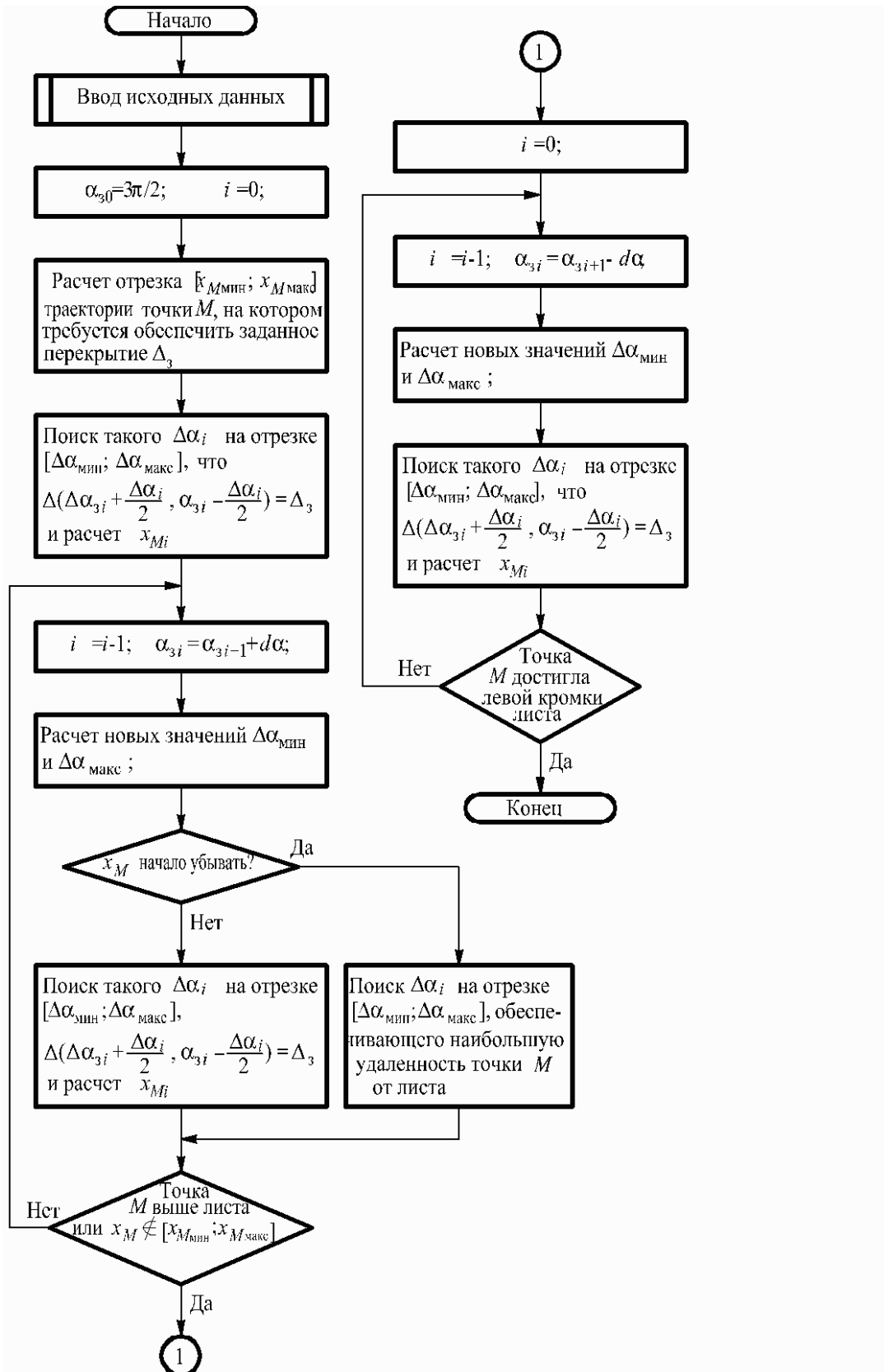


Рис. 2.47. Схема алгоритма расчёта режима управления углом рассогласования.

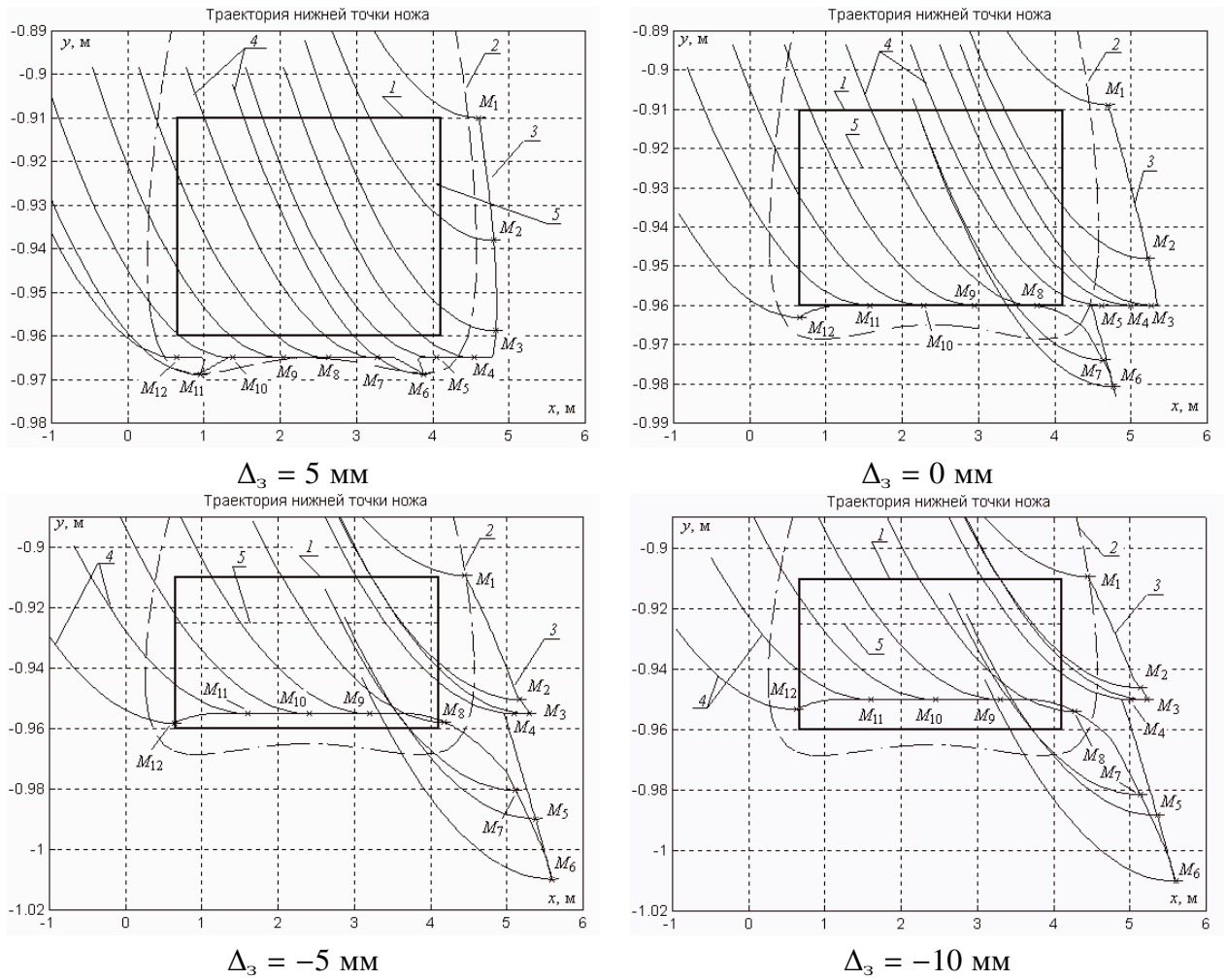


Рис. 2.48. График траектории движения ножа при нереверсивном вращении кривошипов и резке проката по направлению к оси коромысла.

1 — поперечное сечение разрезаемого листа; 2 — траектория нижней точки ножа при фиксированном угле рассогласования кривошипов; 3 — траектория движения нижней точки ножа при рассчитанном угле рассогласования; 4 — положение режущей кромки ножа; 5 — линия скла листа; $M_1 \dots M_{12}$ — положения нижней точки ножа.

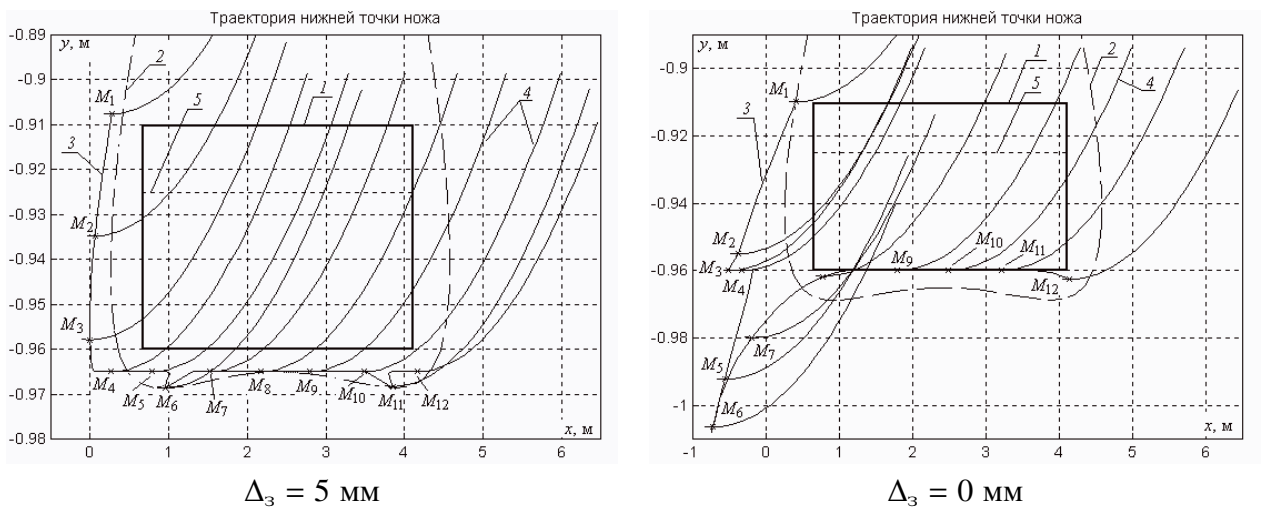


Рис. 2.49. График траектории движения ножа при нереверсивном вращении кривошипов и резке проката по направлению от оси коромысла.

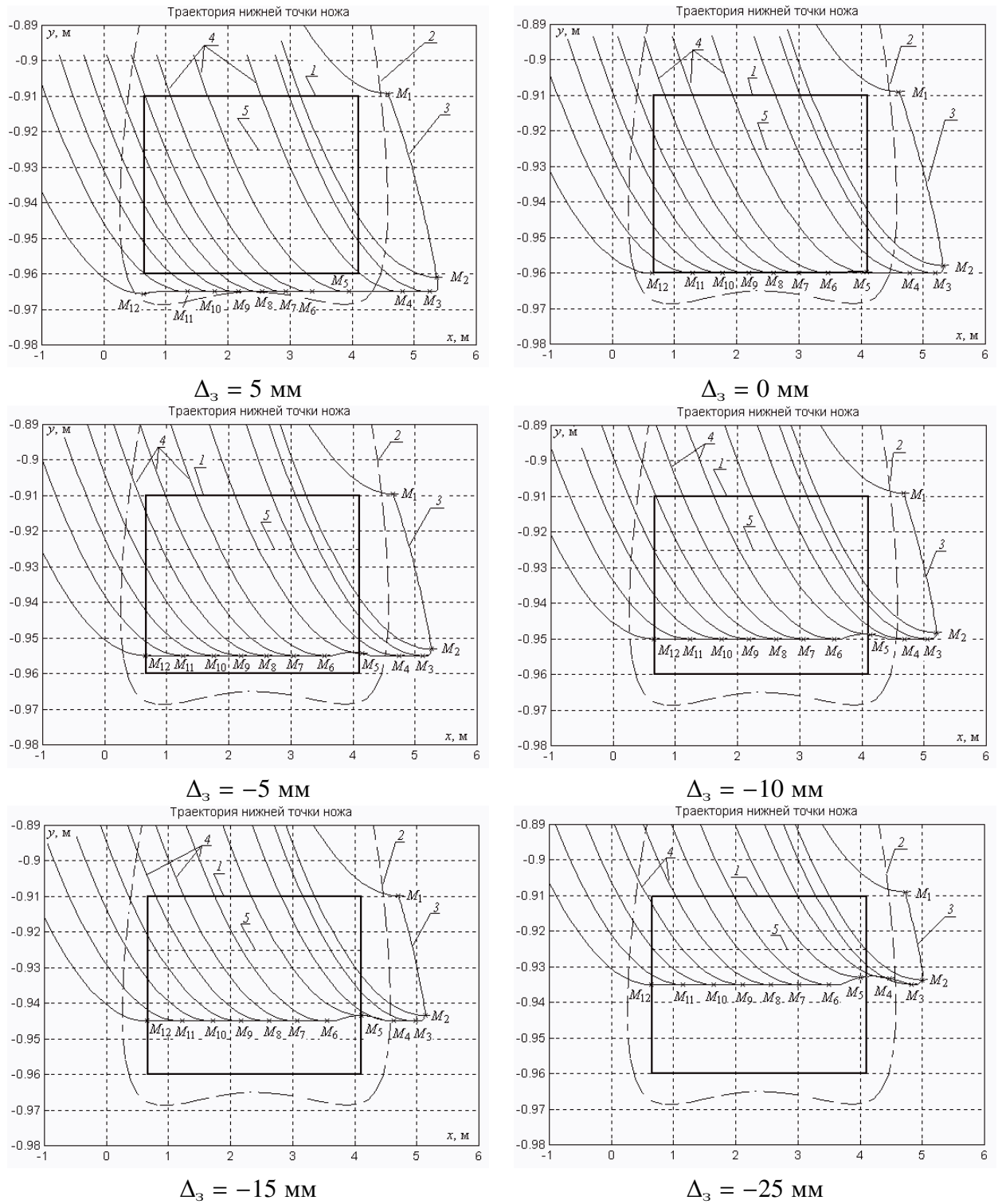


Рис. 2.50. График траектории движения ножа при реверсивном вращении кривошипов и резке проката по направлению к оси коромысла.

рис. 2.48, ни при резке от оси коромысла рис. 2.49. При этом наблюдается резкое возрастание Δ при приближении нижней точки ножа к краям листов. Вращение кривошипов в противоположные стороны, также как и изменение начального угла рассогласования с 70° на -70° тоже не позволяют обеспечить постоянное перекрытие. Графики изменения перекрытия в процессе резки аналогичны описанным выше. Уменьшить наблюдаемый рост перекрытия можно, вводя ограничения на минимальное и максимальное значения угла рассогласования. При ограничениях величины угла рассогласования $[60^\circ; 80^\circ]$ точка M не будет опускаться ниже линии 2.

Обеспечить постоянное заданное перекрытие по всей длине реза можно только при реверсивном вращении кривошипов. При этом удаётся обеспечить практически постоянное перекрытие на всей длине реза рис. 2.50.

Для реализации указанных законов регулирования необходима точная отработка задания по положению кривошипов при воздействии возмущений механического характера. Система подчинённого регулирования не может обеспечить необходимую динамическую точность отработки заданного угла рассогласования между кривошипами, и, поэтому, целесообразно использовать, более точные системы комбинированного управления [29, 58]. В данной работе рассмотрена наиболее простая в настройке система подчинённого регулирования с комбинированными связями по задающему воздействию. Такие системы обеспечивают высокую точность отработки задания по положению и весьма успешно применяются на практике [8, 39].

Кроме высокой динамической точности по заданию, необходимо также обеспечить высокое быстродействие отработки возмущений. Повысить быстродействие отработки возмущений можно, используя, например, методы компенсации возмущений по модели, приведённые в [22, 26]. В этих работах рассмотрены способы управления с компенсацией возмущений электропривода на основе встраиваемой в программное обеспечение контроллера упрощённой математической модели объекта, содержащей передаточные функции по заданию и по какому-либо возмущению.

Суть метода заключается в следующем. На объект и его модель подаётся одинаковое задание. Далее по разности отработки задания моделью и объектом на звене оценки вычисляется оценка возмущения, действующего на объект. Поскольку в модели учитывается только одно возмущение, то все прочие возмущения приводятся к нему. Затем, на основе оценки на звене коррекции формируется корректирующий сигнал, на который необходимо изменить задание, чтобы скомпенсировать возмущения. Корректирующий сигнал можно вводить двумя способами (от выбора способа зависит вид передаточной функции звена коррекции). В первом случае сигнал добавляется только к заданию объекта, а во втором случае сигнал добавляется к заданию и объекта, и модели. В последнем случае при выполнении определённых условий можно получить инвариантную по возмущению систему, однако при этом она становится очень чувствительной к параметрам передаточных функций модели объекта, звена оценки и звена коррекции, и добиться устойчивой работы становится сложно. При использовании первого способа система значительно менее чувствительна к значениям параметров указанных передаточных функций. Поскольку модель не может полностью соответствовать объекту по различным причинам (параметры объекта не всегда могут быть измерены с требуемой точностью или могут меняться в процессе эксплуатации оборудования), оценка приведённого возмущения будет также зависеть от задания. Это позволяет как компенсировать параметрические возмущения, так и в некоторых пределах изменять отработку задания скорректированной системы, используя в модели вместо реальной передаточной функции объекта желаемую.

Другой метод компенсации возмущений состоит в подаче сигналов на входы контуров моментов, рассчитанных на основе или непосредственного измерения действующих возмущений, или на основе оценок величин возмущений, полученных при помощи математической модели объекта управления [33], [66]. Возмущения по моментам сил на валах редуктора могут быть разделены на случайные и периодические. Последние могут быть определены заранее, и их можно скомпенсировать, подавая на регуляторы тока соответствующие добав-

ки к заданиям. Периодические возмущения обусловлены в основном наличием неуравновешенных масс, самим процессом резки листа, прижимом суппорта (в двух кривошипных ножницах с копиром). Возмущения, обусловленные наличием неуравновешенных масс, зависят только от положения кривошипов и могут быть скомпенсированы практически полностью.

Возмущения, обусловленные прижимом суппорта к копиру, при постоянной силе прижима F_P и малой приведённой к валам двигателей инерционности гидросистемы прижима можно считать зависящими только от положений кривошипов. Возмущения, связанные с резкой листа, зависят от параметров проката (его толщины и ширины, прочности на срез τ температуры), ширины листа и его положения ножниц, а также режимов резки (угла резания, перекрытия, бокового зазора, степени затупления ножей и пр.). Данные возмущения могут быть скомпенсированы лишь приближенно из-за наличия большого количества трудно учитываемых факторов (степени затупления ножей, температуры листа, невозможности точно рассчитать силу реза в зависимости от положения кривошипов).

На основании выше изложенного для построения систем управления ножницами целесообразней использовать второй вариант компенсации возмущений. Структурная схема системы регулирования приведена на рис. 2.51. Структура электропривода строится по принципу комбинированного управления. Она содержит три контура подчинённого регулирования (контур положения, контур скорости и контур тока). На регуляторы двух внутренних контуров дополнительно (для повышения быстродействия) вводятся задания скорости и тока.

Логически система управления разбита на несколько модулей: модуль формирования задания, модуль формирования компенсации возмущений и модуль регулирования. Модуль формирования задания состоит из блока выработки задания (БВЗ), блока расчёта параметров резки (БРР), блока формирования угла рассогласования (БФУР). Модуль формирования компенсации возмущений включает в себя блок расчёта положения точки реза x_F и угла реза α (БРПН), блок оценки силы реза $F_{рез}$ (БОСР), блок расчёта моментов реза (БРМР), блок

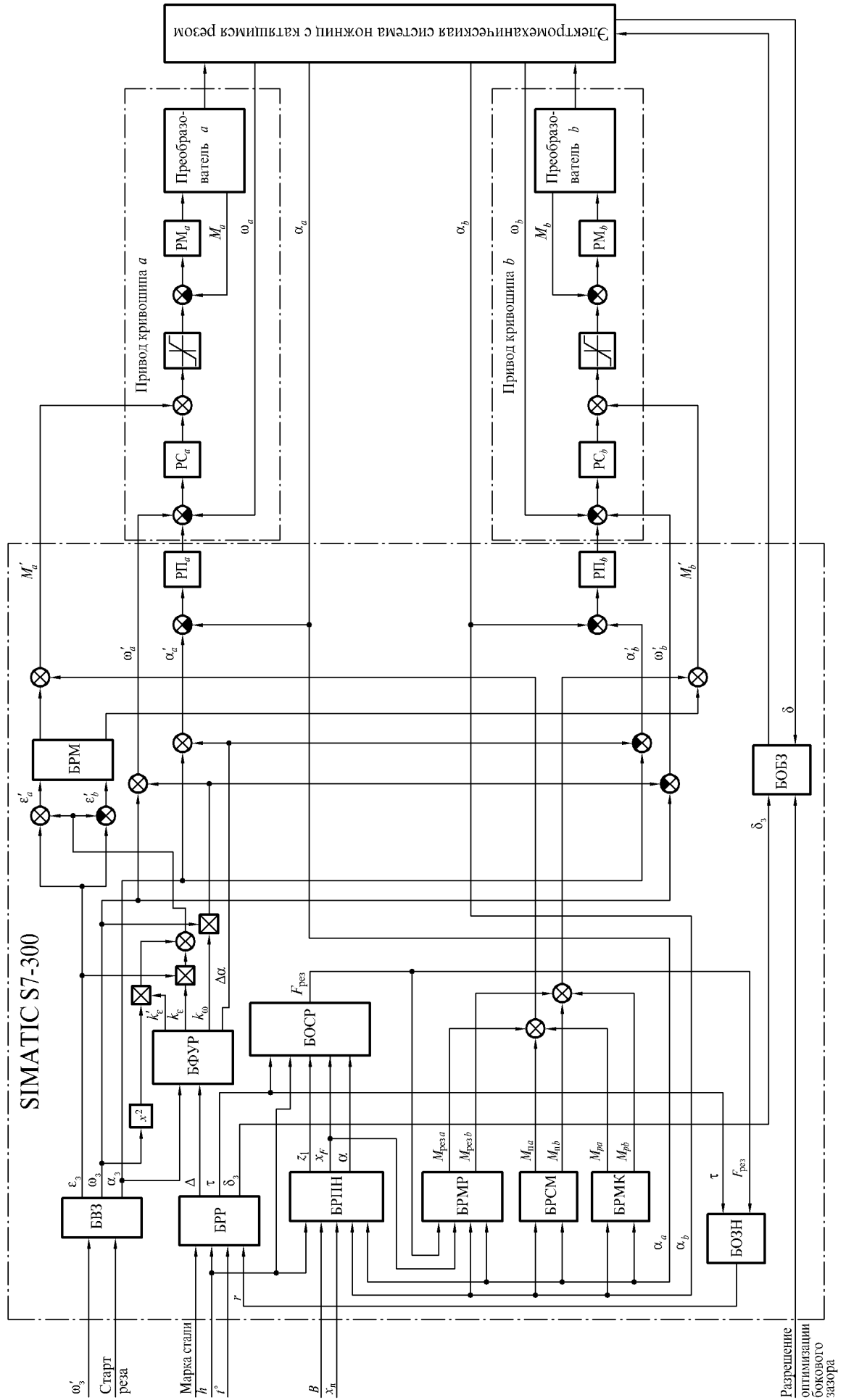


Рис. 2.51. Функциональная схема системы управления двухкривошипными ножницами.

расчёта статических моментов от неуравновешенных масс (БРСМ), блок расчёта статических моментов от копира (БРМК). Модуль регулирования включает в себя регуляторы положений кривошипов РП_а и РП_б, регуляторы скоростей вращения кривошипов РС_а и РС_б, регуляторы тока (в тиристорных преобразователях) или регуляторы момента (активных составляющих тока в частотном приводе) РМ_а и РМ_б.

БРР на основании данных о температуре поступающего раската t° , его толщины h , марки стали и степени затупления ножей r выдаёт данные о параметрах резки: оптимальном перекрытии ножей Δ , оптимальном боковом зазоре δ и ориентировочном значении сопротивления резания. БВЗ формирует задания на среднее положение α_3 , скорость ω_3 и ускорение ε_3 . БФУР по заданному углу и перекрытию Δ формирует угол рассогласования $\Delta\alpha_{ab}$, а также соотношения скоростей k_ω и ускорений $k_\varepsilon, k'_\varepsilon$ кривошипов

$$k_{\omega_i} = \frac{\Delta\alpha_{abi} - \Delta\alpha_{abi-1}}{2\Delta\alpha}; \quad k_{\varepsilon_i} = k_{\omega_{i-1}}; \quad k'_{\varepsilon_i} = \frac{k_{\omega_i} - k_{\omega_{i-1}}}{\Delta\alpha}.$$

Далее, по этим параметрам рассчитываются задания на положения кривошипов α'_a и α'_b , задания на их скорости ω'_a и ω'_b , а также на их ускорения. Задания на положения и на скорости подаются на регуляторы положения и скорости. Задания на ускорения поступают в БРМ, который рассчитывает необходимые для компенсации инерционности динамические моменты на валах кривошипов (необходимость блока диктуется тем, что ускорение каждого кривошипа, зависит от приложенных моментов к обоим кривошипам). К динамическим моментам добавляются моменты компенсации возмущений, получившиеся задания на моменты M'_a и M'_b подаются на регуляторы моментов.

Моменты компенсации возмущений слагаются из статических моментов от неуравновешенных масс, статических моментов от копира (в двухкривошипных ножницах с копиром), а также из моментов реза. Блоки БРСМ и БРМК выполняют расчёт на основе текущих положений кривошипов (α_a и α_b), а также заложенных в них данных о кинематике механизма (в соответствии с моделью, приведено в разделе 2.1.3). БРМР использует кроме этого данные об оценке силы реза $F_{рез}$ и о положении точки резания x_F . Сила реза рассчитывается БОСР на

основе угла реза α , положения точки реза и сигнала z_1 , указывающего, что нож осуществляет резку проката, кроме того, используются данные о толщине металла h , выдаваемой толщиномером, значении сопротивления резания τ . Значения x_F , α и z_1 вырабатываются БРПН на основе данных о положении кривошипов, ширины разрезаемого листа B и его положении относительно копира или коромысла ножниц $x_{Д}$. Данные об оптимальном перекрытии, оптимальном боковом зазоре δ_3 и сопротивлении резанию выдаются БРР на основе данных о марке стали, толщине листа, температуре проката t° , и оценке степени затупления ножей.

2.5. Выводы по главе

1. Разработаны математические модели электромеханических систем управления одно- и двухкривошипными ножницами с катящимся резом, включающие в себя подмодели системы управления, механизма резания и системы «нож—лист». Новизна моделей состоит в том, что они учитывают статические и динамические свойства механизмов резания, взаимодействие ножа с прокатом, переменность усилия резки по длине реза и допускают в расчёте задавать произвольную форму режущей кромки ножа. Описание динамики механизма резания составлено на основе дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. В отличие от существующих методик кинематический расчёт ножниц сведён к решению уравнения с одной неизвестной, через которую выражены все остальные искомые величины, что существенно упрощает процедуру расчёта.

2. На основе данных математических моделей разработаны и доведены до уровня инструментальных средств компьютерные модели ЭМС ножниц различного кинематического исполнения. Модели представляют собой совокупность подмоделей, разработанных в SIMULINK, и программ, написанных на языке скриптов MATLAB. Для решения задач анализа и синтеза систем управления ножницами разработаны скрипты на языке пакета MATLAB, осуществляющие визуализацию механизма резания в заданные моменты времени. В результате моделирования ЭМС ножниц установлено, что используемые конструкции ножниц не обеспечивают постоянное перекрытие между ножами в процессе реза,

что, ввиду существенного его влияния на качество резки, обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования ЭМС ножниц. При резке листа максимальной толщины крутящий момент на валу двигателя меньше, чем во время пусков и торможений привода, что обуславливает необходимость оптимизации режимов работы электроприводов ножниц.

3. Предложено использовать при проектировании двухкривошипных ножниц электрическую синхронизацию вращения кривошипов вместо механической, а также разработана методика формирования траектории движения ножа средствами электропривода двухкривошипных ножниц с электрической синхронизацией. Разработан и реализован на языке скриптов MATLAB алгоритм расчёта закона управления углом рассогласования между кривошипами, обеспечивающий заданное перекрытие между ножами практически по всей длине реза. В результате проведённых компьютерных исследований установлено, что обеспечить постоянное перекрытие можно только при реверсивном движении кривошипов. При использовании механической синхронизации внедрения ножа в лист угол реза существенно меньше, чем при установившемся процессе реза, из-за чего в усилиях резки наблюдается пик значительной величины. Использование электрической синхронизации позволяет снизить величину пика за счёт большего угла реза в момент внедрения ножа в лист. За счёт поддержания заданного перекрытия можно обеспечить величину внедрения ножа в лист только на величину, необходимую для скола, за счёт чего можно полностью устранить «стрелу прогиба» кромки листа. Предложены структуры систем управления ножницами, обеспечивающие отработку заданного перекрытия между ножами.

ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НОЖНИЦАМИ С КАТЯЩИМСЯ РЕЗОМ

3.1. Способы оценки энергозатрат за цикл резки и критерии оптимизации

Из множества возможных траекторий изменения состояния системы необходимо стремиться выбрать такие, которые обеспечивают максимальное быстрое действие, минимум динамических нагрузок и потерь энергии, максимум полезной работы и оптимальные значения всех других показателей, характеризующих условия протекания процесса. Характер переходных процессов электропривода, соответствующий таким критериям, и является оптимальным в самом общем смысле, однако его определение затрудняется многообразием оптимизируемых показателей, их различной практической значимостью и противоречивостью требований к динамическим свойствам электропривода и законам изменений управляющих воздействий. Основными направлениями оптимизации режимов резки являются

- повышение качества разрезаемого проката;
- снижение энергозатрат на рез;
- повышение ресурса механизма, которое может быть достигнуто за счет ограничения моментов двигателя и обеспечения плавных пусков, путём ограничения «рывка» (первой производной ускорения);
- улучшение качества потребления энергии из сети, которое подразумевает повышение $\cos \varphi$ и уменьшение амплитуд высших гармоник, потребляемых из сети.

На первом месте стоит повышение качества реза проката. Снижение энергозатрат на рез и повышение ресурса механизма не должны осуществляться за счёт снижения качества реза, а улучшение качества потребления энергии из сети не должно происходить за счёт снижения ресурса механизма. Оптимизация не должна приводить к снижению производительности комплекса резки ниже заданной.

Абсолютно жёстких механических связей и передач без необходимых рабочих зазоров не существует. Приложение момента к упругой механической системе при слабом демпфировании вызывает в ней слабо затухающие механические колебания, в значительной степени увеличивающие максимальные нагрузки передач [37, 38, 62], и тем самым снижающие ресурс механизма. Для ограничения колебаний в механической части электропривода необходимо ограничивать скорость нарастания момента (вторую производную скорости, или «рывок»), что обеспечивается алгоритмом управления ножницами, описанным в [28].

При разработке методов оптимизации режимов работы ЭМС ножниц следует выделить два независимых параметра, определяющих режим резки, которые непосредственно поддаются регулированию системой управления: боковой зазор и алгоритм управления приводом ножниц.

Энергия, расходуемая на ход ножниц, складывается из двух составляющих: затрачиваемой на сам рез энергии $E_{рез}$ и потерь в электромеханической системе $E_{п}$. Энергия, идущая на рез, определяется выражением

$$E_{рез} = \int_{t_{рез н}}^{t_{рез к}} M_{рез}(t)\omega(t)dt, \quad (3.1)$$

где $M_{рез}$ — момент реза, приведённый к валу двигателя; ω — скорость вращения двигателя; $t_{рез н}$, $t_{рез к}$ — время начала и время конца реза, соответственно. Эта энергия зависит от режимов резки (например, бокового зазора и скорости реза) и параметров проката (в частности геометрических размеров и механических свойств), а также от конструкции ножниц и состояния инструмента.

Потери в электромеханической системе объясняются потерями в обмотке двигателя и в преобразователе, невозможностью обеспечения полной рекуперации механической энергии в сеть, моментом холостого хода механизма, вызываемого трением в подшипниках, зубчатых зацеплениях редуктора и других кинематических парах. Потери, вызванные холостым ходом механизма, определяются по формуле, аналогичной (3.1). Необходимые математические описания для расчёта момента реза и момента холостого хода приведены в главах 1 и 2.

Электрические потери в системе ТП–ДПТ определяются по полному току

$i(t)$, потребляемому из сети [34]

$$E_{\Pi} = \int_0^{t_x} i^2(t) \cdot R_{\text{CT}} dt,$$

где R_{CT} — эквивалентное сопротивление преобразователя и двигателя; t_x — время одного хода ножниц. При использовании современных преобразователей, величина полного тока может определяться встроенными в них средствами.

Как указывается в [14] основным направлением повышения экономичности систем электропривода является внедрение асинхронных приводов с частотным управлением, поэтому рассмотрим потери в системе ПЧ–АД подробнее.

Потери в системе ПЧ–АД делятся на потери в двигателе и потери в преобразователе. Мощность потерь энергии в асинхронном двигателе при частотном управлении складывается из следующих потерь [14]:

- $\Delta P_{1\text{M}}$, $\Delta P_{2\text{M}}$ — потери в меди обмотки статора и обмотки ротора, обусловленные первыми гармониками токов обмоток;
- $\Delta P_{1\text{CT}}$ — потери в стали статора от гистерезиса;
- $\Delta P_{1\text{CB}}$ — потери в стали статора от вихревых токов;
- $\Delta P_{1\text{Mex}}$ — механические потери;
- $\Delta P_{\text{доп}}$ — добавочные потери, пропорциональные квадрату основной гармоники тока статора.

Потери в меди определяются по выражениям

$$\Delta P_{1\text{M}} = \Delta P_{1\text{M.НОМ}} \cdot \frac{i_1^2}{i_{1\text{НОМ}}^2}; \quad \Delta P_{2\text{M}} = \Delta P_{2\text{M.НОМ}} \cdot \frac{i_2^2}{i_{2\text{НОМ}}^2},$$

где i_1 , i_2 — модули результирующих векторов токов обмоток статора и ротора; $i_{1\text{НОМ}}$, $i_{2\text{НОМ}}$ — модули результирующих векторов токов обмоток статора и ротора в номинальном режиме.

Потери в стали от гистерезиса и вихревых токов выражаются формулами

$$\Delta P_{1\text{CT}} = \Delta P_{1\text{CT.НОМ}} \cdot \frac{\psi_0^2 \omega_1}{\psi_{0\text{НОМ}}^2 \omega_{1\text{НОМ}}}; \quad \Delta P_{1\text{CB}} = \Delta P_{1\text{CB.НОМ}} \cdot \frac{\psi_0^2 \omega_1^2}{\psi_{0\text{НОМ}}^2 \omega_{1\text{НОМ}}^2},$$

где $\Delta P_{1\text{CT.НОМ}}$, $\Delta P_{1\text{CB.НОМ}}$ — потери в стали статора на гистерезис и вихревые токи в номинальном режиме; ψ_0 — модуль результирующего вектора главных потоков сцеплений; ω_1 — угловая частота напряжения статора; $\psi_{0\text{НОМ}}$, $\omega_{1\text{НОМ}}$ — значения

модуля результирующего вектора главных потокосцеплений и угловой частоты напряжения статора в номинальном режиме.

Механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ определяются выражением

$$\Delta P_{1\text{мех}} = \Delta P_{1\text{мех.ном}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где $\Delta P_{1\text{мех.ном}}$ — механические потери при номинальной скорости вращения двигателя; $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная скорость вращения двигателя.

Добавочные потери, пропорциональные квадрату тока обмотки статора, определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{доп.ном}} \cdot \frac{i_1^2}{i_{1\text{ном}}^2},$$

где $\Delta P_{\text{доп.ном}}$ — добавочные потери двигателя при работе в номинальном режиме.

Суммарная мощность потерь энергии в асинхронном двигателе при частотном способе регулирования его скорости определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{1\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}} + \Delta P_{1\text{с.г}} + \Delta P_{1\text{с.в}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{1\text{доп}}. \quad (3.2)$$

Как следует из приведённых выше выражений, каждая из составляющих суммарных потерь зависит от режима работы асинхронного двигателя.

Основную долю полных потерь мощности в ПЧ составляют электрические потери в вентилях выпрямителя, ключах инвертора и реакторах. Часто, при описании процессов, происходящих в ПЧ, пренебрегают коммутационными процессами в выпрямителе и инверторе, что позволяет сделать описание процессов по непрерывным, или полезным составляющим [14]. Представим электрические потери в ПЧ в виде суммы электрических потерь в источнике питания автономного инвертора $\Delta P_{\text{ип}}$, включая в него входные коммутирующие реакторы, неуправляемый выпрямитель и реактор сглаживающего LC -фильтра звена постоянного тока, и электрических потерь в автономном инверторе напряжения (АИН) $\Delta P_{\text{аи}}$ с выходным реактором

$$\Delta P_{\text{ПЧ}} = \Delta P_{\text{ип}} + \Delta P_{\text{аи}}.$$

Потери в источнике питания описываются выражением

$$\Delta P_{\text{ин}} = R_{\text{р.вх}} \cdot \frac{18}{\pi^2} \cdot \frac{P_1^2}{U_{\text{и}}^2} + 2 \left(\frac{U_{\text{гр}}}{U_1} \cdot P_1 + R_{\text{д}} \cdot \frac{P_1^2}{U_{\text{и}}^2} \right) + R_{\text{рф}} \cdot \frac{P_1^2}{U_{\text{и}}^2},$$

где $R_{\text{р.вх}}$ — активное сопротивление обмотки коммутирующего реактора; P_1 — активная мощность, потребляемая двигателем от преобразователя; $U_{\text{и}}$ — среднее значение напряжения на входе инвертора; $U_{\text{гр}}$ — граничное или прямое падение напряжения на диоде; $R_{\text{д}}$ — дифференциальное сопротивление диода для прямого тока; $R_{\text{рф}}$ — активное сопротивление обмотки реактора сглаживающего фильтра звена постоянного тока.

Таким образом, электрические потери в источнике питания АИН, включающего неуправляемый выпрямитель с входным реактором, зависят от активной мощности, которая потребляется двигателем от преобразователя частоты.

Основные электрические потери в АИН представим в виде суммы

$$\Delta P_{\text{аи}} = \Delta P_{\text{кл.и}} + \Delta P_{\text{р.вых}},$$

где $\Delta P_{\text{кл.и}}$ — потери в силовых ключах инвертора; $\Delta P_{\text{р.вых}}$ — электрические потери в меди обмотки выходного реактора.

Суммарные электрические потери в ключах АИН с симметричной ШИМ определяются по следующей формуле

$$\Delta P_{\text{кл.и}} = \frac{1}{\pi} (U_{\text{гр.пр}} + U_{\text{гр.обр}}) i_1 + \frac{3}{4} (R_{\text{кл.пр.диф}} + R_{\text{кл.обр.диф}}) i_1^2 + \frac{U_{\text{гр.пр}} + U_{\text{гр.обр}}}{U_{\text{и}}} P_1 + \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{R_{\text{кл.пр.диф}} + R_{\text{кл.обр.диф}}}{U_{\text{и}}} i_1 P_1,$$

где $U_{\text{гр.пр}}$, $U_{\text{гр.обр}}$ — граничное падение напряжения при прямом и обратном токах через ключ; $R_{\text{кл.пр.диф}}$, $R_{\text{кл.обр.диф}}$ — дифференциальные сопротивления ключей при прямом и обратном токах; i_1 , i_1 — модули векторов основных гармоник фазных токов и напряжений статора АД.

Электрические потери в выходных реакторах АИН определяются по выражению

$$\Delta P_{\text{р.вых}} = \frac{3}{2} R_{\text{р.вых}} i_1^2,$$

где $R_{\text{р.вых}}$ — активное сопротивление обмотки реактора.

3.2. Оптимизация закона управления ножом

Выбор оптимального закона управления электроприводом, в общем случае является вариационной задачей, в которой требуется найти некоторую функцию времени $x(t)$ (экстремаль), на которой при заданных начальных и конечных условиях

$$x(t_0) = x_0; \quad x(t_n) = x_n;$$

$$x'(t_0) = x'_0; \quad x'(t_n) = x'_n;$$

$$x''(t_0) = x''_0; \quad x''(t_n) = x''_n;$$

...

$$x^{(m)}(t_0) = x_0^{(m)}; \quad x^{(m)}(t_n) = x_n^{(m)},$$

в начальный t_0 и конечный t_n моменты времени достигается минимум некоторого функционала

$$v[x(t)] = \int_{t_0}^{t_n} F\left(t, x(t), x'(t), \dots, \frac{d^m x(t)}{dt^m}, \frac{d^{m+1} x(t)}{dt^{m+1}}\right) dt,$$

при заданных ограничениях

$$x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t); \quad x'_{\min} \leq x'(t) \leq x'_{\max}.$$

При оптимизации режимов управления приводом механизма с одной степенью свободы нужно искать экстремум функционала

$$v[\alpha_a(t)] = \int_0^{t_n} F(t, \alpha_a(t), \dot{\alpha}_a(t), \ddot{\alpha}_a(t)) dt,$$

при выполнении условий

$$\alpha_a(0) = \alpha_{a0}; \quad \alpha_a(t_n) = \alpha_{an};$$

$$\dot{\alpha}_a(0) = \dot{\alpha}_{a0}; \quad \dot{\alpha}_a(t_n) = \dot{\alpha}_{an}.$$

При оптимизации механизма с двумя степенями свободы следует искать экстремум функционала

$$v[\alpha_a(t), \alpha_b(t)] = \int_0^{t_n} F(t, \alpha_a(t), \alpha_b(t), \dot{\alpha}_a(t), \dot{\alpha}_b(t), \ddot{\alpha}_a(t), \ddot{\alpha}_b(t)) dt,$$

при выполнении условий

$$\begin{aligned}\alpha_a(0) &= \alpha_{a_0}; & \alpha_a(t_n) &= \alpha_{a_n}; \\ \dot{\alpha}_a(0) &= \dot{\alpha}_{a_0}; & \dot{\alpha}_a(t_n) &= \dot{\alpha}_{a_n}; \\ \alpha_b(0) &= \alpha_{b_0}; & \alpha_b(t_n) &= \alpha_{b_n}; \\ \dot{\alpha}_b(0) &= \dot{\alpha}_{b_0}; & \dot{\alpha}_b(t_n) &= \dot{\alpha}_{b_n}.\end{aligned}$$

Ограничения значений переменной (положения кривошипа) и её производной по времени обуславливаются технологическими требованиями и возможностями электромеханической системы.

Чтобы найти кривую, на которой функционал достигает минимума, необходимо решить дифференциальное уравнение Эйлера с учётом граничных условий и ограничений, накладываемых на вид кривой, и проверить достигается ли на полученной кривой, называемой экстремалью, минимум или максимум. Если достигается минимум, то это и есть искомая кривая.

Уравнение Эйлера для функционалов вида

$$v[\alpha_a(t)] = \int_{t_0}^{t_1} F(t, \alpha_a(t), \dot{\alpha}_a(t), \ddot{\alpha}_a(t)) dt,$$

имеет вид

$$F_{\alpha_a} - \frac{d}{dt} F_{\dot{\alpha}_a} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{\alpha}_a} = 0, \quad (3.3)$$

где

$$F_{\alpha_a} = \frac{\partial}{\partial \alpha_a} F; \quad F_{\dot{\alpha}_a} = \frac{\partial}{\partial \dot{\alpha}_a} F; \quad F_{\ddot{\alpha}_a} = \frac{\partial}{\partial \ddot{\alpha}_a} F.$$

Ввиду сложности интегрирования дифференциального уравнения 3.3 решение будем искать прямыми методами вариационного исчисления, наиболее известными из которых являются конечно-разностный метод Эйлера и метод Ритца [7, 64, 67]. Основная идея прямых методов в вариационных задачах состоит в том, что вариационная задача рассматривается как предельная для некоторой задачи на экстремум функции конечного числа переменных. Эта задача на экстремум функции решается обычными методами, а затем предельным переходом получается решение соответствующей вариационной задачи.

Суть метода Ритца заключается в том, что значения функционала $v[\alpha_a(t)]$ рассматриваются лишь на всевозможных линейных комбинациях

$$\alpha_{a_n}(t) = \sum_{i=1}^n a_i w_i(t), \quad (3.4)$$

с постоянными коэффициентами a_i , составленных из n первых функций некоторой выбранной последовательности функций $w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t), \dots$. Функции (3.4) должны быть допустимы в рассматриваемой задаче, что налагает некоторые ограничения на выбор последовательности функций $w_i(t)$. На таких линейных комбинациях функционал $v[\alpha_a(t)]$ превращается в функцию $y(a_1, a_2, \dots, a_n)$ коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_n . Эти коэффициенты выбираются таким образом, чтобы функция $\alpha_a(t)$ достигала экстремума, следовательно, a_i можно найти из системы уравнений

$$\frac{\partial y}{\partial a_i} = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Совершая предельный переход при $n \rightarrow \infty$, получим в случае существования предела функцию

$$\alpha_a(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i w_i(t),$$

являющуюся (при некоторых ограничениях, налагаемых на функционал $v[\alpha_a(t)]$ и на последовательность функций $w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t), \dots$) точным решением, рассматриваемой вариационной задачи. Если ограничиться n первыми членами, то решение будет приближенное. Если этим методом определяется абсолютный минимум функционала, то приближенное значение находится с избытком, т. е. минимум этого функционала на любых допустимых кривых не больше, минимума того же функционала на части допустимых кривых. Если находится максимальное значение, то оно по тем же причинам будет с недостатком. Для того, чтобы функции (3.4) были допустимыми, необходимо удовлетворить граничным условиям (не следует забывать и о других ограничениях, которые могут быть наложены, например, гладкости или непрерывности).

Идея конечно-разностного метода Эйлера состоит в том, что значения функционала $v[\alpha_a(t)]$ рассматривается не на всех допустимых кривых, а лишь на ломаных, составленных из заданного числа n прямолинейных звеньев с заданными

абсциссами вершин $t = t_0 + k \cdot \Delta t$, $k = 0 \dots n$, $\Delta t = (t_n - t_0)/n$. На таких ломаных функционал превращается в функцию $y(\alpha_{a_1}, \alpha_{a_2}, \dots, \alpha_{a_{n-1}})$ ординат $\alpha_{a_1}, \alpha_{a_2}, \dots, \alpha_{a_n}$ вершин ломаной, т. к. ломаная вполне определяется этими ординатами. Выбираем $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$ так, чтобы функция $y(\alpha_{a_1}, \alpha_{a_2}, \dots, \alpha_{a_{n-1}})$ достигла экстремума, т. е. определяем такие $\alpha_{a_1}, \alpha_{a_2}, \dots, \alpha_{a_{n-1}}$ из системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial \alpha_{a_1}} = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha_{a_2}} = 0, \\ \dots, \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha_{a_{n-1}}} = 0. \end{cases}$$

Чтобы получить точное решение, нужно совершить предельный переход при $n \rightarrow \infty$. Если предельный переход не совершать, что обычно является достаточным для большинства практических задач, то ломаная будет являться приближенным решением вариационной задачи. Наиболее простым в реализации на вычислительной машине является метод Эйлера, кроме того, в нём сравнительно просто можно учесть ограничения переменной и её первой производной.

Алгоритм оптимизации реализован в скрипте OptZ (листинг 3.10), а схема алгоритма представлена на рис. 3.1. Поиск осуществляется последовательным варьированием точек [30]. Поскольку за один проход найти минимум функционала не возможно, то процедура выполняет проходы до тех пор, пока не станут массивы точек, получаемые в двух идущих подряд проходах, равными, или пока относительное изменение значения функционала не станет меньше заданной величины. Для ускорения поиска количество варьируемых точек изменяется от одной, выбираемой в момент $t_{\frac{1}{2}}$, до n . Диапазон значений, которые может принимать точка в процессе поиска, лежит

$$\begin{aligned} \max(\alpha_{\min}(t_i), \alpha(t_{i-1}) + \dot{\alpha}_{\min} \cdot \Delta t_i, \alpha(t_{i+1}) - \dot{\alpha}_{\max} \cdot \Delta t_i) &\leq \alpha(t_i) \leq \\ &\leq \min(\alpha_{\min}(t_i), \alpha(t_{i-1}) + \dot{\alpha}_{\max} \cdot \Delta t_i, \alpha(t_{i+1}) - \dot{\alpha}_{\min} \cdot \Delta t_i); \end{aligned}$$

Перед началом оптимизации должен быть выполнен скрипт установки начальных значений переменных (см. например, 4.2). К ним относятся начальные и конечные условия, X0 и X1, массивы ограничений максимальных Xmax и

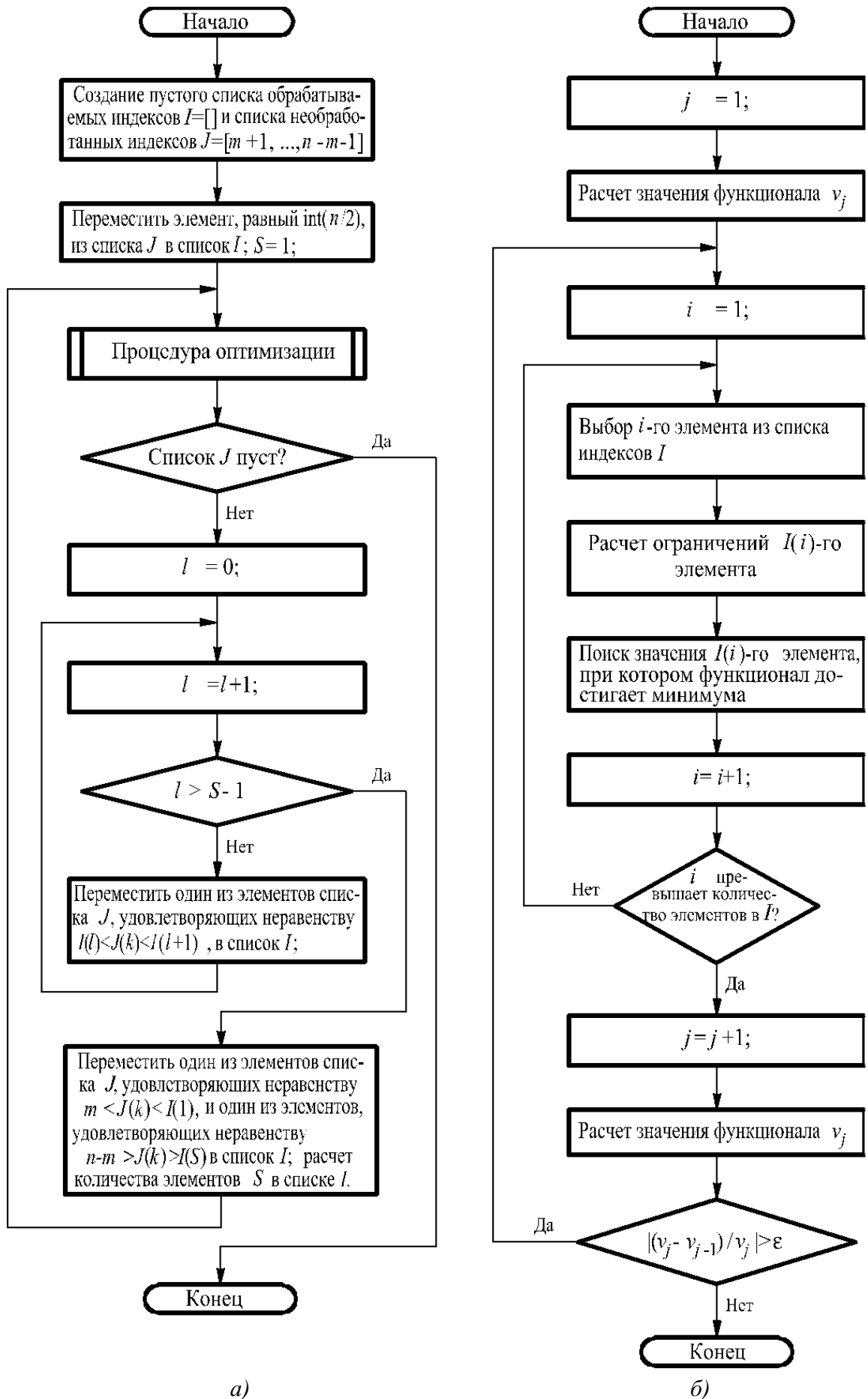


Рис. 3.1. Схема алгоритма оптимизации закона управления электроприводом. Схема алгоритма а, процедура оптимизации б.

минимальных X_{\min} значений варьируемой переменной, ограничения максимального dX_{\max} и минимального dX_{\min} значений первой производной, количество точек расчёта n и длительность интервала оптимизации T . В этом же скрипте должна быть составлена матрица X , в которой после выполнения процедуры оптимизации `optz` будет содержаться приближенное решение вариационной задачи. Единственное требование, предъявляемое к этой матрице, состоит в том, что она должна удовлетворять начальным и конечным условиям. Отображение результатов оптимизации осуществляется скриптом `PlotOpt.m` (листинг 3.11).

3.3. Оптимизация закона управления ножницами

Оптимизация закона управления приводом ножниц заключается в выборе такого закона, который обеспечил бы минимальные потери энергии за ход ножниц. В зависимости от положения ножа можно выделить две зоны регулирования, в каждой из которых должен действовать свой алгоритм управления: зону разгона и резки листа и зону торможения. В первой зоне требуется за заданный промежуток времени разогнать привод и осуществить рез. Во второй зоне нож должен пройти оставшуюся до исходного положения часть пути за промежуток времени, величину которого можно произвольно изменять в больших пределах без снижения производительности всего комплекса резки. Выбор закона управления в зоне разгона и реза является задачей с неподвижными границами, конкретное значение продолжительности этой зоны зависит от ширины разрезаемого проката, направления движения ножа и расположения борта рольганга, у которого выравнивается прокат. Поскольку продолжительность зоны торможения может варьироваться в широких пределах, то эта задача является задачей с подвижными границами.

Оптимизированный функционал имеет вид

$$v = \int M_{\text{Д}} \dot{\alpha}_a + \Delta P_{\text{эл}} \left(\frac{M_{\text{Д}}}{u}, u \dot{\alpha}_a \right) dt,$$

где $M_{\text{Д}}$ — момент двигателя, приведённый к кривошипному валу; u — передаточное число редуктора механизма резания; $\Delta P_{\text{эл}}$ — мощность электрических потерь в зависимости от режима работы двигателя (электромагнитного момента

и скорости ротора). Дифференциальное уравнение, связывающее двигательный момент на валу кривошипа с углом поворота кривошипа

$$M_{\text{Д}} = J(\alpha_a) \cdot \ddot{\alpha}_a + \frac{\partial J(\alpha_a)}{\partial \alpha_a} \cdot \frac{\dot{\alpha}_a^2}{2} - M_c(\alpha_a),$$

где M_c — момент сопротивления на кривошипном валу; J — момент инерции, приведённый к кривошипному валу.

К каждой из зон был применён алгоритм оптимизации. Причём для второй зоны были рассчитаны функционалы для нескольких длительностей цикла резки. Графики отработки задания положения приведены на рис. 3.2. Зависимость энергозатрат от длительности цикла резки приведена на графике рис. 3.3. Из графика видно, что оптимальным с точки зрения энергозатрат является вариант с длительностью цикла $t_{\text{ц}} = 4,8$. Структура системы управления однокривошипных ножниц приведена на рис. 3.4.

3.4. Автоматическая оптимизация бокового зазора

Образование заусенцев на кромке листа зависит от бокового зазора между ножами δ , затупления ножей r , механических свойств и геометрических размеров проката, его температуры и т. д. Из всех вышеуказанных параметров непосредственной регулировке поддаётся только боковой зазор. Его оптимальная величина зависит как от свойств проката, так и от состояния инструмента. Установлено, что при оптимальном зазоре усилие реза минимально, а при отклонении от оптимального значения, оно возрастает на 10...15%.

На сегодняшний день, боковой зазор устанавливается оператором по таблицам, составленным на основе опытных данных. В них учитывается только материал разрезаемого листа и его толщина. Из-за больших распорных усилий во время резки, могут возникать деформации в станине ножниц, приводящие к увеличению бокового зазора. Величина деформации зависит от конструктивных параметров ножниц. Кроме того, по мере износа механизма резания, в частности клиньев механизма регулировки зазора, боковой зазор может увеличиваться [61]. Т. о. при резке в реальных условиях оптимальная величина выставяемого зазора $\delta_{\text{опт}}$ может несколько отличаться от табличного значения. В связи с

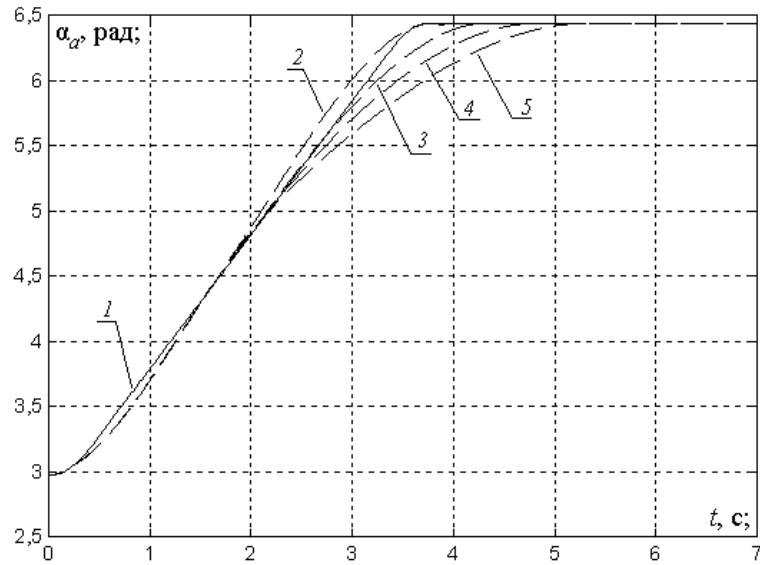


Рис. 3.2. Графики законов управления с различными временами.

1 — отработка заданного положения при проектном варианте управления; 2, 3, 4 и 5 — энергозатраты при оптимизированных вариантах управления.

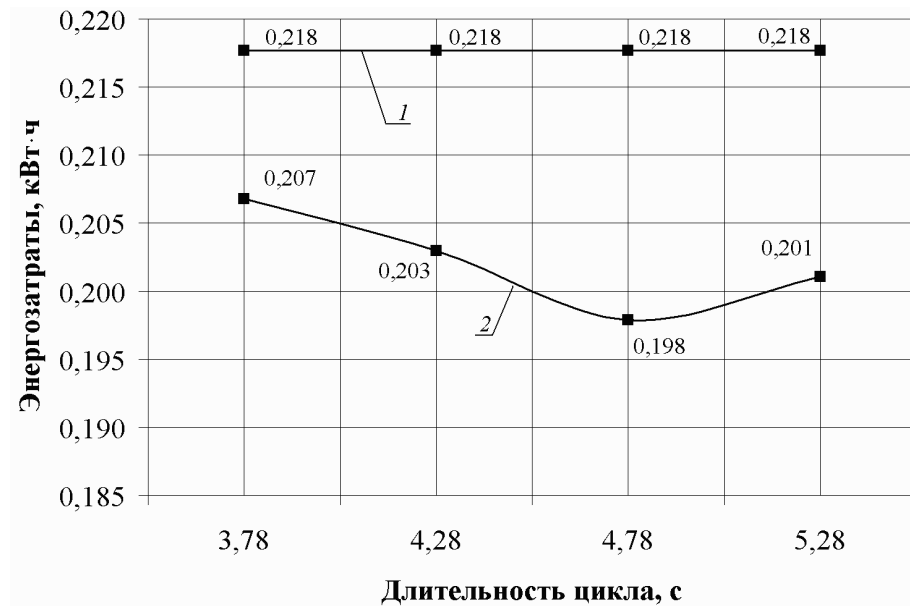


Рис. 3.3. Зависимость энергозатрат за цикл резки от длительности цикла. 1 — энергозатраты при проектном варианте управления; 2 — энергозатраты при оптимизированных вариантах управления.

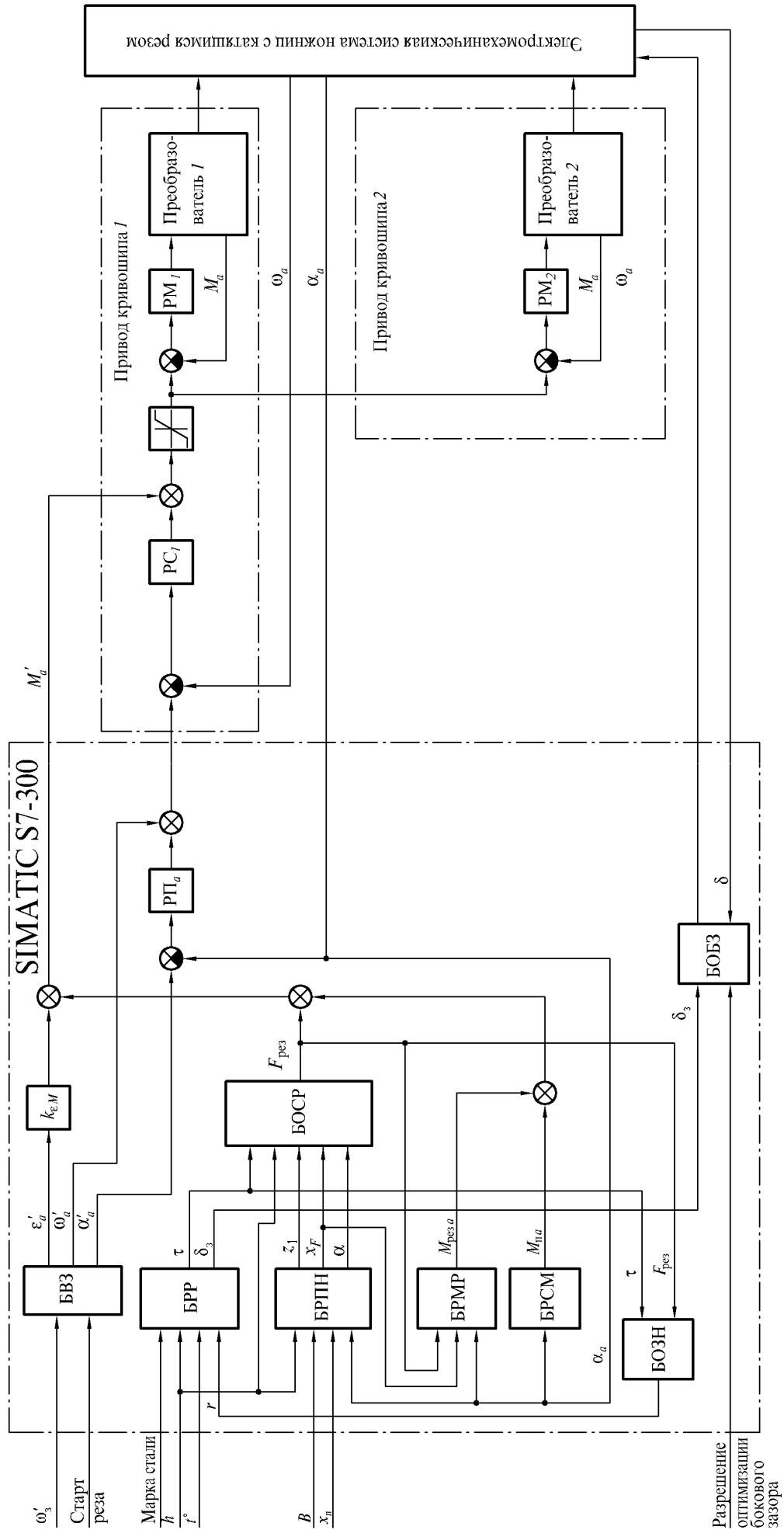


Рис. 3.4. Функциональная схема системы управления однокривошипными ножницами.

этим встаёт задача автоматической подстройки выставляемого зазора под конкретные условия резки.

Автоматическая оптимизация может производиться по усилию реза $F_{рез}$. При использовании однокривошипных ножниц или двухкривошипных с механической синхронизацией вместо $F_{рез}$ можно минимизировать момент реза, который равен развиваемому двигателем моменту за вычетом момента холостого хода. Момент холостого хода включает момент потерь механизма и момент от неуравновешенных масс. Поскольку момент от неуравновешенных масс не зависит от усилия реза, а момент потерь, обусловленный трением, с ростом усилия возрастает, то минимизация момента двигателя обеспечит и минимизацию усилия реза. Момент двигателя может быть косвенно определён по активной составляющей тока двигателя, для чего при использовании современных ПЧ не требуется дополнительного оборудования, т. к. в них встроена возможность её расчёта.

Следует отметить, что из-за малой точности и большой дискретности (по времени) измерения активного тока этот метод может оказаться неточным, что особенно будет заметно при резке тонких листов, когда значение $F_{рез}$ невелико. При использовании двухкривошипных ножниц с электрической синхронизацией вычисление $F_{рез}$ будет усложняться взаимным влиянием кривошипов механизма резания, и из-за наличия механических помех может оказаться невозможным определение $F_{рез}$ с требуемой точностью. Лучшим способом является непосредственное измерение усилия реза с помощью мездоз, которые можно разместить в расточке суппорта над верхней гранью кассеты верхнего ножа. Это позволит избавиться от большей части механических помех.

Поскольку усилие реза зависит от длины отрезаемого листа, то использовать нужно измерения, полученные при резке листов длиной, составляющей не менее 15 – 20 толщин листа (при резке листов толщиной $h = 50$ мм длина отрезаемого листа должна составлять как минимум 750–1000 мм). Соответственно, данные, снятые при обрезке передних концов раската, длина которых не превышает 0,5 м, не должны учитываться алгоритмом оптимизации. При обрезке

заднего конца выполнять оптимизацию бокового зазора можно, т. к. задний конец плотно прижат к столу ножниц прижимом листа.

Т. к. усилие реза зависит от положения точки врезания A ножа в лист, и конкретный вид этой зависимости определяется механическими свойствами и размерами листа, то измерять $F_{\text{рез}}$ нужно тогда, когда начинается установившийся процесс резки. Его начало происходит, когда нож врежется на величину $0,8h \operatorname{ctg} \alpha$, и закончится, когда точка A будет находиться на расстоянии $0,7h \operatorname{ctg} \alpha$. При угле реза $\alpha = 3^\circ$ и толщине листа $h = 50$ мм измерение усилия должно выполняться, когда точка врезания находится на расстоянии 800 мм от края листа, с которого начался рез, и на расстоянии 700 мм от противоположного. Из этого следует, что измерения $F_{\text{рез}}$, полученные при резке листов шириной, не превышающей 1500 мм, не должны учитываться алгоритмом оптимизации. При резке более тонких листов установившийся процесс резки начинается раньше, и минимальная ширина, при которой допустимо использовать измерения $F_{\text{рез}}$, будет меньше. Из-за неточной реализации траектории качения, $F_{\text{рез}}$ при установившемся процессе резки будет несколько изменяться. Поэтому, его измерения должны выполняться, когда нож занимает одно и то же положение. Для резов, которые не будут использоваться в оптимизации должен устанавливаться зазор, найденный как оптимальный (с наименьшим значением $F_{\text{рез}}$).

При разработке алгоритма оптимизации бокового зазора были учтены следующие положения [27].

- Ориентировочное значение бокового зазора, соответствующее минимуму известно заранее (из существующих опытных таблиц), и шаг изменения бокового зазора при поиске оптимального значения не должен быть слишком большим, чтобы не ухудшить существенно качество реза.
- Поиск зазора происходит в постепенно меняющихся от реза к резу условиях, что обусловлено остыванием металла, затуплением ножей, износом механизма резания.

3.4.1. Алгоритм оптимизации бокового зазора

Схема алгоритма оптимизации приведена на рис. 3.5 и 3.6, а его реализация в пакете MATLAB — в листинге 3.5. Резке может подвергаться прокат разной толщины и температуры ножами с произвольным затуплением. Поэтому, целесообразно приводить измеренное усилие резки к резу в определённых условиях. Усилие пропорционально квадрату толщины листа (см. формулу (1.12)). При малых значениях α можно считать, что $F_{\text{рез}}$ обратно пропорционально $\text{tg } \alpha$. Отклонение от этой зависимости при небольших пределах изменения α существенного влияния на работу алгоритма оптимизации не окажет. Для получения качественной резки температура листа должна находиться в определённом диапазоне, в пределах которого можно выделить несколько поддиапазонов, в которых свойства металла (а следовательно, как $F_{\text{рез}}$, так и $\delta_{\text{опт}}$) практически не меняются, и проводить оптимизацию зазора для каждого из них в отдельности. Приведённое усилие реза $F_{\text{пр}}$ вычисляется по формуле

$$F_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{рез}} \text{tg } \alpha}{h^2(1 + \Delta F(h, r))},$$

где $\Delta F(h, r)$ — эмпирический коэффициент, учитывающий увеличение $F_{\text{рез}}$ в зависимости от затупления ножей и толщины листа. Опытные зависимости $\Delta F(h, r)$ приведены на рис. 1.20.

Алгоритм (АЛГ1.2), рассчитывающий увеличение усилия резки ΔF вследствие притупления ножей, осуществляет линейную интерполяцию функции двух переменных, заданной таблицей экспериментально снятых данных.

Поскольку величина оптимального выставляемого зазора зависит нелинейно от h , r и t , то выделяется несколько диапазонов толщин, затуплений ножей и температур, в пределах которых оптимальная величина относительного зазора считается постоянной, и оптимизация для каждого из этих диапазонов производится в отдельности. Чтобы обеспечить высокую точность оптимизации при небольшом количестве диапазонов толщин, оптимизируется относительная величина зазора $\delta_{\text{отн}} = \delta/h$.

В процессе измерения $F_{\text{рез}}$ возможно появление случайных помех, вызванных например вибрацией механизма резания. Поэтому должно производиться

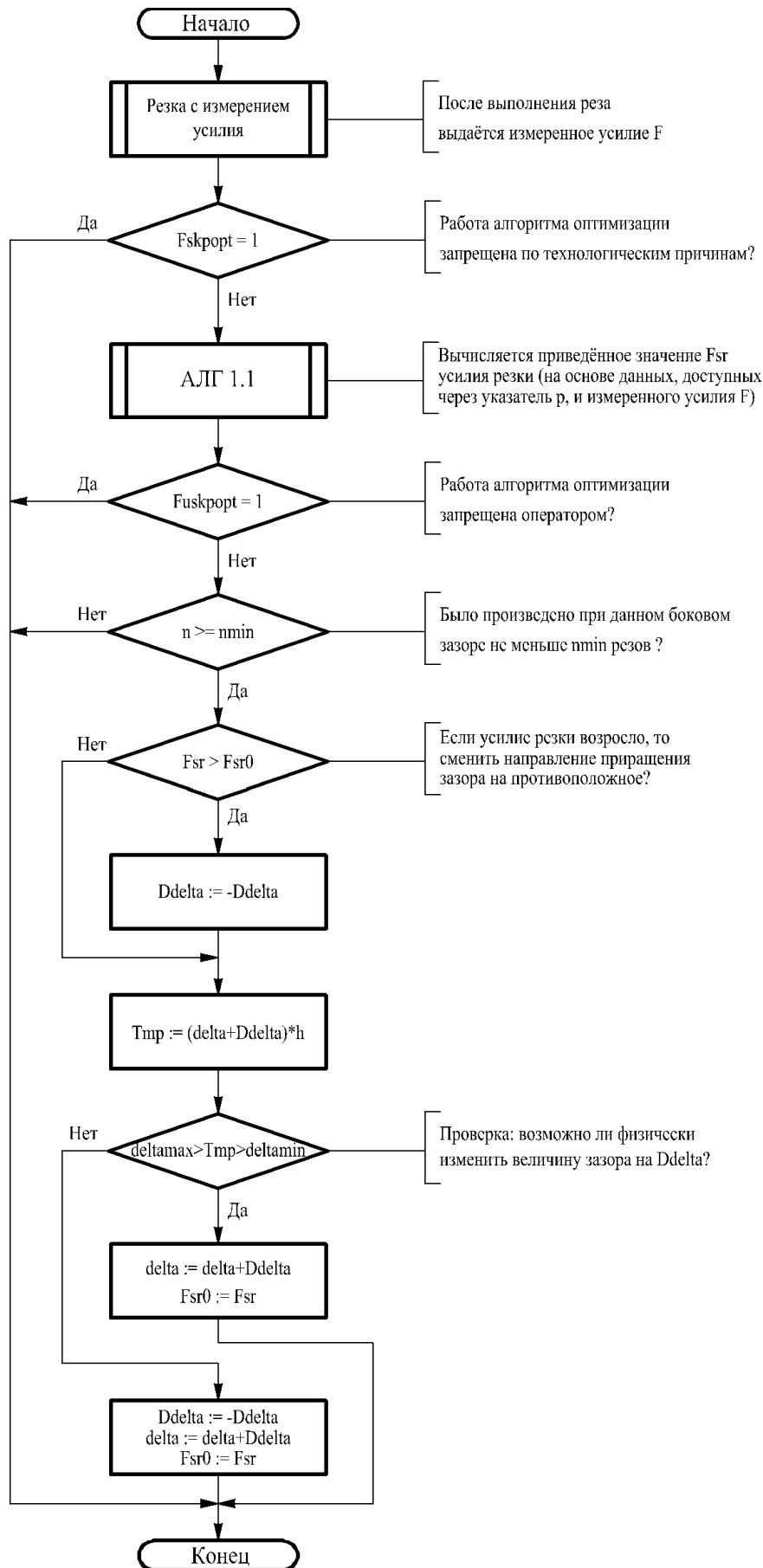


Рис. 3.5. Алгоритм оптимизации приведённого усилия резки.

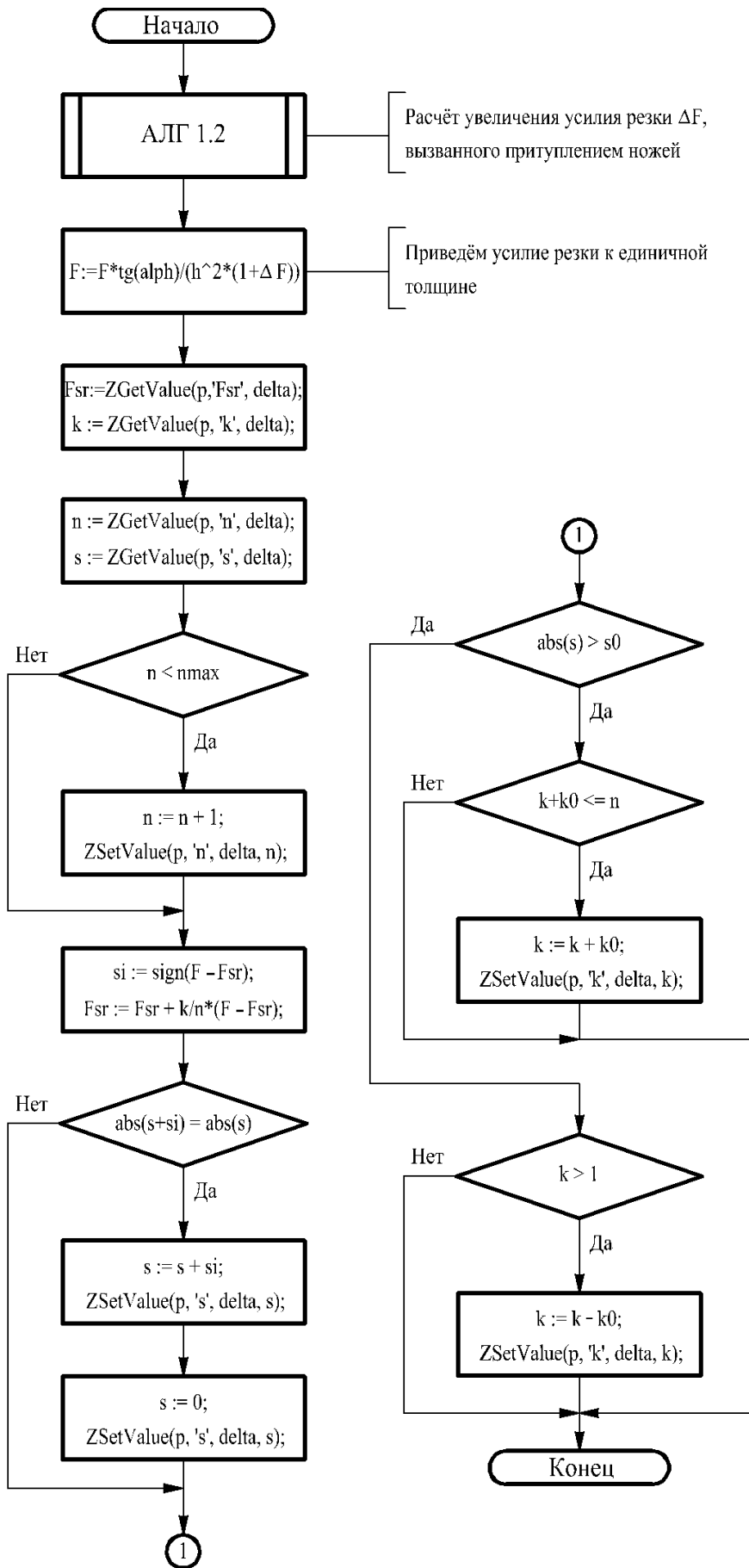


Рис. 3.6. Алгоритм расчёта приведённого усилия резки (АЛГ1.1).

усреднение измерений $F_{рез}$. Изменение бокового зазора при поиске оптимального значения должно разрешаться только тогда, когда для данного зазора накоплен статистика (осуществлено не менее n_{min} резов).

В том случае, когда в процессе оптимизации зазор достиг максимального или минимального значения, шаг меняется от реза к резу, т. к. из-за случайной помехи может произойти слишком сильное отклонение среднего значения усилия резки и алгоритм может «застрять» на значениях минимального или максимального зазора.

Из-за постепенного износа механизма резания происходит медленное изменение оптимальной величины выставяемого зазора δ_{opt} , поэтому алгоритм оптимизации должен работать непрерывно, даже после того, как оптимальное значение найдено.

Обычно резке подвергается прокат различных видов, причём конкретный вид может длительное время не резаться, и поэтому изменение параметров ножиц может с точки зрения алгоритма быть скачкообразным. Для ускорения адаптации алгоритма к новым условиям можно ограничивать число учитываемых измерений $F_{рез}$ и при выявлении тенденции уменьшения (или увеличения) среднего значения усилия резки $F_{пр}$ увеличивать удельный вес последних измерений.

Среднее значение усилия резки F_{cp} после i -го реза определяется по выражению

$$F_{cp i} = \frac{\sum_{k=1}^i F_{пр k}}{i} = \frac{F_{cp i-1} \cdot (i-1) + F_{пр i}}{i} = F_{cp i-1} + \frac{F_{пр i} - F_{cp i-1}}{i}.$$

Для усечения количества последних измерений до n_{max} потребовалось бы хранить n_{max} измерений, что не рационально с точки зрения памяти, более подходящий способ — ограничивать рост параметра i величиной n_{max} .

Увеличение удельного веса последних измерений целесообразно производить, когда в течение последних s_0 резов F_{cp} монотонно возрастало или монотонно убывало. Это увеличение можно производить коэффициентом k , вычисляя F_{cp} по формуле

$$F_{cp} = F_{cp} + \frac{k}{i} \cdot (F_{пр} - F_{cp}),$$

где коэффициент k определяется по выражению

$$k = \begin{cases} k + k_0, & \text{при } |s| > s_0 \text{ и } k + k_0 \leq i, \\ k - k_0, & \text{при } |s| < s_0 \text{ и } k > 1, \\ 1, & \text{иначе;} \end{cases}$$

параметр s определяется по выражению

$$s = \begin{cases} s + \text{sign}(F_{\text{пр}} - F_{\text{сп}}), & \text{при } |s + \text{sign}(F_{\text{пр}} - F_{\text{сп}})| > |s|, \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

k_0 — шаг роста коэффициента k .

3.4.2. Организация базы данных оптимальных зазоров

На основе измеренных данных строится база данных (БД), содержащая для каждой марки стали ряд величин оптимального бокового зазора при конкретных условиях резки (толщине и температуре проката, величине затупления ножей). Работа с БД организуется с помощью процедур `ZGetPointer`, `ZGetValue`, `ZSetValue` и `ZGetOptDelta` (листинги 3.1 — 3.4). БД включает в себя несколько переменных: `BDZ` — массив записей зазоров; `rs` — массив величин притуплений ножей; `Dr` — разброс радиусов затупления ножей; `Dh` — разброс толщин.

Элементы массива структур `BDZ` содержат поля: `BDZ(im).Marka` — название марки; `BDZ(im).hmin` — минимальная толщина, начиная с которой, разрешается оптимизация бокового зазора; `BDZ(im).DT` — диапазон температур, в пределах которого механические свойства разрезаемого листа меняются незначительно; `BDZ(im).hs` — массив диапазонов толщин, подвергавшихся резке; `BDZ(im).hDat` — массив данных для каждой толщины. Здесь `im` — индекс марки стали.

Поле `hDat` представляет собой массив структур той же размерности что и массив `hs`, содержащих два поля: `hDat(ih).Ts` — массив диапазонов температур листов, подвергавшихся резке; `hDat(ih).TDat` — массив данных, для каждого диапазона. Здесь `ih` — индекс диапазона толщин.

Поле `tDat` является двумерным массивом структур, содержащим два поля: `TDat(iT, ir).deltas` — массив боковых зазоров, которые подвергались

испытаниям; `TDat(it, ir).deltaDat` — массив данных при резке с заданным боковым зазором. Первый индекс `it` — индекс температур, а второй — `ir` — индекс степени затупления ножа.

Поле `deltaDat` содержит рабочую информацию алгоритма оптимизации в виде массива полей `deltaDat(id).Fsr` — среднее значение приведённого усилия резки, `deltaDat(id).n` — число резов с зазором `delta`, `deltaDat(id).k` — коэффициент ускорения сходимости, `deltaDat(id).s` — количество идущих подряд последних резов, изменивших значение поля `Fsr` в одном направлении. Здесь `id` — индекс зазоров.

Процедура `p=ZGetPointer(Mark, t, h, r)` (листинг 3.1) выдаёт указатель `p` на запись БД с данными условиями резки (маркой стали `Mark`, температурой `t`, толщиной проката `h` и оценкой радиуса режущей кромки `r`). Если найдена запись, удовлетворяющая всем параметрам, то выдаётся указатель на неё. Если найдена запись, удовлетворяющая параметрам `Mark` и `h`, но не удовлетворяющая `t`, то создаётся новая запись, в которую копируются данные из записи соответствующей наиболее близкому к `t` значению. Если найдена (или создана) запись, удовлетворяющая всем параметрам кроме `r`, то создаётся новая запись, в которую копируются данные из удовлетворяющей `t` записи, соответствующей наиболее близкому к `r` затуплению ножей. Если нет записи, удовлетворяющей хотя бы одному из параметров `Mark` или `h`, то создаётся новая запись, при этом выдаётся запрос оператору на ввод оптимального бокового зазора. Если запись не удовлетворяет `Mark`, то кроме этого, выдаётся запрос на ввод температурного диапазона `DBZ.DT`, в пределах которого механические свойства проката мало меняются, а также минимальной толщины `DBZ.hmin`, начиная с которой, разрешается оптимизация.

Процедура `v=ZGetValue(p, 'var', delta)` (листинг 3.2) выдаёт значение `v` переменной `var` для бокового зазора `delta`. Если для зазора `delta` нет записи в БД, то создаётся новая запись. Строка `var` должна иметь одно из следующих значений: `Fsr` — среднее значение усилия резки при зазоре `delta`; `n` — число резов с зазором `delta`; `k` — весовой коэффициент последнего изме-

рения; s — число последних измерений, изменивших среднее усилие в одном направлении. Процедура `ZSetValue(p, 'var', delta, v)` (листинг 3.3) устанавливает значение переменной `var` в значение `v`. Если для зазора `delta` нет записи в БД, то создаётся новая. Оптимальное значение бокового зазора возвращается процедурой `delta=ZGetOptDelta(p)` (листинг 3.4).

Поскольку диапазон степеней затупления ножей известен заранее, и для всех марок сталей он одинаков, то его хранят в отдельном массиве `rs`.

3.4.3. Оценка затупления ножей

При реализации данного алгоритма следует уделить внимание величине притупления ножей, которое оказывает существенное влияние на величину $F_{\text{рез}}$. Аппаратно производить контроль притупления довольно сложно. Оценить его можно на основе данных о числе резов, произведённых после смены ножей, их стойкости, зависящей от материала ножей и способа обработки, механических свойств и размеров разрезаемого проката

Для ножей из определённой марки стали и способа обработки величина затупления r_i после i -го реза зависит от степени затупления ножа перед резкой r_{i-1} , толщины разрезаемого листа h_i и зависимости сопротивления резанию от внедрения ножа $\tau_i(\varepsilon)$. Зависимость r_i от r_{i-1} нелинейна, также как и зависимость r_i от силы реза, приходящейся на единицу длины ножа. Из последнего утверждения следует, что во-первых затупление зависит нелинейно от толщины проката, а во-вторых затупление зависит не от среднего или максимального значения сопротивления резу, а от всей функции $\tau(\varepsilon)$, другими словами от материала разрезаемого при i -ом резе листа.

Для оценки затупления ножей необходимо экспериментально определить зависимость приращения затупления ножей Δr от толщины листа, и степени затупления ножей перед резом для обрабатываемых резкой марок стали. На основе этих данных можно будет выполнить оценку затупления ножей после n -го реза по формуле

$$r_n = \sum_{i=1}^n \Delta r_i(h_i, r_{i-1}).$$

Если на ножницы устанавливаются заточенные ножи, то $r_0 = 0$. В литературе исследований, посвящённых стойкости ножей гильотинных ножниц, обнаружить не удалось. Проведение самостоятельных экспериментальных исследований, по этому вопросу выходит за рамки данной диссертационной работы.

3.4.4. Анализ функционирования алгоритма оптимизации бокового зазора

В пакете MATLAB были реализованы алгоритмы оптимизации и управления базой данных, а также было выполнено моделирование его работы для двух случаев: а) когда измеренное усилие резки точно соответствует реальному усилию; б) когда измеренное значение $F_{рез}(\delta)$ отличается от реального на случайно изменяющуюся от реза к резу величину, не превышающую 3% от $F_{рез}$. В обоих случаях рассматриваются следующие режимы работы алгоритма: 1) поиск оптимального зазора, когда зависимость $F_{рез} = F_{рез}(\delta)$ не изменяется с течением времени (начальный набор статистики) рис. 3.7 и 3.8; 2) когда уже накоплена некоторая статистика, отслеживание плавного изменения $\delta_{опт}$ рис. 3.9 и 3.10 (это соответствует изменению параметров ножниц при эксплуатации, например, износу клиньев устройства регулировки бокового зазора); 3) при уже накопленной статистике, скачкообразное изменение $\delta_{опт}$ рис. 3.11 (что соответствует случаю, когда ножницы длительное время не резали прокат с данными параметрами, и параметры ножниц за это время изменились); 4) постепенный рост измеряемого усилия резки при сохранении величины оптимального зазора постоянной рис. 3.12 (это соответствует постепенному затуплению ножей или изменению параметров датчика усилия); 5) скачкообразное изменение измеряемой силы реза рис. 3.13.

Измерение силы реза имитировалось скриптом Zreska (листинг 3.6). Из приведённых графиков, иллюстрирующих процесс подстройки зазора видно, что разработанный алгоритм обеспечивает автоматическую минимизацию усилия резки при изменении параметров механизма резания и наличии помех в канале измерения силы реза.

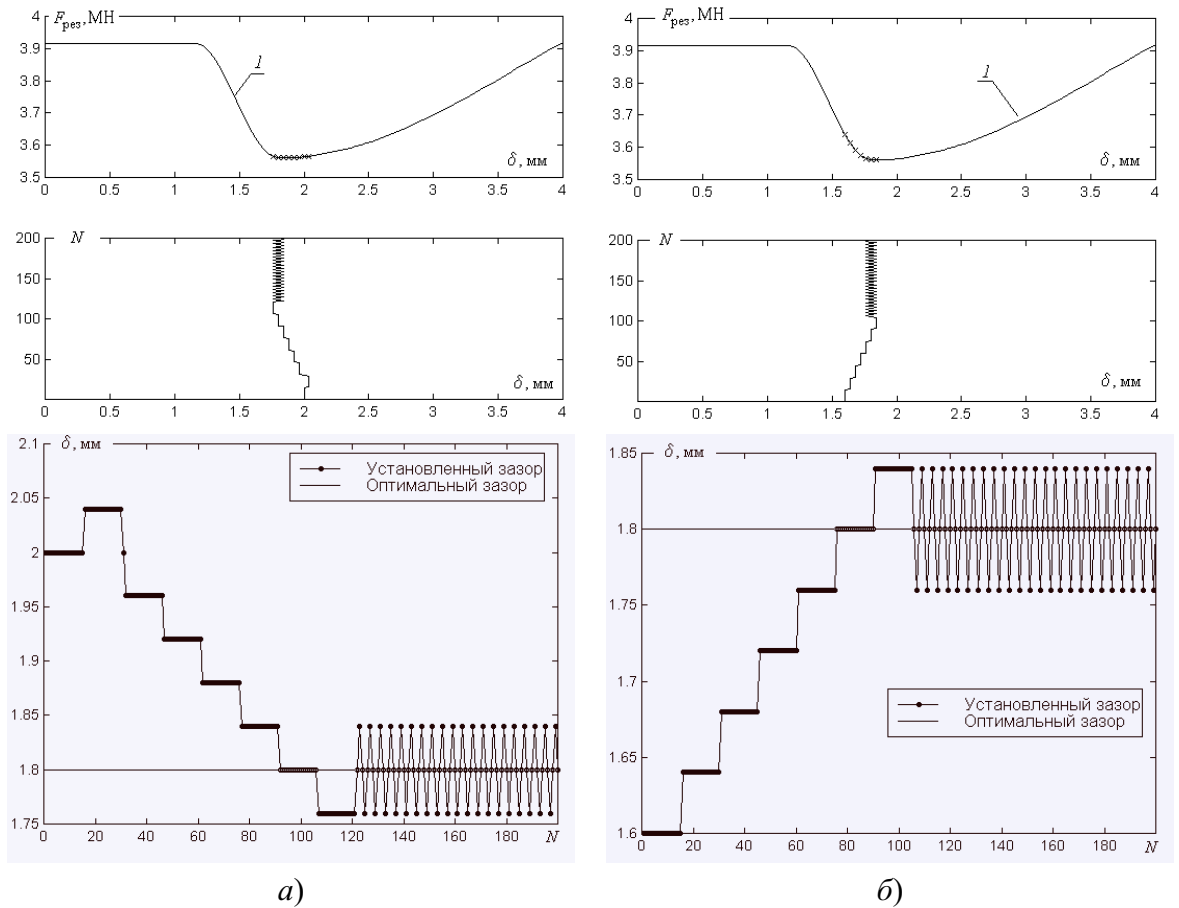


Рис. 3.7. Графики, иллюстрирующие процесс подстройки величины зазора между ножами, когда вначале установленный зазор больше оптимального *а*, и когда начальный зазор меньше оптимального *б*.

На рисунках обозначены $F_{\text{рез}}$ — сила реза, МН; δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов; *l* — кривая изменения силы реза в функции бокового зазора. Символы \times обозначают измеренные значения силы реза. Символы \bullet обозначают величину бокового зазора, при которой производился рез.

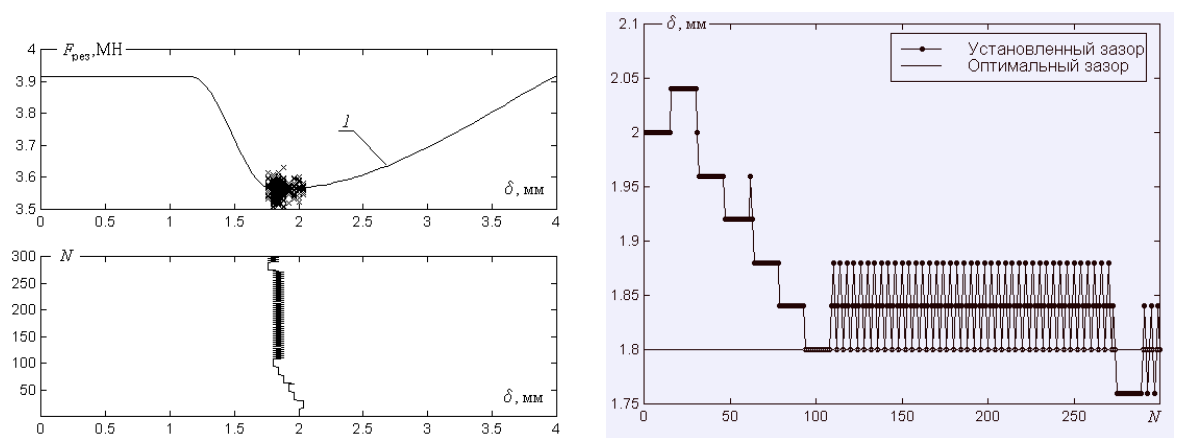


Рис. 3.8. Графики, иллюстрирующие процесс подстройки зазора при наличии помех в измерениях силы.

На рисунках обозначены $F_{\text{рез}}$ — сила реза, МН; δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов; *l* — кривая изменения силы реза в функции бокового зазора. Символы \times обозначают измеренные значения силы реза. Символы \bullet обозначают величину бокового зазора, при которой производился рез.

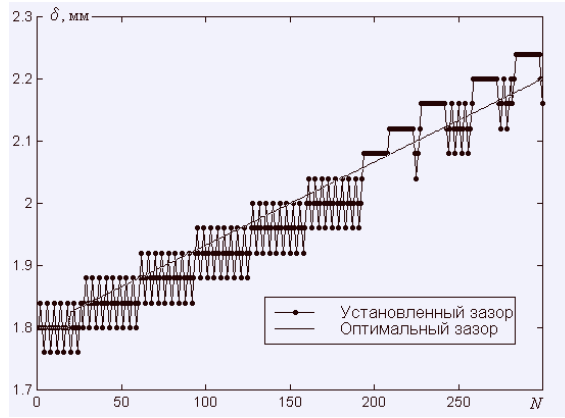


Рис. 3.9. График, иллюстрирующий процесс подстройки зазора при постепенном изменении оптимальной величины бокового зазора.

На рисунке обозначены δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов. Символы \bullet обозначают величину бокового зазора, при которой производился рез.

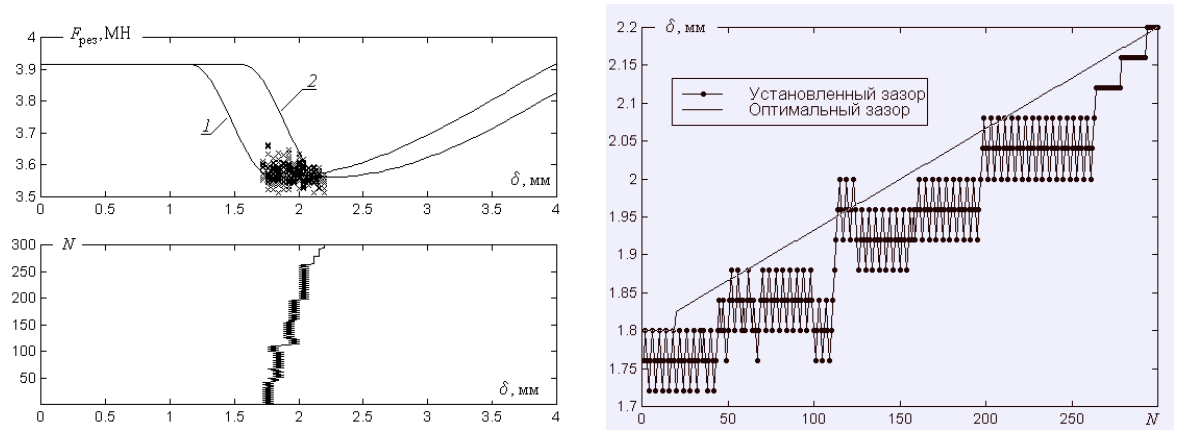


Рис. 3.10. Графики, иллюстрирующие процесс подстройки зазора при постепенном изменении оптимальной величины бокового зазора и наличии помех.

На рисунках обозначены $F_{рез}$ — сила реза, МН; δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов; 1 и 2 — кривые изменения силы реза в функции бокового зазора в начале и в конце работы алгоритма. Символы \times обозначают измеренные значения силы реза. Символы \bullet обозначают величину бокового зазора, при которой производился рез.

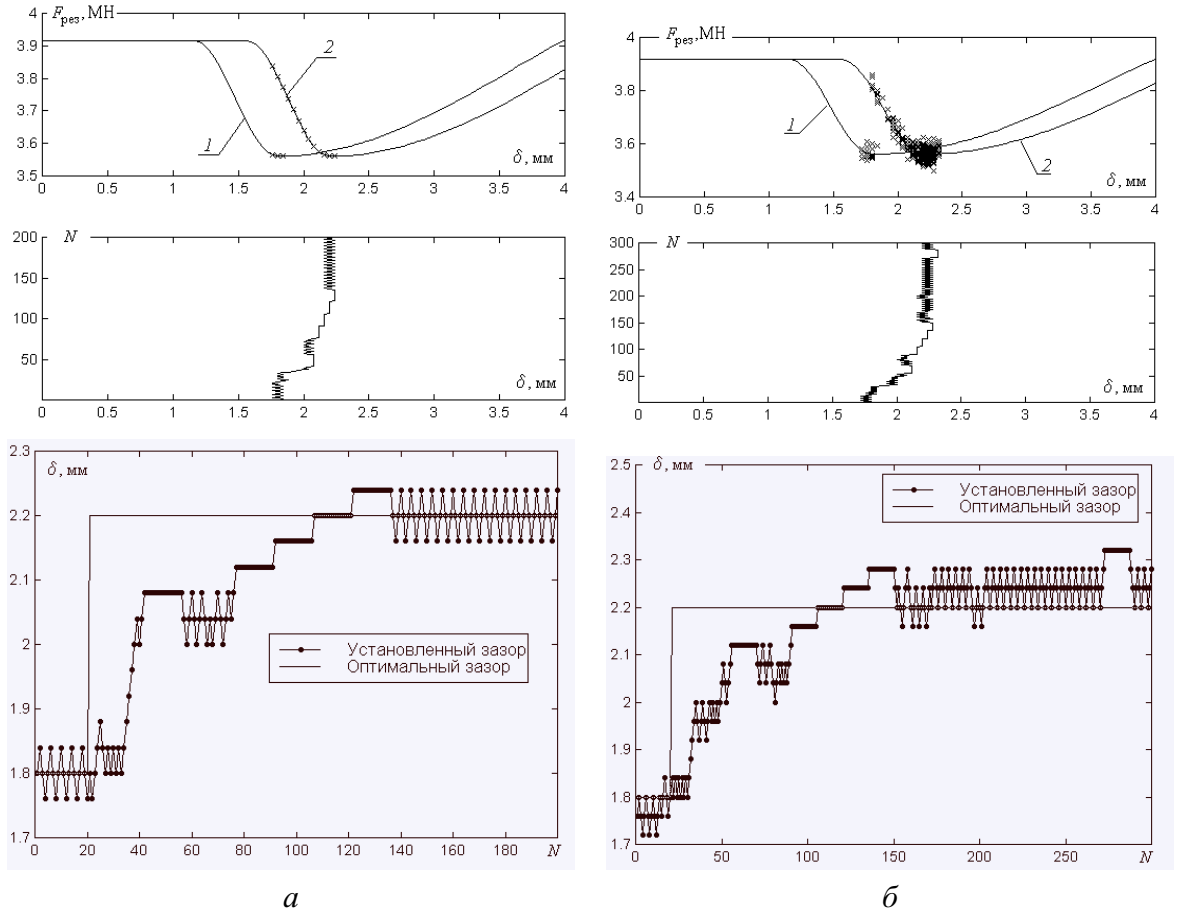


Рис. 3.11. Графики, иллюстрирующие процесс подстройки зазора при скачкообразном изменении оптимальной величины бокового зазора и измерениях усилия реза без помех *а* и с помехами *б*.

На рисунках обозначены $F_{рез}$ — сила реза, МН; δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов; 1 и 2 — кривые изменения силы реза в функции бокового зазора в начале и в конце работы алгоритма. Символы \times обозначают измеренные значения силы реза. Символы \bullet обозначают величину бокового зазора, при которой производился рез.

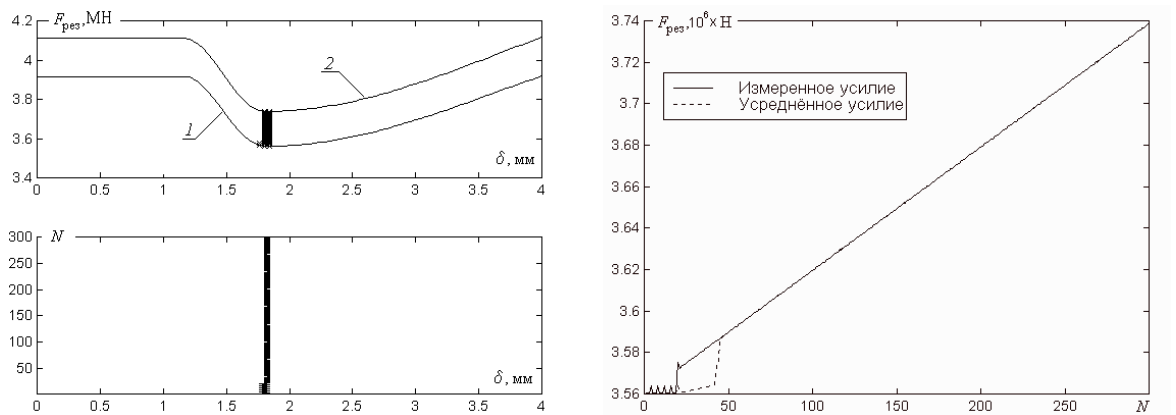


Рис. 3.12. Графики, иллюстрирующие процесс подстройки зазора при линейном изменении измеряемого значения усилия реза и его измерениях без помех.

На рисунках обозначены $F_{рез}$ — сила реза, МН; δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов; 1 и 2 — кривые изменения силы реза в функции бокового зазора в начале и в конце работы алгоритма. Символы \times обозначают измеренные значения силы реза.

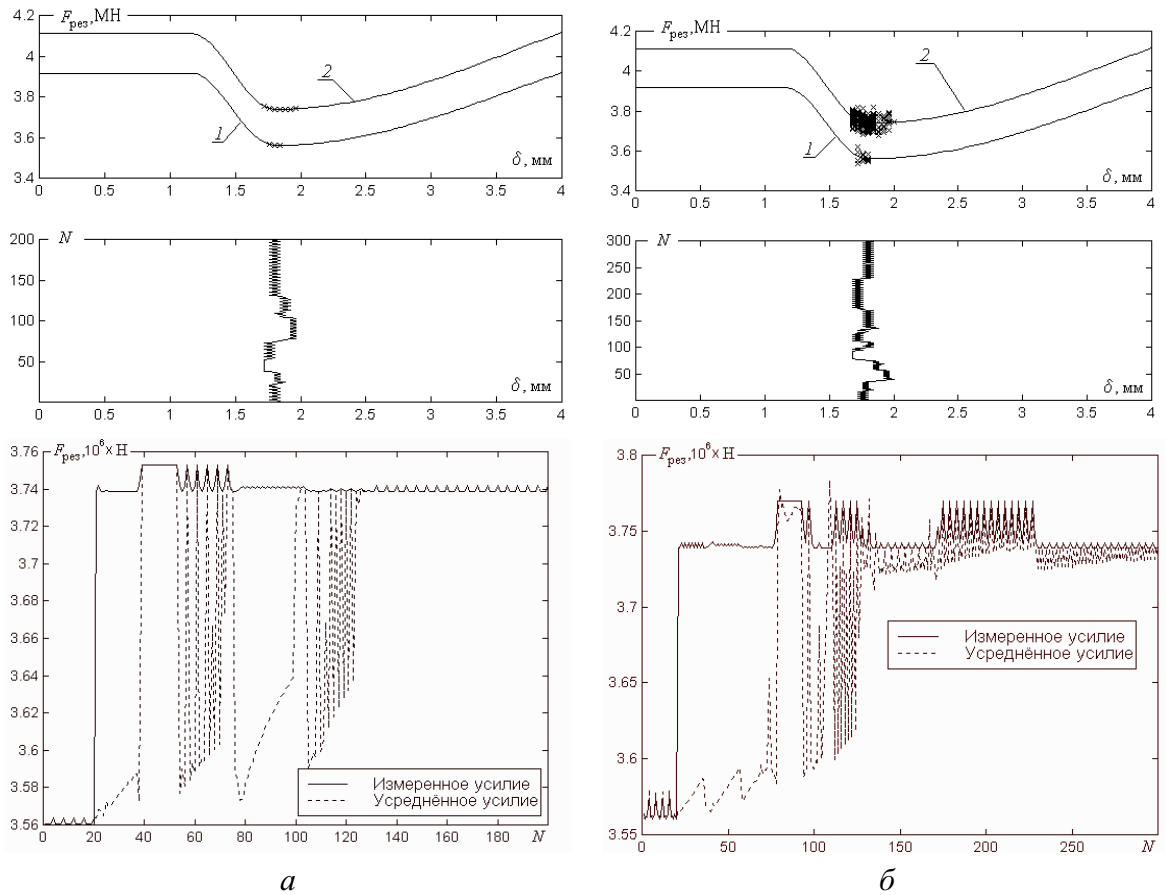


Рис. 3.13. Графики, иллюстрирующие процесс подстройки зазора при скачкообразном изменении измеряемого значения усилия резки и его измерениях без помех *а* и с помехами *б*. На рисунках обозначены $F_{рез}$ — сила реза, МН; δ — боковой зазор между ножами, мм; N — число резов; 1 и 2 — кривые изменения силы реза в функции бокового зазора в начале и в конце работы алгоритма. Символы \times обозначают измеренные значения силы реза.

3.4.5. Система автоматической оптимизации бокового зазора

Фрагмент алгоритма управления ножницами с автоматической оптимизацией бокового зазора (АЛГ 2) приведён на рис. 3.14, 3.15, 3.16 и 3.17, а структура аппаратной реализации системы приведена на рис. 3.18. Функциональная схема системы управления двухкривошипных ножниц с автоматической оптимизацией бокового зазора приведена на рис. 2.51, а однокривошипных — на рис. 3.4. В алгоритме используются следующие переменные: p — указатель на элемент БД для текущего бокового зазора; n_{\max} — максимальное учитываемое число опытов; s_0 — минимальное число опытов, после которых k должен возрасти; deltamin и deltamax — минимальный и максимальный боковой зазор, в метрах; F — усилие, замеренное в процессе реза; Fsr — приведённое усилие реза с установленным боковым зазором; Fsr_0 — приведённое усилие реза с боковым зазором, установленным в предыдущем резе; delta — установленный боковой зазор в долях толщины; Ddelta — шаг приращения бокового зазора в долях толщины; Ddelta_i — начальный шаг изменения бокового зазора в долях толщины. $Fskopt$ — не использовать алгоритм оптимизации;

С ПУ оператора воспринимаются следующие сигналы: F_{newmark} — ввести новую марку стали; F_{newdelt} — ввод нового бокового зазора; F_{ures} — команда на рез; F_{newproc} — сигнал о задаче нового проката; F_{uskopt} — не использовать алгоритм оптимизации по запрету оператора; u_{delta} — заданный боковой зазор.

От других алгоритмов поступают следующие переменные: F_{hskopt} — не использовать алгоритм оптимизации, т. к. толщина разрезаемого проката слишком мала; F_{fskopt} — не использовать алгоритм оптимизации при зачистке переднего конца или порезке остатка проката в обреш; F_{exit} — выход из алгоритма резки.

С датчика положения клиньев устройства регулировки бокового зазора вводится сигнал об выставленном боковом зазоре deltar в метрах. Сброс оценки притупления ножей r производится внешним по отношению к АЛГ 2 алгоритмом, также как и выдача сигнала о прекращении работы алгоритма резки F_{exit} .

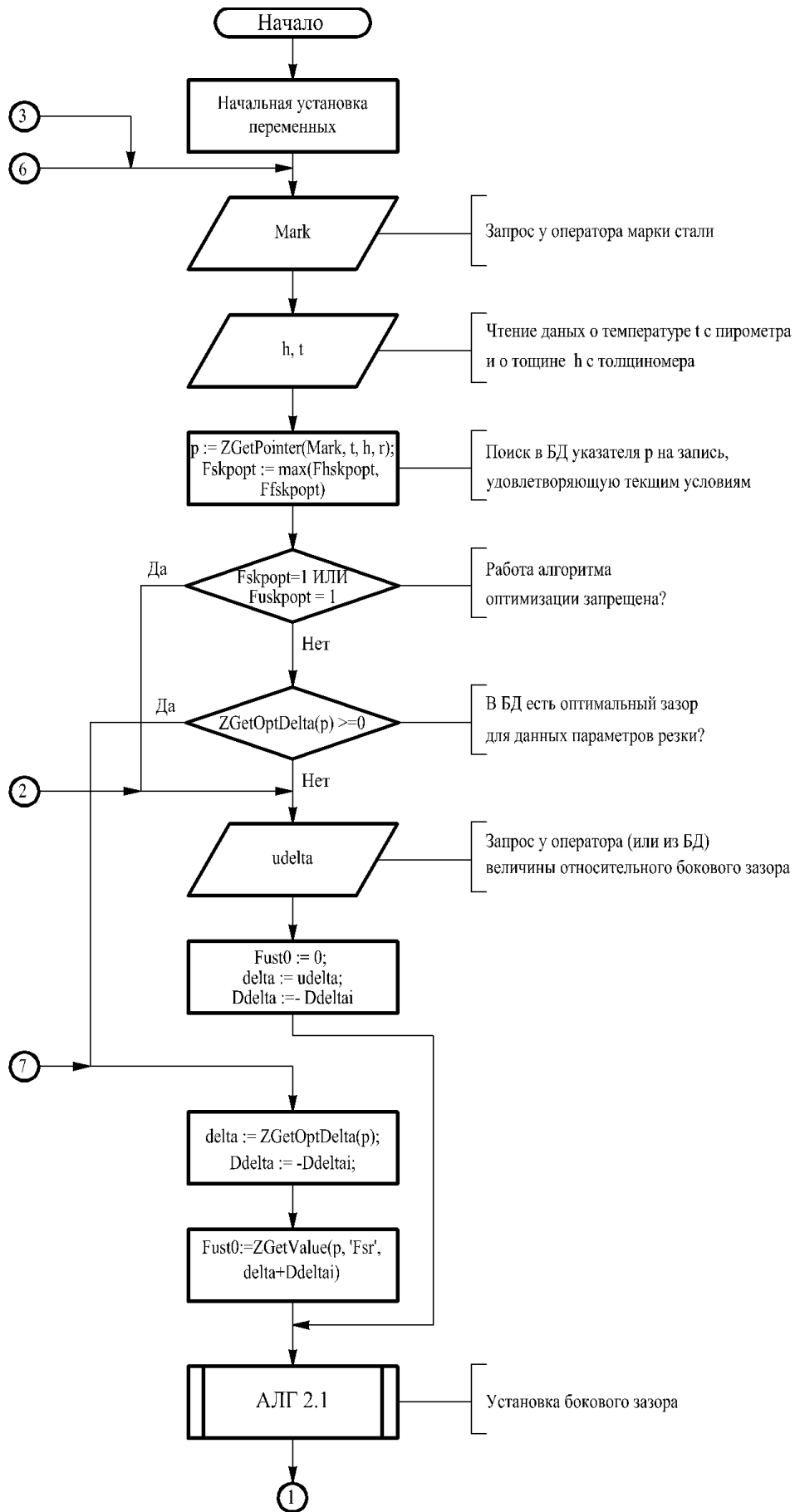


Рис. 3.14. Фрагмент алгоритма управления механизмом резания ножниц с автоматической оптимизацией бокового зазора.

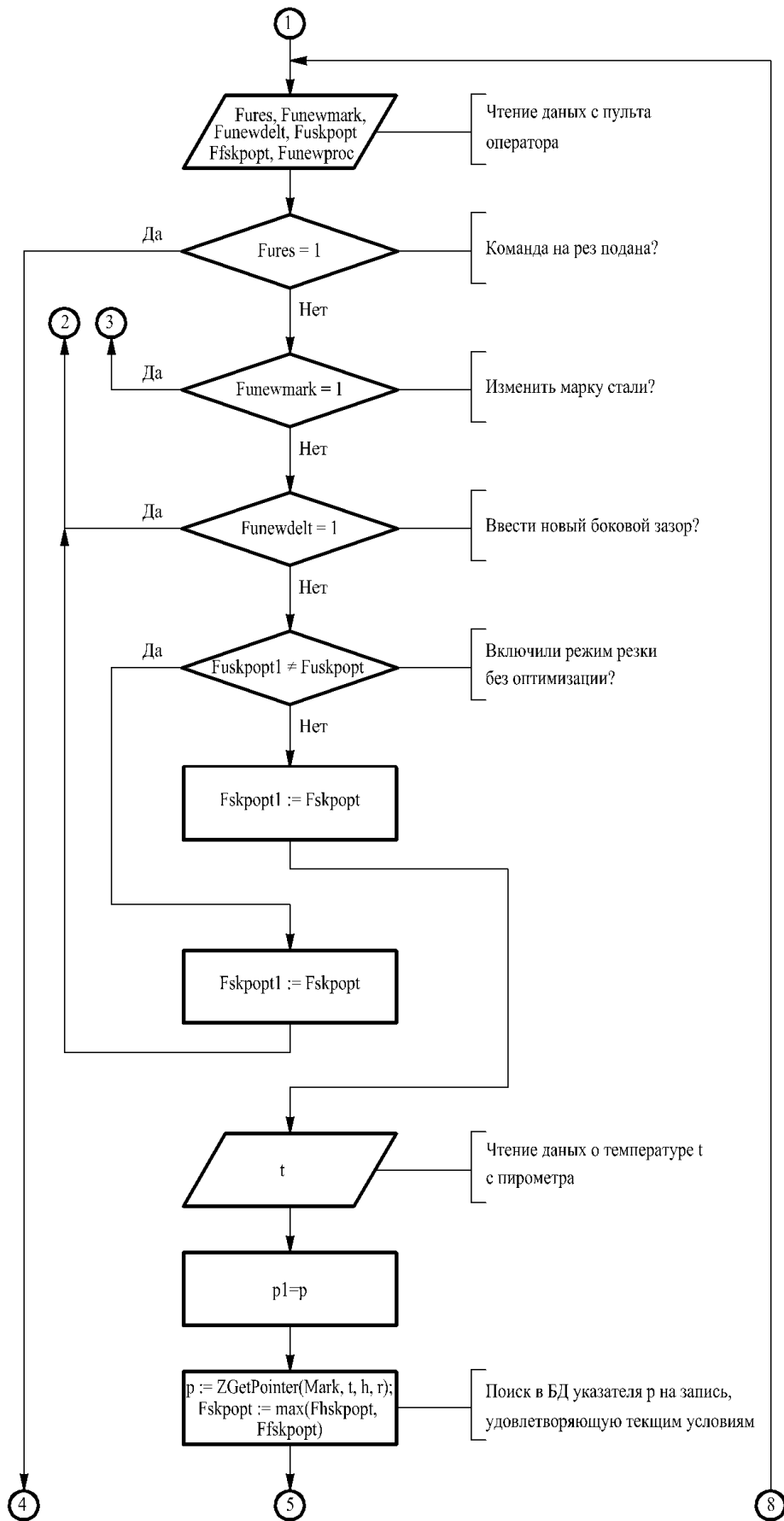


Рис. 3.15. Фрагмент алгоритма управления механизмом резания ножниц с автоматической оптимизацией бокового зазора (продолжение).

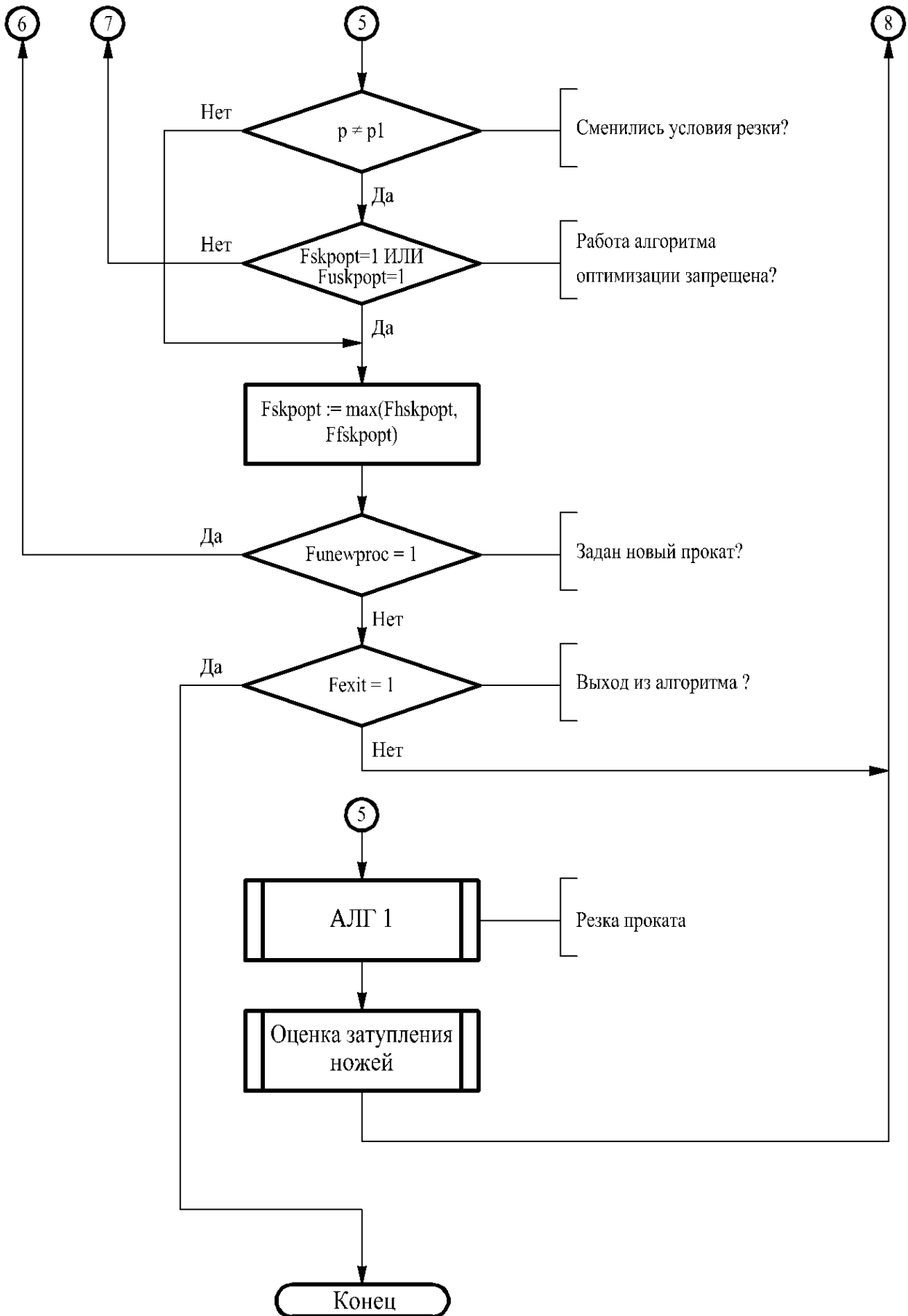


Рис. 3.16. Фрагмент алгоритма управления механизмом резания ножниц с автоматической оптимизацией бокового зазора (окончание).

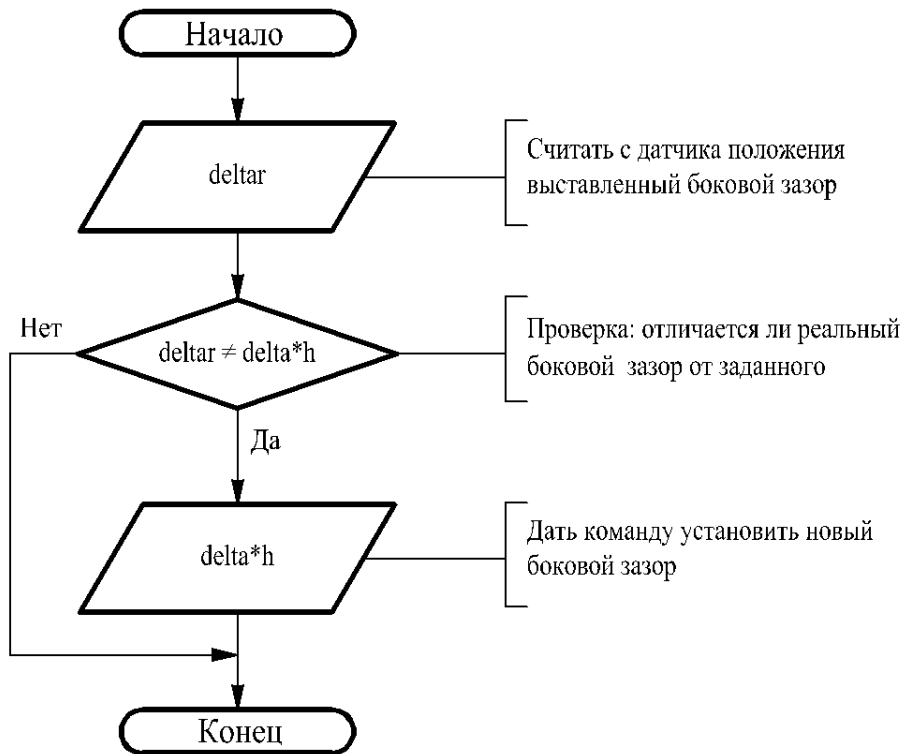


Рис. 3.17. Алгоритм установки бокового зазора (АЛГ 2.1).

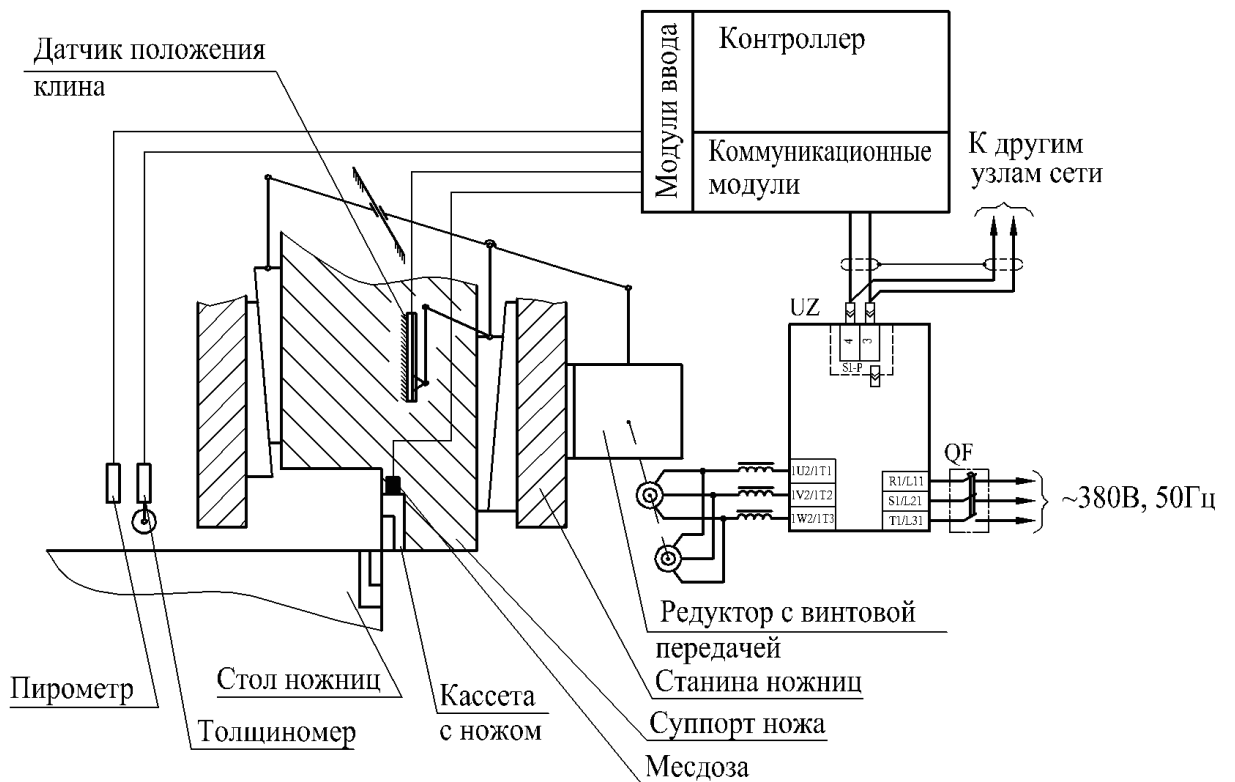


Рис. 3.18. Структура аппаратной реализации системы автоматической оптимизации бокового зазора.

Схема работы системы управления следующая. Оператор вносит в контроллер марку разрезаемого металла. Толщина проката и его температура определяются автоматически толщиномером и пирометром. После чего контроллер ищет оптимальные параметры в БД. Если для данной марки металла и его толщины нет параметров, то оператору выдаётся запрос на ввод ориентировочного бокового зазора.

Боковой зазор можно изменять, когда механизм резания неподвижен. Подача мерной длины листа составляет как минимум 4,5 с (задаётся минимальная мерная длина раската 4,5 м со скоростью 1 м/с, без учёта затрат времени на разгон и торможение). При минимальном шаге подстройки зазора 0,1% толщины проката $h = 50$ мм, скорости регулировки 0,04 мм/с и треугольной диаграмме скорости двигателя время регулирования зазора составит 2,5 с. Таким образом, регулировка бокового зазора может осуществляться во время задачи проката, не снижая производительность участка резки. Данный алгоритм целесообразно реализовывать на языке SCL контроллера SIMATIC S7 300 [69].

3.5. Выводы по главе

1. Разработан алгоритм оптимизации режима управления электроприводом ножниц, учитывающий ограничения накладываемые на варьируемую функцию (угол поворота кривошипа) и на её первую производную по времени (угловую скорость). Алгоритм реализован на языке скриптов MATLAB и позволяет осуществлять минимизацию произвольного функционала. Для оптимизации работы главного привода ножниц использовался функционал, выражающий зависимость энергозатрат за цикл резки от режима управления.

Режим управления главным приводом ножниц был разделён на две зоны. В первой зоне привод осуществляет разгон и резку проката, во второй он осуществляет торможение и остановку кривошипа в исходном положении. Поскольку для производительности комплекса резки не критична длительность второй зоны, то её можно варьировать с целью минимизации энергозатрат. Расчёты показывают, что предложенный метод оптимизации работы ножниц позволяет уменьшить энергозатраты за цикл резки на 9%.

2. Разработан алгоритм автоматической оптимизации бокового зазора между ножами по критерию минимизации энергозатрат, а также структура и процедуры управления базой данных оптимальных зазоров. Предложена аппаратная реализация системы управления с автоматической оптимизацией бокового зазора. В результате анализа выявлено, что использование косвенных измерений усилия резки по получаемой с преобразователя оценке моментов двигателей, не целесообразно в виду низкой точности измерений и сильного влияния возмущений механического и электрического характера на точность измерений. С целью уменьшения влияния помех на работу системы управления оптимальным вариантом является непосредственное измерение усилия резки встраиваемыми в расточку суппорта верхнего ножа месдозами. На основе анализа влияния параметров проката и состояния ножей на процессы резки предложена формула, приводящая измеренные значения силы реза к некоторой формальной величине, что позволяет для целей оптимизации зазора использовать измерения силы реза, полученные при резке проката различной толщины и температуры в различных условиях. Для ускорения адаптации к изменению параметров ножниц предлагается ранжировать данные о приведённом значении усилия реза. Алгоритм оптимизации зазора реализован на языке скриптов MATLAB. Компьютерный анализ алгоритма показал, что он обеспечивает автоматическую минимизацию усилия резки при изменении параметров механизма резания и наличии помех в канале измерения силы реза.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

4.1. Анализ временных взаимодействий механизмов подачи, прижима и ножниц на интервале цикла реза

Временные взаимодействия механизмов подачи, прижима и ножниц рассмотрим на примере ножниц, разработанных для стана ООО «Уральская сталь». Для большинства комплексов резки порядок работы и временные взаимодействия будут аналогичными. График перемещения листа и циклограмма работы механизмов комплекса резки приведены на рис. 1.29 и 1.30, соответственно. На рис. 1.29 обозначены:

$t_1=6,5$ — время транспортировки раската на скорости 0,5 м/с, для выравнивания раската, на 150 мм за линию реза (для зачистки переднего конца раската);

$t_1'=3$ с — время выравнивания раската;

$t_2=2$ с — опускание мерительного ролика, опускание прижима и опускание качающегося рольганга;

$t_3=4$ с — время реза;

$t_4=2$ с — время подъема прижима;

$t_5=1$ с — время транспортировки раската на 250 мм (для обрезки 2-го переднего конца в обрешку);

$t_6=2$ с — опускание прижима и опускание качающегося рольганга;

$t_7=1$ с — время транспортировки раската на 200 мм (для обрезки планки);

$t_8=2$ с — время подъема прижима и подъема мерительного ролика;

$t_9=4,5$ с — время транспортировки раската до упора при порезке его на мерные длины по 4000 мм;

$t_{10}=2$ с — время подъема щита упора, опускание прижима и опускание качающегося рольганга;

$t_{11}=3$ с — время паузы для отвода отрезанного листа (перед опусканием упора);

$t_{12}=2$ с — время опускания щита упора;

$t_{13}=1$ с — время паузы для отвода отрезанного листа перед включением сталкивателя;

$t_{14}=2$ с — время сталкивания последнего обрезка (400 мм);

$t_{15}=2$ с — время возврата сталкивателя и секции рольганга качающегося в исходное положение;

$t_{16}=12,5$ с — ритм поступления порезанных листов от ножниц.

Обведённые кружками цифры 1, 2, 3 и 4 обозначают порядковый номер отрезанного листа.

Раскат поступает на рольганг перед ножницами и подаётся вдоль одного края рольганга со скоростью 1 м/с в зону устройства установки листа. Толкающие ролики данного устройства при этом находятся в исходном положении, на максимальном удалении от стационарных роликов. В некоторых комплексах поступающие раскаты останавливаются для выравнивания. В рассматриваемом комплексе прокат выравнивается «на ходу» без остановки.

Установленный на оси рольганга в зоне секции №3 датчик наличия листа, зафиксировав поступление проката, даёт команду на снижение скорости рольганга до 0,5 м/с и разрешает включение устройства установки листа на выравнивание. Толкающие ролики, двигаясь со скоростью до 0,2 м/с, входят в контакт с раскатом и перемещают его к стационарным роликам. Раскат перемещается до упора в стационарные ролики и выравнивается вдоль оси рольганга. После выравнивания, конец которого определяется по окончании счёта импульсов при включённом приводе установленным на приводном валу выравнивающего устройства импульсным датчиком, тележки с толкающими роликами возвращаются в исходное положение на скорости 0,4 м/с, при этом даётся разрешение на увеличение скорости транспортирования раската рольгангом до 1 м/с.

Далее выровненный раскат транспортируется за линию реза для зачистки его переднего конца. Перед зачисткой ролик мерительный перед ножницами

опускается на него за $\sim 1,5$ с. Когда приближается линия, по которой прокат должен быть обрезан, скорость рольгангов снижается. Когда за поперечными ножницами оказывается конец для обрезки, рольганги останавливаются, прижим опускается за ~ 1 с, и, когда лист надёжно прижат к столу, начинает опускаться рольганг качающийся. С выдержкой времени ~ 1 с после включения прижимов, но не раньше, чем эксцентриковый вал механизма качания рольганга качающегося повернётся на угол $\sim 150^\circ$, ножницы поперечной резки включатся на рез. Угол поворота эксцентрикового вала за один цикл резания раскатов с нормальной коробоватостью, включая разгон, рез и остановку, составляет 213° , а раската с повышенной коробоватостью — 320° . Частота вращения эксцентрикового вала при резе — $10,67$ об/мин.

После реза отрезанный конец проката падает на транспортёр обрезки, ножницы разводятся на величину достаточную для пропуска разрезаемого проката, и рольганг качающийся поднимается. После поворота кривошипа ножниц на угол $\sim 95^\circ$ от первого или второго исходного положения подаётся команда на отключение прижима, который поднимается за ~ 2 с. При порезке листа с повышенной коробоватостью команда на отключение прижима подаётся после поворота на эксцентрика $\sim 150^\circ$ от третьего или четвёртого положения.

После подъёма прижима привод подающего рольганга включается. Раскат (в случае необходимости) задаётся в ножницы для взятия пробной планки, которая также падает на транспортёр обрезки, измерение подаваемой длины при этом осуществляется с помощью мерительного ролика.

После обрезки переднего конца и пробной планки раскат режется ножницами на мерные длины.

Когда передний конец листа подходит к щиту упора на определённое расстояние ($l \approx 0,98$ м), контактный датчик листа перед упором даёт команду на снижение скорости рольганга до $v \approx 0,3$ м/с. Затем, с регулируемой выдержкой времени, достаточной для прижатия листа к упору ($t \approx 3,5$ с), рольганги отключаются. После остановки листа и подачи команды на рез прижим опускается, щит упора поднимается (за ~ 3 с), опускается качающийся рольганг за ножни-

цами, и ножницы поперечной резки включаются на рез. После резки, ножницы разводятся на величину достаточную для пропуска разрезаемого проката. Рольганг за ножницами поднимается, и отрезанный лист транспортируется от ножниц качающимся рольгангом и рольгангом за ножницами. После ухода заднего конца мерного листа по сигналу контактного датчика, расположенного за упором, щит упора возвращается в исходное (опущенное) положение за ~2 с). Прижим поднимается, привод подающего рольганга включается. После чего цикл продолжается.

Оставшийся на столе после резки последней мерной длины задний конец сбрасывается со стола ножниц при помощи сталкивателя рольганга со сталкивателем рис. 1.2 на транспортер обреза, по которому перемещается от ножниц к сталкивателю обреза, сбрасывающему его в короб. При взятии технологической планки и транспортировании её в район кармана оператор отключает автоматический режим работы сталкивателя обреза. Сталкиватель рольганга со сталкивателем совершает полный ход за 4 с.

При необходимости порезки раската на листы различной длины положение упора относительно линии реза может быть изменено в паузах между резами.

Алгоритм, реализуемый контроллером системы управления комплекса резки, с целью обеспечения безаварийной работы входящих в комплекс механизмов включает в себя систему блокировок, которые исключают возможность возникновения нештатных режимов работы и аварий. Для того, чтобы оптимизировать режимы работы комплекса резки в целом или отдельных групп его механизмов, необходимо рассмотреть совокупность применяемых блокировок, условий срабатывания датчиков и реально допустимые взаимные расположения элементов механизмов и проката. Анализ работы системы блокировок позволяет оптимизировать работу комплекса за счёт изменения режимов работы и совмещения операций во времени, а также замены ряда жёстких блокировок на блокировки, условия срабатывания которых зависят от параметров проката и учитывают переменные параметры технологических процессов. Это возможно, поскольку при проектировании систем блокировок не учитываются все особенности взаимо-

действия механизмов и обрабатываемого проката во времени. Для решения задач оптимизации управления комплексом рассмотрим типовую систему блокировок, определяющую порядок взаимодействия отдельных механизмов комплекса.

– Рольганг перед ножницами и рольганг со сталкивателем:

- блокировку, запрещающую включение рольганга перед ножницами для транспортировки очередного раската, если устройство для установки листа не находится в исходном положении;
- блокировки, запрещающие включение секции №3 рольганга «вперед», если сталкиватель рольганга со сталкивателем, механизм качания качающегося рольганга или прижимы не находятся в исходном положении, а также если механизм резания не находится в одном из исходных положений,
- блокировки, запрещающие включение сталкивателя при работающей секции №3 рольганга перед ножницами, при включённом транспортёре обреза, или когда механизм резания ножниц не находится в исходном положении.

– Установка мерительных роликов:

- блокировку, запрещающую подачу очередного листа к ножницам, если мерительные ролики не находятся в исходном положении;
- блокировку, запрещающую опускание мерительного ролика перед ножницами, если сталкиватель обреза рольганга со сталкивателем не в исходном положении;
- блокировку, запрещающую транспортировку раската с измерением его длины, если ролик не прижат к прокату.

– Разрешается включение главного привода ножниц при включенном механизме прижима листа, остановленных рольганге перед ножницами и рольганге качающемся, а также включенном приводе механизма опускания качающегося рольганга.

– Транспортёр обреза:

- блокировку, запрещающую включение ножниц поперечной резки на рез при включенном приводе транспортера;
- блокировку, запрещающую включение привода транспортера во время работы сталкивателя обреза;
- блокировку, запрещающую включение транспортера обреза при нахождении сталкивателя обреза или сталкивателя планок не в исходном положении.

– Сталкиватель обреза:

- включение сталкивателя обреза в автоматизированном режиме в конце шагового перемещения транспортера. Отключение сталкивателя в крайнем переднем положении от индуктивного датчика крайнего переднего положения. Отключение привода сталкивателя обреза в исходном положении от индуктивного датчика данного положения;
- блокировку, запрещающую включение сталкивателя обреза при работающем транспортере обреза.

– Сталкиватель планок по требованиям к алгоритмам управления аналогичен сталкивателю обреза.

Анализ временных диаграмм и работы системы блокировок комплекса показывает, что существующие системы управления комплекса в недостаточной мере учитывают технологические особенности работы механизмов комплекса и геометрические параметры поступающего проката, что позволяет оптимизировать системы управления за счёт совмещения и оптимизации режимов работы отдельных его механизмов во времени.

4.2. Минимизация времени цикла при заданном качестве резки

НПР являются узким местом, сдерживающим производительность всего комплекса резки, и поэтому актуальна задача сокращения временных затрат. На сегодняшний день управление работой большинства механизмов осуществляется с поста управления оператором, причём считается, что из-за наличия блокировок автоматика не может обеспечить такое же эффективное совмещение опе-

раций, как человек [17, 56]. Получить минимальный цикл резки проката можно только при автоматизации всего процесса подачи и резки листа, максимально совмещая на основе анализа происходящих физических явлений выполняемые оборудованием операции. При этом оператор при работе комплекса в штатных ситуациях исключается, как звено запаздывания, и ему отводится роль общего управления технологическим процессом, а также ручного управления в нештатных ситуациях [45]. Основное внимание должно уделяться сокращению простоев оборудования из-за блокировок, выполняемому на основе анализа физических явлений, происходящих в процессе резки.

Минимизация длительности цикла резки может быть обеспечена за счёт оптимизации взаимных движений следующих связанных блокировками механизмов: механизмов резания и прижима листа, механизма резания и механизма качания рольганга качающегося, механизма резания и отводящего рольганга, механизма резания и механизма подъёма щита передвижного упора. Кроме того, в том случае, когда механизм выравнивания листа допускает выравнивание движущегося проката, возможно минимизировать цикл за счёт оптимизации взаимных движений механизма выравнивания и подающего рольганга.

Методика оптимизации режимов работы механизмов заключается в следующем. На основе данных о технологии строятся графики перемещения листа и циклограммы работы механизмов, из которых определяются операции, которые можно совместить, а также, исходя из анализа взаимных перемещений механизмов и обрабатываемого раската, ограничения, налагаемые на взаимные перемещения механизмов. Далее определяются функционалы, выражающие зависимость энергозатрат на работу электроприводов отдельных механизмов от режима управления, и выполняется поиск экстремалей с учётом налагаемых ограничений. Методика направлена на расчёт интервалов времени в соответствии с графиками перемещения и оптимизацию режимов механизмов комплекса. Её новизна заключается в формализации подхода к синтезу алгоритма управления временными параметрами работы отдельных механизмов комплекса резки на основании циклограмм и математических описаний, а также в оптимизации ре-

жимов работы отдельных механизмов по критерию энергосбережения.

Анализ взаимодействия механизма выравнивания и подающего рольганга выявил следующую возможность повышения производительности комплекса резки. Когда подаётся широкий прокат, скорость рольганга можно снижать не до 0,5 м/с, а до большего значения, при этом прокат будет быстрее проходить расстояние до линии реза. Определим соотношения между необходимым снижением скорости подачи проката, его геометрическими размерами и скоростью выравнивания.

Ход выравнивающего устройства во время выравнивания листа определяется выражением $x_y = B' - B$, где B' — расстояние между стационарными и подвижными роликами выравнивающего устройства в исходном положении; B — ширина выравниваемого проката.

Перемещение листа за время выравнивания должно составлять

$$x_{\text{ПЛК}} = l - l^I - l^{II} - l^{III},$$

где l — длина поступающего проката; l^I — длина части проката, которая должна пройти за выравнивающее устройство перед его включением; l^{II} — длина части проката, на которой он прижимается выравнивающими роликами; l^{III} — длина части проката, которая должна находиться в момент окончания выравнивания перед выравнивающим устройством. Величины l^I и l^{III} определяются технологами, l^{II} и B' являются конструктивными параметрами механизма.

В общем случае при длительности выравнивания t_B должны удовлетворяться следующие условия:

$$\int_0^{t_B} v_{\text{ПЛ}}(t) dt = x_{\text{ПЛК}} \quad (4.1)$$

и

$$\int_0^{t_B} v_{\text{ВУ}}(t) dt = x_{\text{ВУ}}; \quad v_{\text{ВУ}}(0) = 0; \quad v_{\text{ВУ}}(t_B) = v_{\text{ВУ}1}; \quad v_{\text{ВУ}}(t) \leq v_{\text{ВУ} \max}, \quad (4.2)$$

где $v_{\text{ПЛ}}$ — скорость подачи проката в процессе выравнивания; $v_{\text{ВУ}}$ — скорость рабочего органа выравнивающего устройства в процессе выравнивания; $v_{\text{ВУ}1}$ — скорость рабочего органа в конце выравнивания; $v_{\text{ВУ} \max}$ — максимальная скорость рабочего органа в процессе выравнивания.

Для обеспечения максимального быстродействия необходимо осуществлять разгон и торможение выравнивающего устройства с максимальным ускорением (замедлением) a_{\max} [40, 62]. При этом можно выделить три этапа работы выравнивающего устройства при выравнивании проката: 1) разгон рабочего органа от 0 до $v_{\text{ВУ max}}$, длительностью t_p ; 2) движение рабочего органа с постоянной скоростью $v_{\text{ВУ max}}$ в течение t_y ; 3) торможение до скорости $v_{\text{ВУ1}}$ за интервал времени t_T . Величины t_p , t_y , t_T определяются по выражениям

$$t_p = \frac{v_{\text{ВУ max}}}{a_{\max}}; \quad t_y = \frac{x_{\text{ВУ}} - 0,5t_p v_{\text{ВУ max}} - 0,5t_T(v_{\text{ВУ max}} + v_{\text{ВУ1}})}{v_{\text{ВУ max}}}; \quad t_T = \frac{v_{\text{ВУ max}} - v_{\text{ВУ1}}}{a_{\max}}.$$

При $\frac{v_{\text{ВУ1}}^2}{2a_{\max}} \leq x_{\text{ВУ}} \leq 0,5((t_p + t_T)v_{\text{ВУ max}} + t_T v_{\text{ВУ1}})$ имеем

$$t_p = \sqrt{\frac{x_{\text{ВУ}}}{a_{\max}} + \frac{v_{\text{ВУ1}}^2}{2a_{\max}^2}}; \quad t_y = 0; \quad t_T = t_p - \frac{v_{\text{ВУ1}}}{a_{\max}},$$

а при $x_{\text{ВУ}} \leq \frac{v_{\text{ВУ1}}^2}{2a_{\max}}$

$$t_p = \sqrt{\frac{2x_{\text{ВУ}}}{a_{\max}}}; \quad t_y = 0; \quad t_T = 0.$$

В последнем случае скорость $v_{\text{ВУ1}}$ рабочим органом не достигается, что однако не может служить препятствием для выравнивания проката.

Общее время выравнивания составляет $t_{\text{В}} = t_p + t_y + t_T$. После того, как определено минимальное, время $t_{\text{В}}$, необходимое для выравнивания раската, выполняется оптимизация режима работы подающего рольганга. Для обеспечения максимальной средней скорости движения проката при $x_{\text{ПЛК}} \leq v_{\text{ПЛ0}}t_{\text{В}} - 0,25a_{\text{р max}}t_{\text{В}}^2$ (где $a_{\text{р max}}$ — максимальное ускорение рольганга; $v_{\text{ПЛ0}}$ — начальная скорость подачи проката) целесообразно изменять скорость $v_{\text{ПЛ}}$ по треугольному графику. Скорость проката при этом будет снижаться от $v_{\text{ПЛ0}}$ до $v_{\text{ПЛ1}} = x_{\text{ПЛК}}/t_{\text{В}} - a_{\text{р max}}t_{\text{В}}/4$. Общие длительности ускорения и замедления рольганга составят

$$t_{\text{рр}} = t_{\text{рт}} = \frac{v_{\text{ПЛ1}} - v_{\text{ПЛ0}}}{a_{\text{р max}}}.$$

В том случае, когда $x_{\text{ПЛК}} \geq v_{\text{ПЛ0}}t_{\text{В}} - 0,25a_{\text{р max}}t_{\text{В}}^2$, средняя скорость подачи листа ограничивается только выравнивающим устройством. При этом целесообразно оптимизировать режим работы движения рольганга, выполнив поиск

экстремума функционала

$$\int_0^{t_B} \sum_{j=1}^{k_p} \sum_{i=1}^{n_{p_j}} \frac{M_{дрj_i}(x_{пл}(t))u_{p_j}\dot{x}_{пл}(t)}{d_{p_j}} + \Delta P_{элp_j_i}(M_{дрj_i}(x_{пл}(t)), \dot{x}_{пл}(t))dt, \quad (4.3)$$

с начальными и конечными условиями

$$x_{пл}(0) = 0; \quad x_{пл}(t_B) = x_{плк};$$

$$\dot{x}_{пл}(0) = v_{пл0}; \quad \dot{x}_{пл}(t_B) = v_{пл0},$$

где k_p — число секций рольганга, задействованных в транспортировке раската; n_{p_j} — число роликов в j -ой секции рольганга; $x_{пл}(t)$ — текущее положение проката по оси рольганга, м; d_{p_j} — диаметр ролика j -ой секции рольганга, м; u_{p_j} — передаточное число редуктора j -ой секции рольганга; $\Delta P_{элp_j_i}$ — электрические потери в i -ом двигателе j -ой секции рольганга, Вт; $M_{дрj_i}$ — момент двигателя i -го двигателя j -ой секции рольганга, определяемый по выражению

$$M_{дрj_i} = -M_{p_{j_i}}(x_{пл}(t)) + J_{p_{j_i}}(x_{пл}(t)) \frac{d^2 x_{пл}}{dt^2} \cdot \frac{u_{p_j}}{d_{p_j}},$$

где $J_{p_{j_i}}(x_{пл}(t))$ — приведённый к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода рольганга с учётом приходящейся на ролик части инерции проката, Н·м²; $M_{p_{j_i}}(x_{пл}(t))$ — момент сопротивления на валу i -го двигателя j -ой секции рольганга, Н·м. Моменты сопротивления на валу двигателя рольганга при холостом ходе и транспортировке проката рассчитываются по выражениям

$$M_x = \frac{0,5m_p g d_{ц} \mu}{u \eta};$$

$$M_c = M_x + \frac{m_{пл} g (0,5d_{ц} \mu + f_r)}{u \eta},$$

где m_p — масса ролика, кг; $g = 9,8$ Н/кг — ускорение свободного падения; $d_{ц}$ — диаметр цапфы ролика рольганга, м; $\mu = 0,01$ — приведённый коэффициент трения качения в подшипниках; η — КПД редуктора электропривода ролика; $m_{пл}$ — приходящаяся на ролик масса проката, кг; $f_r = 0,002$ м — коэффициент трения качения металла по роликам рольганга.

В том случае, когда требование высокой производительности снижается, можно увеличить время выравнивания раската t_B и осуществлять управление

электроприводом выравнивающего устройства по оптимизированному с точки зрения энергопотребления закону, удовлетворяющему минимуму функционала

$$\int_0^{t_B} \frac{M_{дв}(x_B(t))u_B \dot{x}_B(t)}{d_{зв}} + \Delta P_{элв}(M_{дв}(x_B(t)), \dot{x}_B(t))dt, \quad (4.4)$$

где u_B — передаточное число редуктора выравнивающего устройства; $d_{зв}$ — диаметр ведущей звёздочки, м; $x_B(t)$ — положение рабочего органа выравнивающего устройства, м; $\Delta P_{элв}$ — сумма электрических потерь в электроприводе, Вт; $M_{дв}(x_B)$ — момент двигателя, определяемый по выражению

$$M_{дв} = -M_B(x_B(t)) + J_B(x_B(t)) \frac{d^2 x_B}{dt^2} \cdot \frac{u_B}{d_{зв}},$$

где J_B — приведённый к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода выравнивающего устройства с учётом инерции выравниваемого проката, кг·м²; M_B — момент сопротивления на валу двигателя, кг·м. Моменты сопротивления на валу двигателя электропривода выравнивающего устройства при холостом ходе и выравнивании проката рассчитываются по выражениям

$$M_{XB} = m_T g \left(\frac{d_{цк}}{d_K} \mu + \frac{2f}{d_K} \right) k_p \cdot \frac{k_T (0,5d_{цзв} \mu + 0,5d_{зв})}{u_B \eta_B};$$

$$M_{CB} = M_{XB} + \frac{0,5d_{цзв} m_{II} g \mu_{Л}}{u_B \eta_B},$$

где k_T — число тележек; $d_{цзв}$ — диаметр цапфы ведущей звёздочки, м; η_B — КПД редуктора выравнивающего устройства; m_{II} — масса перемещаемого проката, кг; $\mu_{Л} = 0,2$ — коэффициент трения скольжения горячего листа по роликам; d_K — диаметр катка, м; $d_{цк}$ — диаметр цапфы катка, м; $k_p = 2,5$ — коэффициент, учитывающий трение в ребордах.

Как показал анализ, производительность сдерживают в основном резка проката и связанные с ней операции. Условно их можно разделить на две группы. В первую входят операции, предшествующие процессу резки, а во вторую — следующие за ней. К первой группе относятся опускание прижима, подъём щита упора и опускание рольганга качающегося. Во вторую группу входят подъём рольганга, отвод отрезанного листа, подъём прижима и задача проката для следующего реза. Операции первой группы должны завершиться к моменту

начала врезания ножа в прокат, который определяется по взаимному расположению ножа и проката. Исключение составляет процесс совместного перемещения рольганга качающегося и механизма резания ножниц, более подробно рассматриваемый в разделе 4.3.

Из того, что подъём щита упора (который должен завершиться к моменту врезания) составляет 3 с, прижим опускается за 2 с, а нож врезается в прокат через 0,5 с после начала движения, следует, что: 1) команды на опускание прижима и подъём щита упора должны подаваться одновременно; 2) команда на опускания рольганга должна подаваться через 2 с, а команда на рез — через 2,5 с после подачи команд на опускание прижима и подъём щита.

Операции второй группы должны осуществляться после момента окончания реза, который зависит от толщины листа h (чем лист тоньше, тем скол происходит позже) и относительной глубины отрыва $\varepsilon_{отр}$, которая, в свою очередь, зависит от разрезаемого металла и его температуры. Кроме того, в зависимости от расположения проката относительно оси рольганга и от его ширины, рез может закончиться позже или раньше при тех же самых параметрах проката и одной и той же траектории ножа.

При использовании однокривошипных ножниц или двухкривошипных ножниц с механической синхронизацией для резки толстых листов момент окончания реза можно определять по снижению момента на двигателе ниже определённого значения (значения несколько большего момента холостого хода в данном положении ножа). При резке тонких листов значение момента реза невелико, т. к. усилие реза в первом приближении пропорционально квадрату толщины h^2 разрезаемого металла, и момент реза будет значительно меньше момента холостого хода механизма. В этом случае, считать рез завершённым можно только после того, как суппорт займёт определённое положение.

Т. к. рез заканчивается несколько раньше, чем нож выходит из контакта с разрезаемым прокатом (зажатой прижимом частью), то подавать команду на включение расположенных за ножницами рольгангов для отвода отрезанного листа можно сразу после скола листа. Поскольку угол наклона плоскости рольган-

га качающегося невелик (для комплекса резки ОАО «Уралсталь», он составляет $\approx 0,8^\circ$), то это не мешает отводу отрезанного листа. Это позволит сократить простой отводящего рольганга на 2,1 с.

После того, как отрезанный лист отведён на определённое расстояние, можно начинать задачу проката для следующего реза. При этом, подъём качающегося рольганга должен быть завершён, прижим должен быть поднят, а нож должен находиться достаточно высоко (необязательно в исходном положении) для свободного прохода проката под ним (помимо толщины листа должна учитываться его коробоватость и некоторый запас). Для нормальной работы механизма подачи необходимо, чтобы передний край подаваемого для резки проката и задний конец отрезанного листа находились на разных секциях рольганга.

Т. к. операции отвода и подачи листа имеют большую продолжительность по сравнению с продолжительностью реза, то величину времени торможения можно произвольно изменять в больших пределах без снижения производительности всего комплекса резки.

4.3. Оптимизация взаимных перемещений механизма качания рольганга и суппорта ножиц

Во время резания передний край рольганга качающегося должен быть опущен, во избежание давления ножа через прокат на рольганг, ниже режущей кромки нижнего ножа не меньше, чем на глубину, равную сумме толщины листа и перекрытия между ножами. Кроме того, должен быть обеспечен некоторый запас, учитывающий возможную неточность отработки задания (приводом рольганга или ножиц). Таким образом, положение края рольганга у линии реза y_{PK} должно удовлетворять неравенству

$$y_{\text{PK}} \leq y_M - h_{\text{макс}} - \Delta h', \quad (4.5)$$

где $h_{\text{макс}}$ — максимальная толщина проката, м; $\Delta h'$ — запас, принятый равным 0,01 м; y_M — абсцисса нижней точки режущей кромки ножа, м.

Край рольганга качающегося у линии реза находится на высоте

$$y_{\text{PK}} = \frac{l_{\text{K1}} + l_{\text{K2}}}{l_{\text{K2}}} \cdot e_p \cdot (\cos \alpha_p - 1) + h_{\text{K}} + h_{\text{H}},$$

где $l_{к1}$ — расстояние от оси эксцентрикового вала 2 до линии реза, м; $l_{к2}$ — расстояние от оси катка 1 до оси эксцентрикового вала 2, м; e_p — эксцентриситет эксцентрикового вала, м; α_p — угол поворота эксцентрикового вала рольганга относительно вертикали; h_k — высота линии рольганга относительно верхней кромки нижнего ножа, м; h_H — высота оси водила относительно верхней грани нижнего ножа, м.

Отсюда следует, что угол поворота эксцентрика должен удовлетворять неравенству

$$\begin{aligned} \frac{l_{к1} + l_{к2}}{l_{к2}} \cdot e_p(\cos \alpha_p - 1) + h_k + h_H &\leq y_M - h_{\text{макс}} - \Delta h'; \\ \frac{l_{к1} + l_{к2}}{l_{к2}} \cdot e_p(\cos \alpha_p - 1) &\leq y_M - h_{\text{макс}} - \Delta h' - h_k - h_H; \\ \cos \alpha_p &\leq 1 + (y_M - h_{\text{макс}} - \Delta h' - h_k - h_H) \cdot \frac{l_{к2}}{(l_{к1} + l_{к2})e_p}. \end{aligned}$$

Откуда находим минимальный

$$\alpha_{p\text{мин}} = \arccos \left(1 + (y_M - h - \Delta h' - h_k - h_H) \cdot \frac{l_{к2}}{(l_{к1} + l_{к2})e_p} \right),$$

и максимальный

$$\alpha_{p\text{макс}} = 2\pi - \arccos \left(1 + (y_M - h - \Delta h' - h_k - h_H) \cdot \frac{l_{к2}}{(l_{к1} + l_{к2})e_p} \right),$$

углы поворота эксцентрика во время резки. В том случае, если аргумент, стоящий под знаком арккосинуса больше единицы, то α_p может лежать в отрезке от 0 до 2π , а если меньше -1 , то ни при каком положении эксцентрика неравенство (4.5) удовлетворяться не будет.

Процесс оптимизации работы механизма качания рольганга производится следующим образом. В начале осуществляется расчёт положения нижней точки режущей кромки ножа в зависимости от времени. В данной работе производилось моделирование работы НПП, и положение нижней точки ножа M сохранялось в переменной $PmGRPH$, представляющей собой массив, во второй и третьей колонках которого сохраняются значения абсциссы и ординаты точки M , рассчитанные в моменты времени, записанные в первой колонке. Далее вызывается скрипт `rkini` (листинг 4.1), который устанавливает значения использу-

емых переменных и открывает модель в пакете SIMULINK, предназначенную для моделирования механизма качания рольганга рис. 4.1.

В модели СУ рольганга использовалась трёхконтурная система подчинённого регулирования с параллельной коррекцией по заданию скорости. Модель содержит в себе ряд подсистем. Блок `Subsystem rkA` (рис. 4.2) формирует задания на КС и КП для одного из двух режимов управления: предусмотренного проектом и оптимизированного. Механическая часть рольганга, представленная блоком `Subsystem rkB` (рис. 4.3), позволяет учитывать изменение момента инерции и сил сопротивления при падении листа. Момент падения листа рассчитывается блоком `Subsystem rkE` (рис. 4.4). Принято, что лист падает на рольганг, когда точка врезания ножа x_A проходит от одного края листа до другого. Переходные процессы и значение среднеквадратичного момента (которое может быть использовано при выборе двигателя) отображаются в `Subsystem rkC` рис. 4.5.

В блоках «MATLAB Function» с именами `RKGetMc`, `RKGetJ`, `RKGetdJ` и `RKGeth` содержатся вызовы соответствующих функций (листинги 4.3—4.6), а в блоках с именами `RKGetshears` вызовы этой функции (листинг 4.7) с указанными параметрами.

Перед началом оптимизации запускается скрипт `rkiniopt`, осуществляющий, в частности, расчёт ограничений угла поворота эксцентрика α_p механизма качания в различные моменты времени. Оптимизация управляющего воздействия осуществляется скриптом `OptZ` (листинг 3.10).

Оптимизированный функционал (рассчитываемый функцией `optfunction`, приведённой в листинге 4.8) имеет вид

$$v = \int M_d u \dot{\alpha}_p + \Delta P_{эл}(M_d, \dot{\alpha}_p) dt,$$

где u — передаточное число редуктора механизма качания; $\Delta P_{эл}(M_d, \dot{\alpha}_p)$ — мощность электрических потерь, рассчитываемая по соотношениям, приведённым в разделе 3.1; M_d — момент двигателя, который определяется по выражению

$$M_d = -M_c(\alpha_p) + J(\alpha_p) u \ddot{\alpha}_p + \frac{u \dot{\alpha}_p^2}{2} \cdot \frac{\partial J(\alpha_p)}{\partial \alpha_p},$$

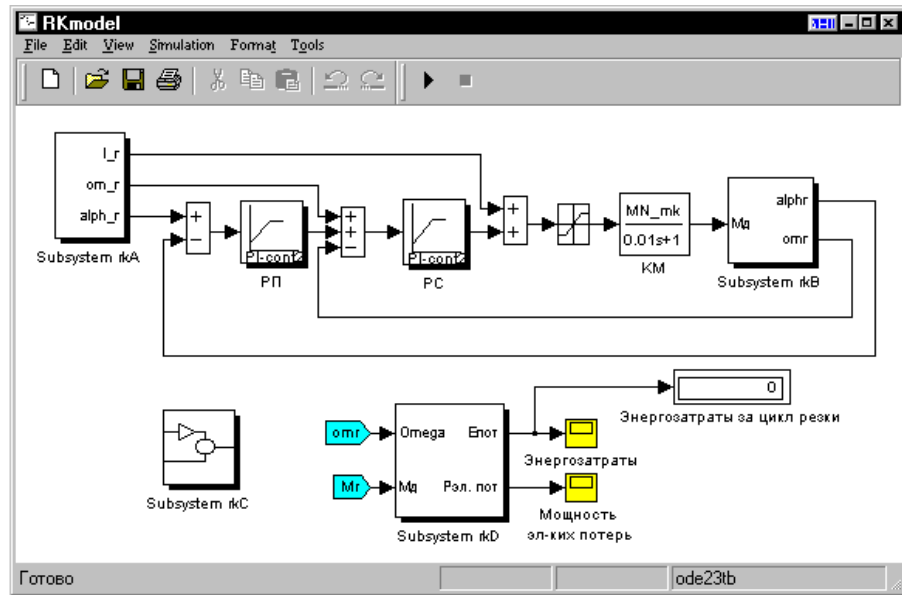


Рис. 4.1. Модель механизма качания рольганга качающегося в Matlab.

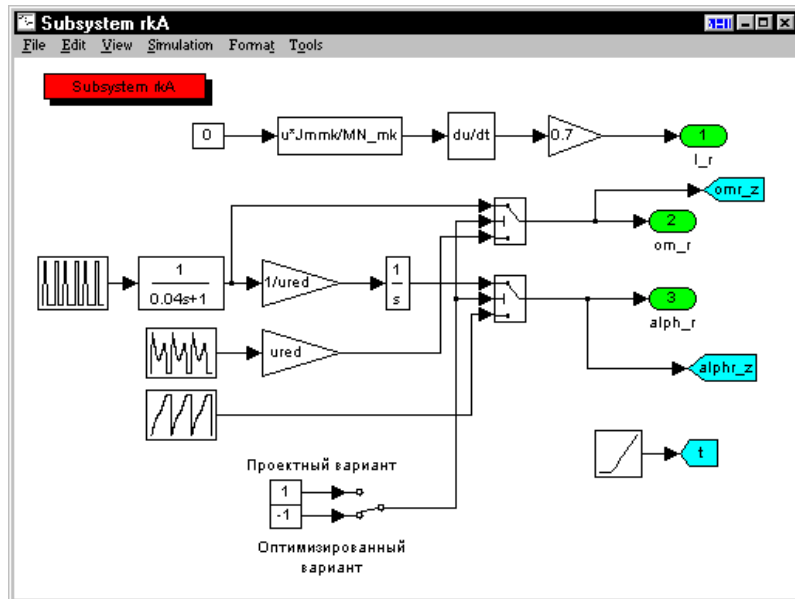


Рис. 4.2. Блок формирования задания.

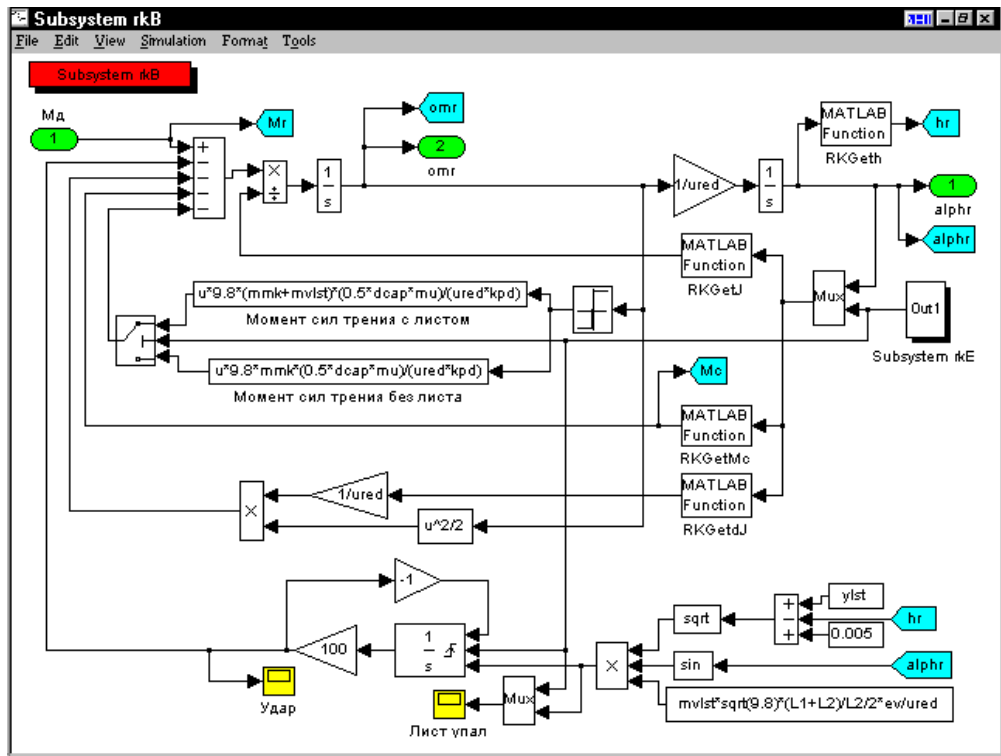


Рис. 4.3. Подмодель механической части рольганга.

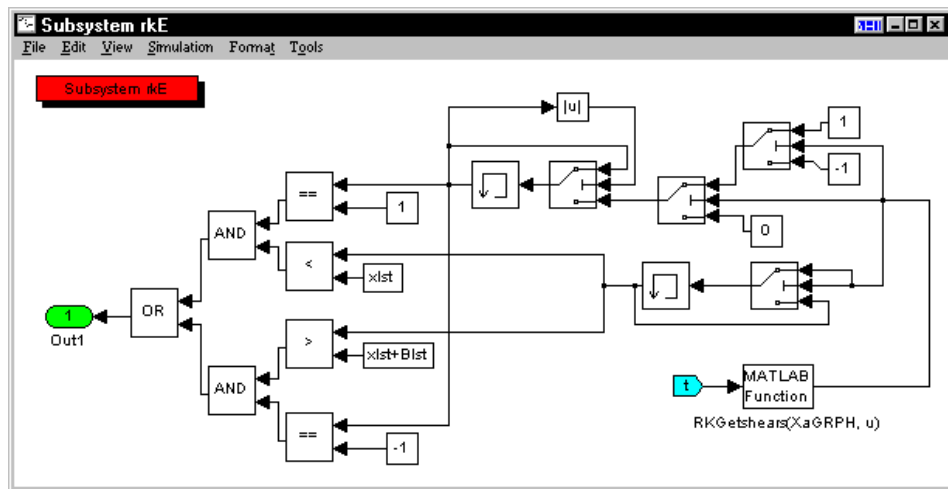


Рис. 4.4. Блок выдачи сигнала о падении листа на рольганг.

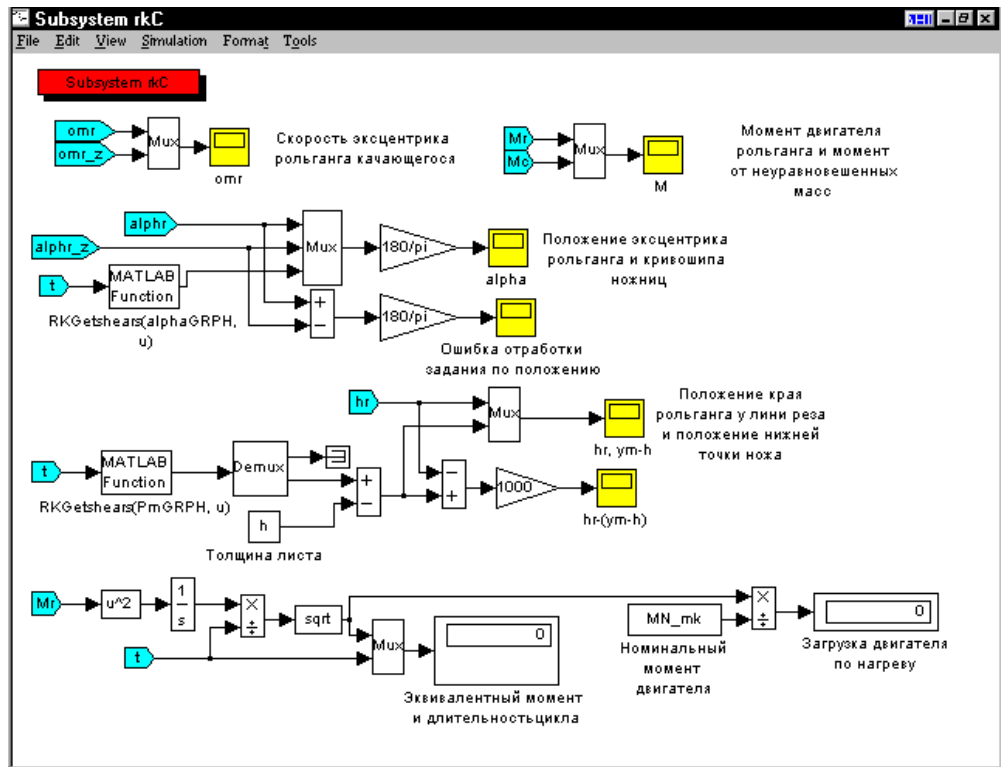


Рис. 4.5. Блок отображения результатов моделирования.

где M_c — момент сопротивления, приведённый к валу двигателя; J — момент инерции, приведённый к валу двигателя.

Возможны два варианта работы механизма качания. Эксцентрик может совершать вращение в одном направлении в процессе реза, или осуществлять реверсивное движение. В первом случае в качестве конечных условий нужно указать угол поворота равный 2π , а во втором — 0. В качестве начальных условий указывается угол поворота равный 0. Скорости в начале и в конце зоны регулирования должны равняться нулю. Максимальная и минимальная скорости должны быть ограничены значениями

$$\omega_{\max} = \frac{n_n \pi}{30u} = \frac{940 \cdot 3,14}{30 \cdot 24,9} = 3,95 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\min} = -\frac{n_n \pi}{30u} = -\frac{940 \cdot 3,14}{30 \cdot 24,9} = -3,95 \text{ рад/с},$$

где $n_n = 940$ об/мин — номинальная скорость двигателя; $u = 24,9$ — передаточное число редуктора. Моменты времени начала вращения эксцентрика по отношению к началу работы ножниц и продолжительность работы механизма качания задаются переменными `trkn` и `trk` в скрипте `rkini`. Графики задания положения эксцентрика для обоих вариантов приведены на рис. 4.6. Графики задания скорости и заданного ускорения, построенные функцией `PlotOpt`, приведены на рис. 4.7 и 4.8.

После окончания расчёта закона управления запускался процесс моделирования рольганга. На рис. 4.9—4.20 приведены графики положения края рольганга в функции от времени, положения и скорости эксцентрика для случая трапецеидального и оптимизированного законов управления. Основные характеристики работы системы электропривода приведены в таблице 4.1. Из таблицы видно, что проектный вариант не является оптимальным с точки зрения нагрева двигателя.

В том случае, когда в ножницах используется дугообразный нож, запрещённые области для y_{pk} можно рассчитывать по следующей методике. В начале определяются координаты нижней точки окружности, описывающей режущую

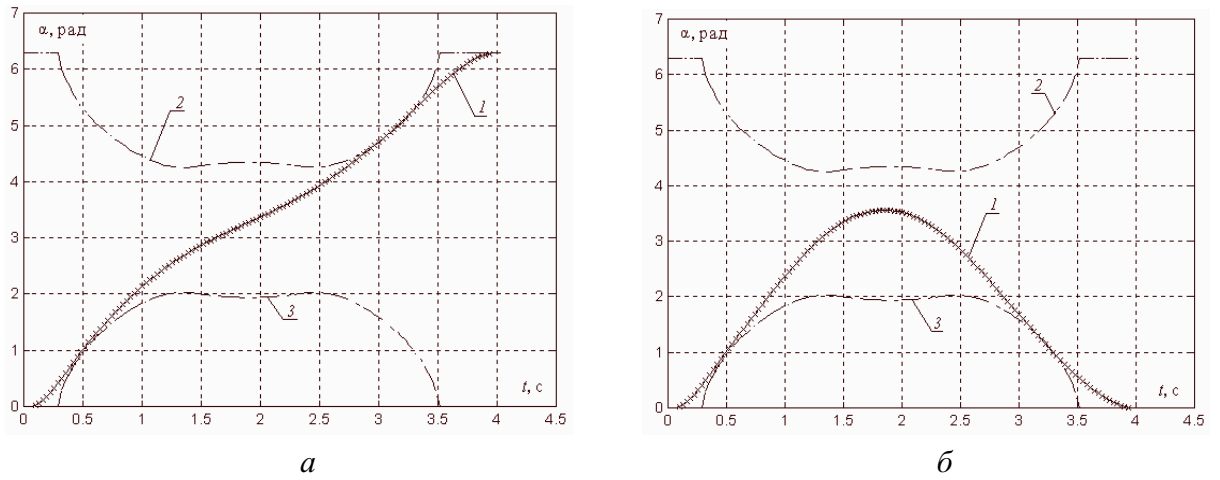


Рис. 4.6. Графики задания положения эксцентрика при его вращении в одном направлении *а* и при реверсивном вращении *б*. 1 — график заданного движения эксцентрика; 2 и 3 — максимальное и минимальное положения эксцентрика, соответственно.

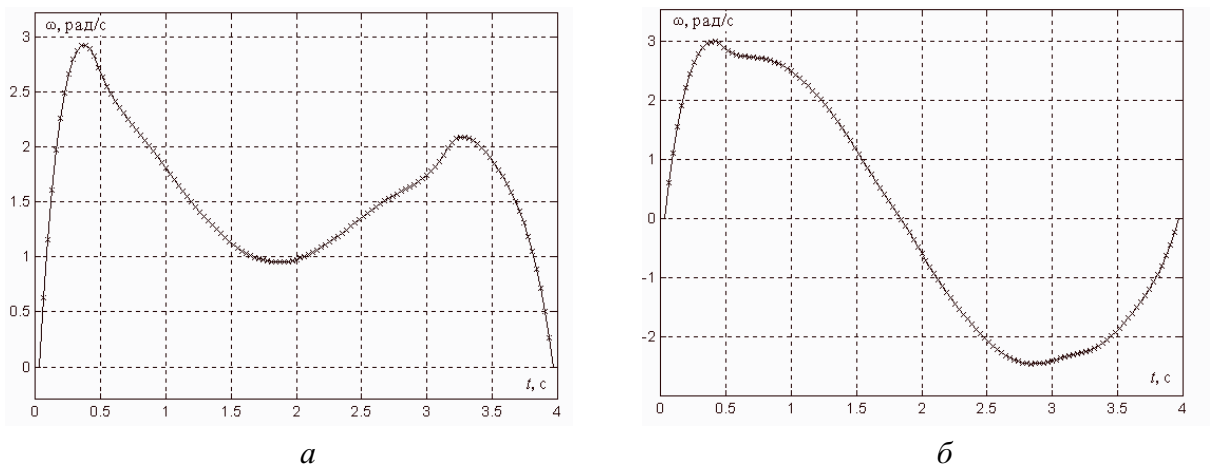


Рис. 4.7. Графики задания скорости эксцентрика при его вращении в одном направлении *а* и при реверсивном вращении *б*.

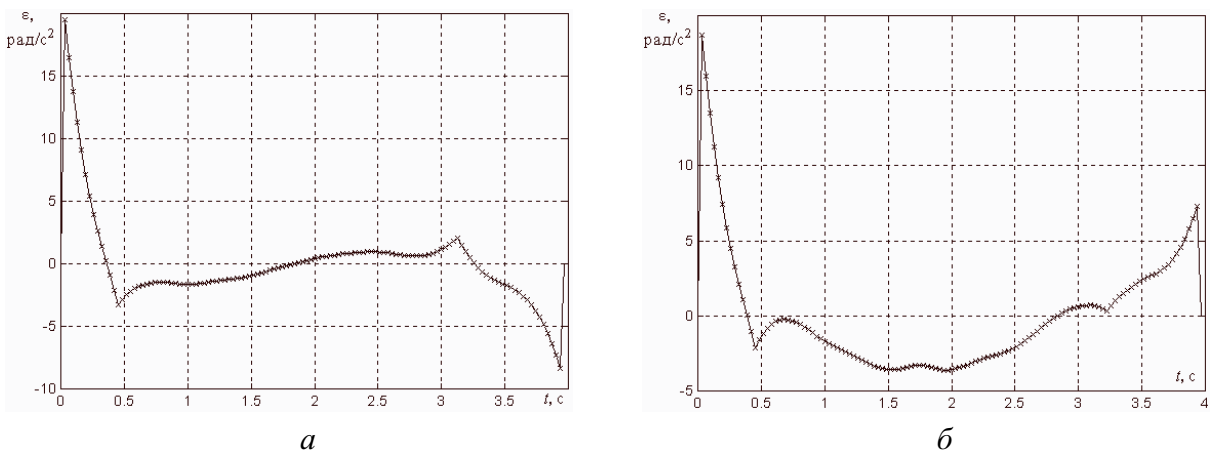


Рис. 4.8. Графики задания ускорения эксцентрика при его вращении в одном направлении *а* и при реверсивном вращении *б*.

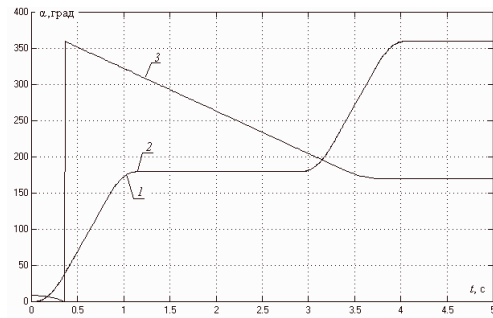


Рис. 4.9. График положения эксцентрика рольганга при проектном варианте управления. 1 — заданное положение эксцентрика; 2 — отработка положения; 3 — график положения кривошипа ножниц.

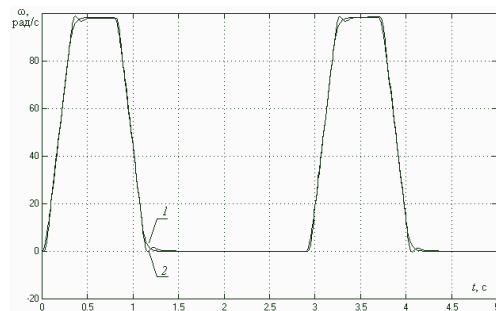


Рис. 4.10. График скорости эксцентрика рольганга при проектном варианте управления. 1 — задание скорости; 2 — отработка скорости.

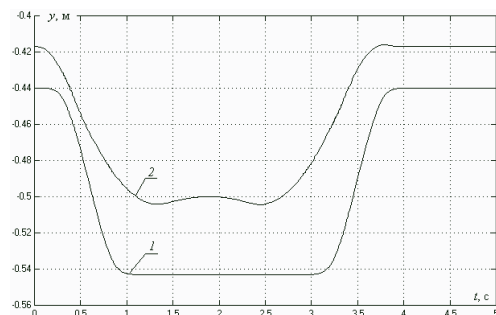


Рис. 4.11. Положение края рольганга при проектном варианте управления. 1 — высота края у линии реза; 2 — максимально допустимая высота у линии реза.

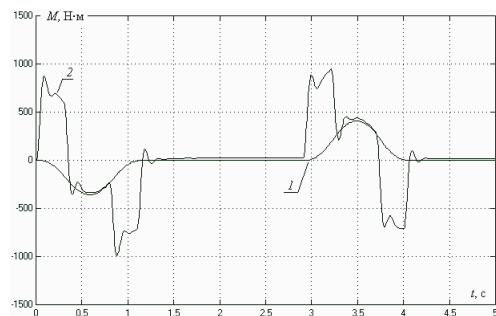


Рис. 4.12. График момента при проектном варианте управления. 1 — график момента сопротивления, вызванного неуравновешенными массами; 2 — график момента на валу двигателя.

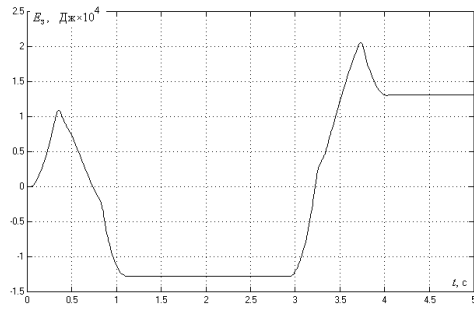


Рис. 4.13. График энергозатрат при проектном варианте управления.

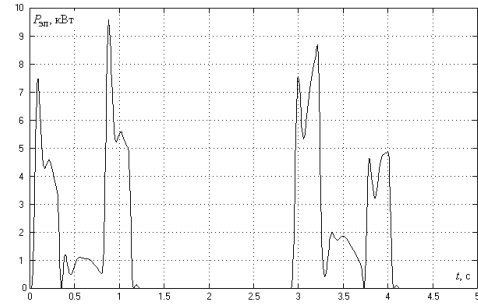
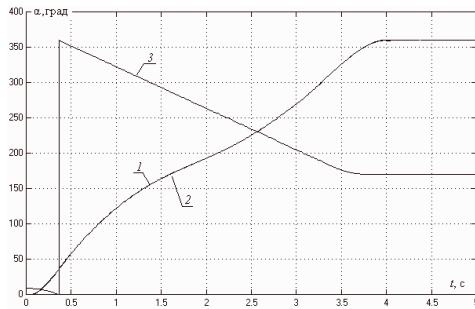
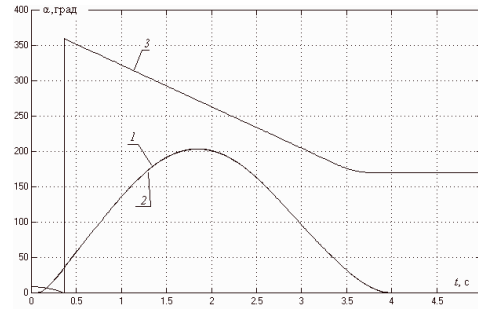


Рис. 4.14. График мощности электрических потерь при проектном варианте управления.

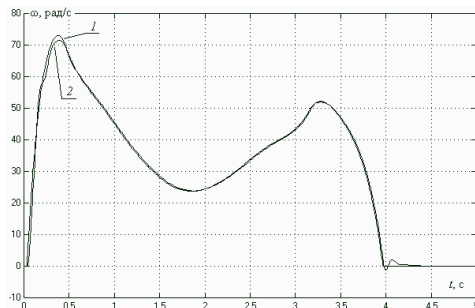


a

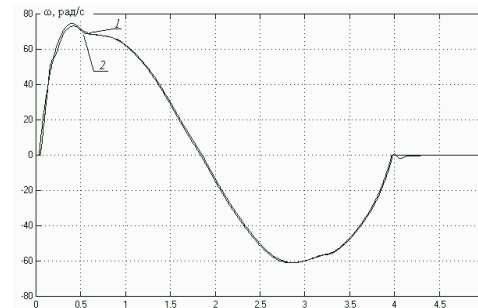


б

Рис. 4.15. График положения эксцентрика рольганга при неререверсивном *a* и реверсивном *б* вариантах оптимизации управления. 1 — заданное положение эксцентрика; 2 — отработка положения; 3 — график положения кривошипа ножниц.

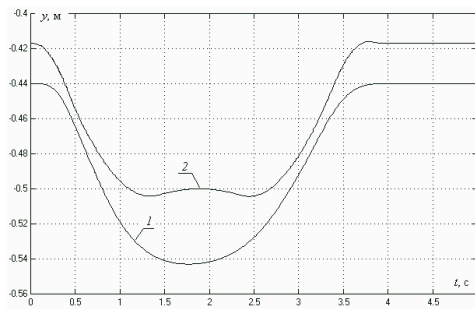


a

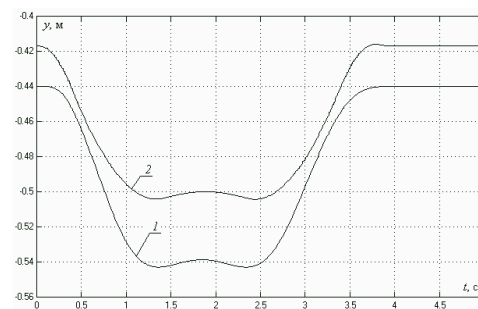


б

Рис. 4.16. График скорости эксцентрика рольганга при неререверсивном *a* и реверсивном *б* вариантах оптимизации управления. 1 — задание скорости; 2 — отработка скорости.



a



б

Рис. 4.17. Положение края рольганга при неререверсивном *a* и реверсивном *б* вариантах оптимизации управления. 1 — высота края у линии реза; 2 — максимально допустимая высота у линии реза; 3 — отработка возмущения, вызванного падением листа.

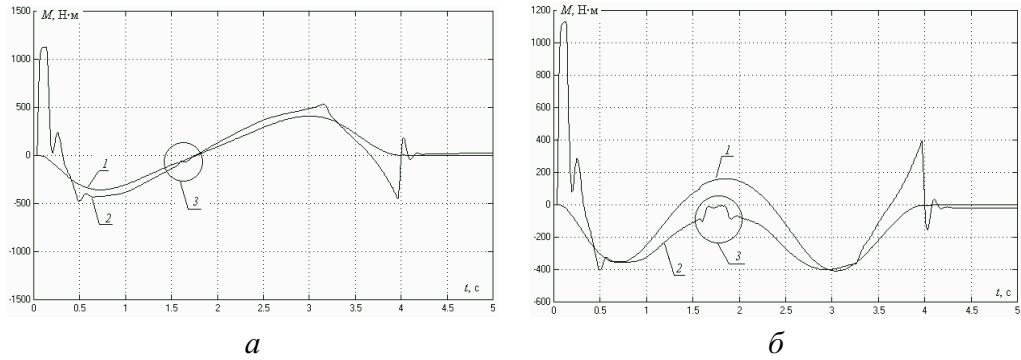


Рис. 4.18. График момента при нереверсивном *а* и реверсивном *б* вариантах оптимизации управления. 1 — график момента сопротивления, вызванного неуравновешенными массами; 2 — график момента на валу двигателя; 3 — отработка возмущения, вызванного падением листа.

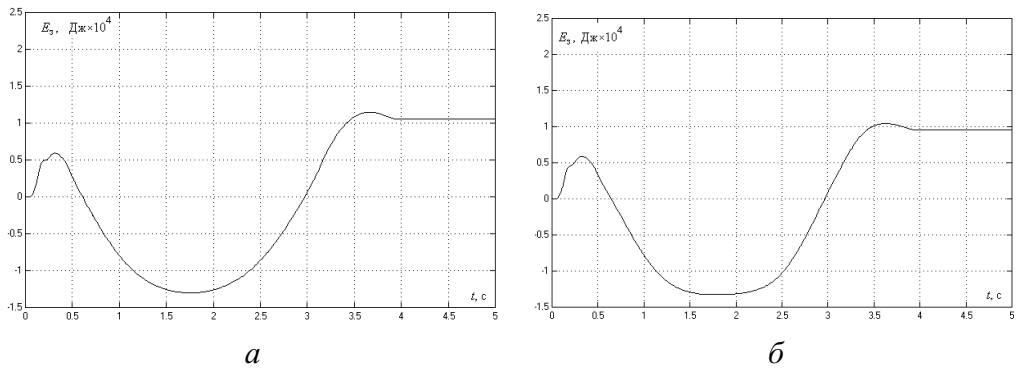


Рис. 4.19. График энергозатрат при нереверсивном *а* и реверсивном *б* вариантах оптимизации управления. 1 — высота края у линии реза.

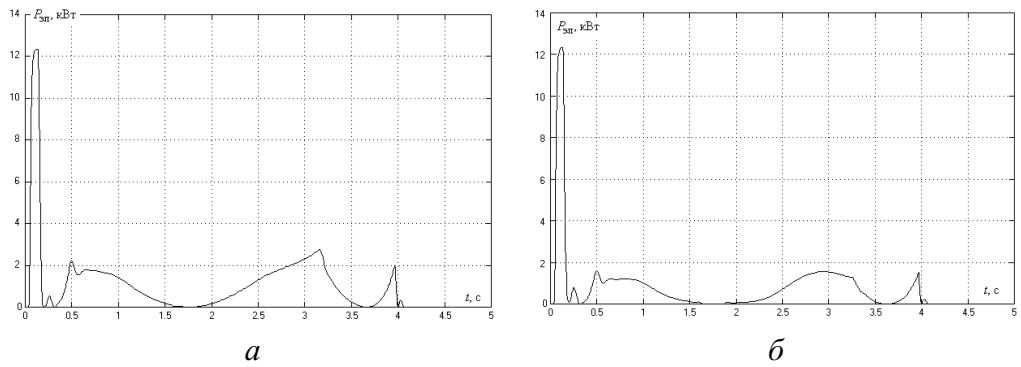


Рис. 4.20. График мощности электрических потерь при нереверсивном *а* и реверсивном *б* вариантах оптимизации управления.

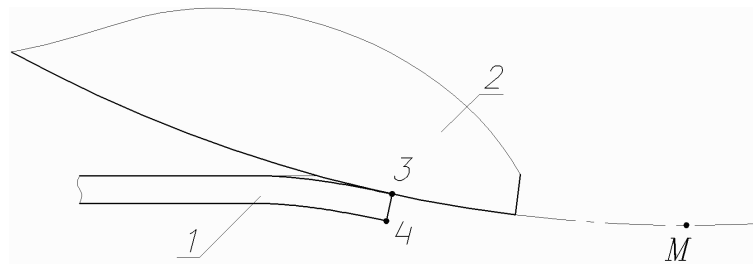


Рис. 4.21. Резка листа. 1 — разрезаемый лист; 2 — верхний нож; 3 — самая нижняя соприкасающаяся с листом точка ножа; 4 — самая нижняя точка листа; *M* — нижняя точка окружности, описывающую режущую кромку ножа.

кромку ножа по формулам

$$y_M = y_2 + (R - h') \cdot \sin(\alpha_2 + \psi') - R;$$

$$x_M = x_2 + (R - h_2) \cdot \cos(\alpha_2 + \psi'),$$

где R — радиус дуги ножа; h' — расстояние от шарнира 2 до дуги, описывающей режущую кромку ножа (см. рис. 2.45); ψ' — угол наклона между звеном l_2 и линией, проведённой от центра дуги, описывающей нож, до точки (x_2, y_2) .

Таблица. 4.1. Результаты моделирования с различными режимами управления.

Величина	Вид графика положения		
	Проектный	Первый вариант	Второй вариант
Загрузка по нагреву при цикле 5 с, %	128,4	104,5	89,4
Эквивалентный момент при цикле 5 с, Н·м	391,5	318,9	272,6
Энергозатраты за цикл резки, кДж	13,08	10,59	9,592

Когда центр дуги ножа находится над листом, чтобы нож не давил на рольганг качающийся через прокат, край рольганга должен быть опущен у линии реза на величину, удовлетворяющую выражению (4.5). Когда нож начинает врезаться в лист, самая нижняя точка листа 4 располагается под самой нижней точкой режущей кромки ножа, находящейся над листом 3 рис. 4.21. Поэтому, чтобы нож не давил через лист на рольганг, когда центр дуги ножа находится слева от листа ($x_M < x_{л}$), край рольганга качающегося должен быть опущен у линии реза на

$$y_{рк} \leq y_M - h_{\max} + \sqrt{\left[2R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{x_{л} - x_M}{R}\right)\right]^2 - (x_M - x_{л})^2 - \Delta h'},$$

где B — максимальная ширина листа; $x_{л}$ — горизонтальное расстояние края листа относительно оси водила 5.

Когда центр дуги ножа находится справа от листа ($x_M > B + x_{л}$), край

рольганга качающегося должен быть опущен у линии реза на

$$y_{\text{рк}} \leq y_M - h_{\text{макс}} + \sqrt{\left[2R \sin \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{x_M - x_{\text{л}} - B}{R} \right) \right]^2 - (x_M - x_{\text{л}} - B)^2 - \Delta h'}$$

За счёт того, что здесь учитывается кривизна ножа, на $y_{\text{рк}}$ накладываются менее жёсткие ограничения, что позволяет использовать более оптимальный режим управления. Для обеспечения надёжной согласованной работы привода ножниц и привода механизма качания рольганга качающегося задание на положение эксцентрика рольганга следует формировать по положению кривошипа ножниц.

Заданные положение и скорость эксцентрика рольганга в зависимости от положения кривошипа ножниц должны рассчитываться заранее в табличном виде и закладываться в контроллер. Поскольку на практике ножницы могут вращаться с разной заданной скоростью (скоростью, до которой осуществляется разгон), то целесообразно задание скорости хранить в относительных единицах заданной максимальной скорости. Кроме того, можно просчитать и хранить в контроллере несколько зависимостей скорости и положения эксцентрика от положения кривошипа, обеспечивающих оптимальные режимы работы привода рольганга для разных заданных значениях максимальной скорости. При работе комплекса резки должен производиться выбор зависимости, соответствующей ближайшей максимальной скорости к заданной.

Если скорость кривошипа ножниц слишком мала, или оказывается целесообразным начинать разгон привода эксцентрика до включения привода ножниц, тогда вначале цикла резки задания положения и скорости эксцентрика следует формировать в функции времени, а затем, когда кривошип наберёт достаточную скорость (или займёт определённое положение), — в функции положения кривошипа. То же относится и к концу цикла резки (торможению привода ножниц).

4.4. Выводы по главе

1. Разработана модель механизма качания рольганга качающегося для па-

кета SIMULINK и выполнена оптимизация режимов его работы. Показано, что движение эксцентрика механизма качания без остановки в процессе резки обеспечивает меньший нагрев двигателя и меньшее энергопотребление, чем применяемое на практике движение с остановкой. Ещё большее снижение энергозатрат обеспечивается при реверсивном движении.

Для ножниц с верхним ножом, имеющим форму режущей кромки участка окружности, была предложена упрощённая методика расчёта положения нижней точки ножа, а также определения запрещённой зоны для высоты края рольганга качающегося у линии реза. За счёт учёта кривизны ножа в данной методике обеспечиваются менее жёсткие требования к положению края рольганга при врезании ножа в лист и выходе ножа из контакта с ним. Благодаря этому, могут быть обеспечены меньшие значения пусковых моментов.

2. Выполнен анализ временных взаимодействий механизмов комплекса резки листового проката и предложена методика расчёта режимов работы электроприводов механизмов комплекса по условию минимизации энергозатрат. Выявлены следующие возможности повышения производительности комплекса резки. Т. к. рез заканчивается несколько раньше, чем нож выходит из контакта с разрезаемым прокатом (зажатой прижимом частью), то подавать команду на отвод отрезанного листа целесообразно сразу после окончания реза. Поскольку угол наклона плоскости рольганга качающегося невелик, то это не мешает отводу листа. Если механизм выравнивания листа допускает выравнивание движущегося проката, можно уменьшить длительность цикла за счёт меньшего снижения скорости подачи проката (когда в ножницы задаётся более широкий или длинный раскат), за счёт чего он будет быстрее проходить расстояние до линии реза.

3. В максимальной степени сдерживают производительность комплекса резки, собственно, резка листа и сопряжённые с ней операции. Значительные затраты времени связаны с опусканием рольганга качающегося. Поэтому, выполнена оптимизация взаимного перемещения механизма резания ножниц и механизма

качания рольганга, за счёт чего была получена экономия времени 0,85 с на каждый рез.

4. Для точной отработки предлагаемых режимов работы следует СУ приводом механизма качания строить по принципу подчинённого регулирования с комбинированной коррекцией по заданию скорости. Задание на контуры положения и скорости должны формироваться в зависимости от положения ножа (в случае однокривошипных НКР или двухкривошипных с механической синхронизацией по положению кривошипа).

ГЛАВА 5. РАСЧЁТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСАМИ РЕЗКИ

5.1. Описание комплекса резки

Комплекс стана 2800 ООО «Уралсталь» предназначен для порезки раскатов толщиной $h = 7 \dots 50$ мм, шириной $B = 1400 \dots 2750$ мм и температурой до 500°C на листы мерной длины в пределах $l = 4500 \dots 12\,500$ мм. Вид ножниц приведён на рис. 5.1. Планировка участка приведена на рис. 1.1. Оборудование участка ножниц включает следующие механизмы: рольганг перед ножницами, устройство для установки листа перед ножницами, рольганг со сталкивателем, ножницы поперечной резки, рольганг качающийся, рольганг за ножницами, упор передвижной, установка мерительных роликов, устройство для уборки обрезки от ножниц.

На рассматриваемом участке реза установлены однокривошипные ножницы с верхним дугообразным ножом рис. 1.2 и 1.3. Кассета с нижним неподвижным ножом закреплена на столе ножниц. Эксцентриковый вал приводится во вращение через редуктор с передаточным числом $u = 93,7$ от двух асинхронных двигателей по 400 кВт каждый. Номинальная скорость двигателей — 987 об/мин. Момент инерции, приведённый к валам двигателей, составляет $J = 54,75$ кг·м². Ножницы обеспечивают усилие реза до 9000 кН. Проектный угол реза $\alpha = 2^\circ 30' \dots 2^\circ 50'$.

Ширина разрезаемого проката — 1400...2750 мм, а его максимальный предел прочности в холодном состоянии

- при толщине 7...36 мм 1200 МПа;
- при толщине 37...40 мм 1000 МПа;
- при толщине 41...45 мм 800 МПа;
- при толщине 46...50 мм 700 МПа.

Механизм резания ножниц имеет пять фиксированных положений рис. 5.2 и 5.3: четыре исходных и одно для смены кассет. Рез осуществляется при повороте эксцентрика из первого исходного положения во второе (прямой ход)



Рис. 5.1. Вид однокривошипных ножниц поперечной резки спереди.

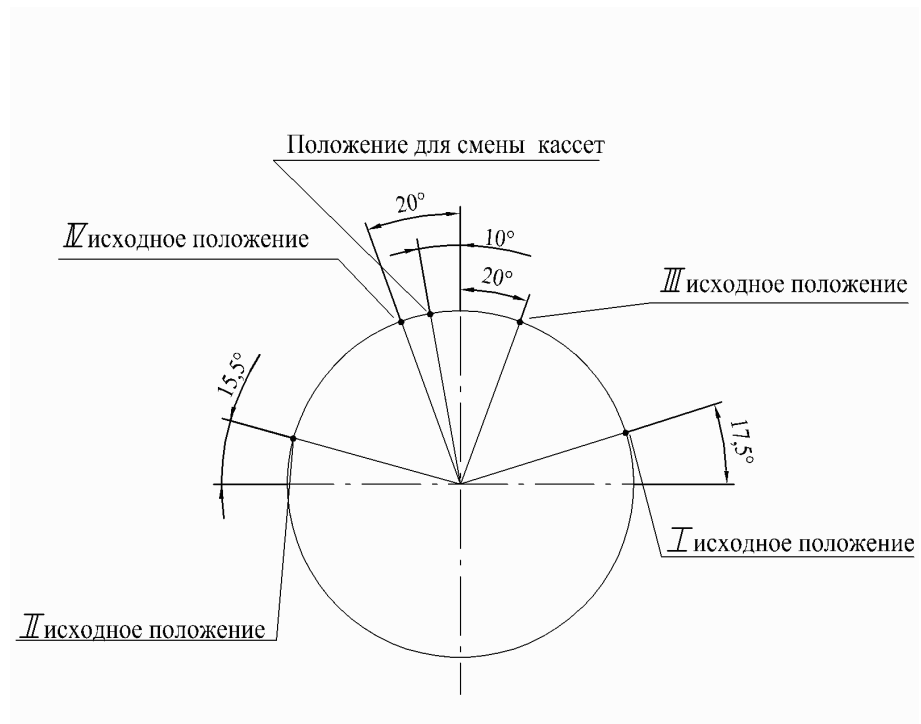


Рис. 5.2. Диаграмма положений механизма резания.

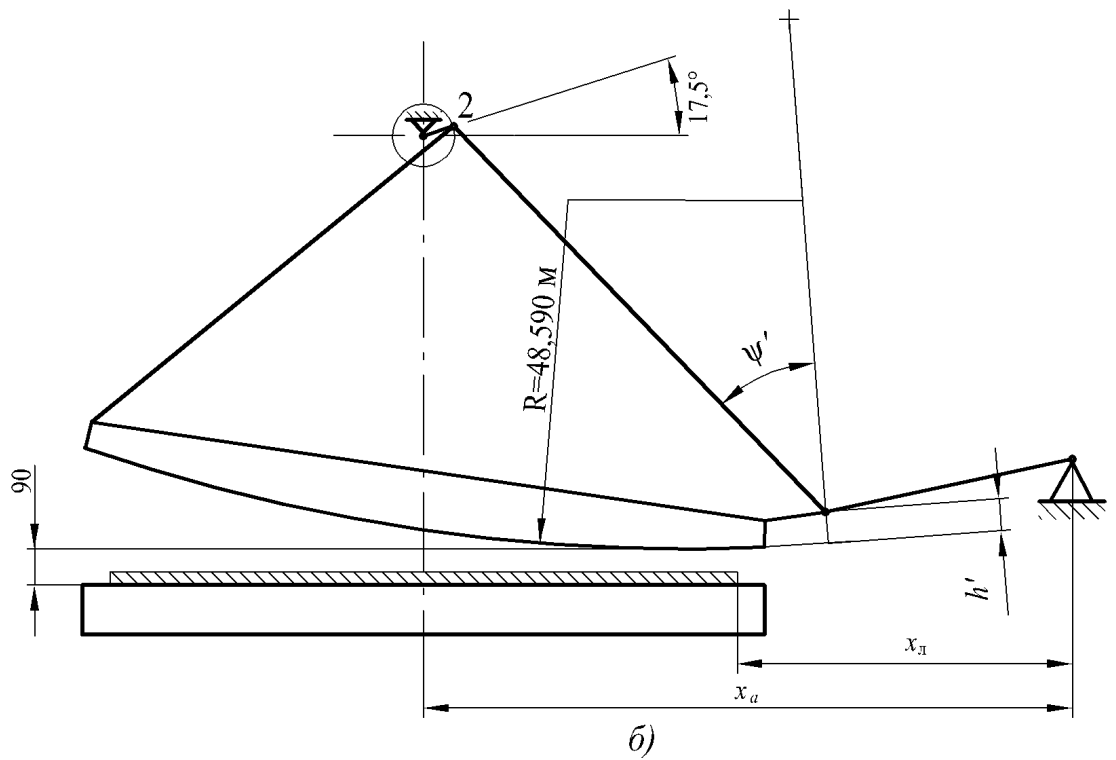
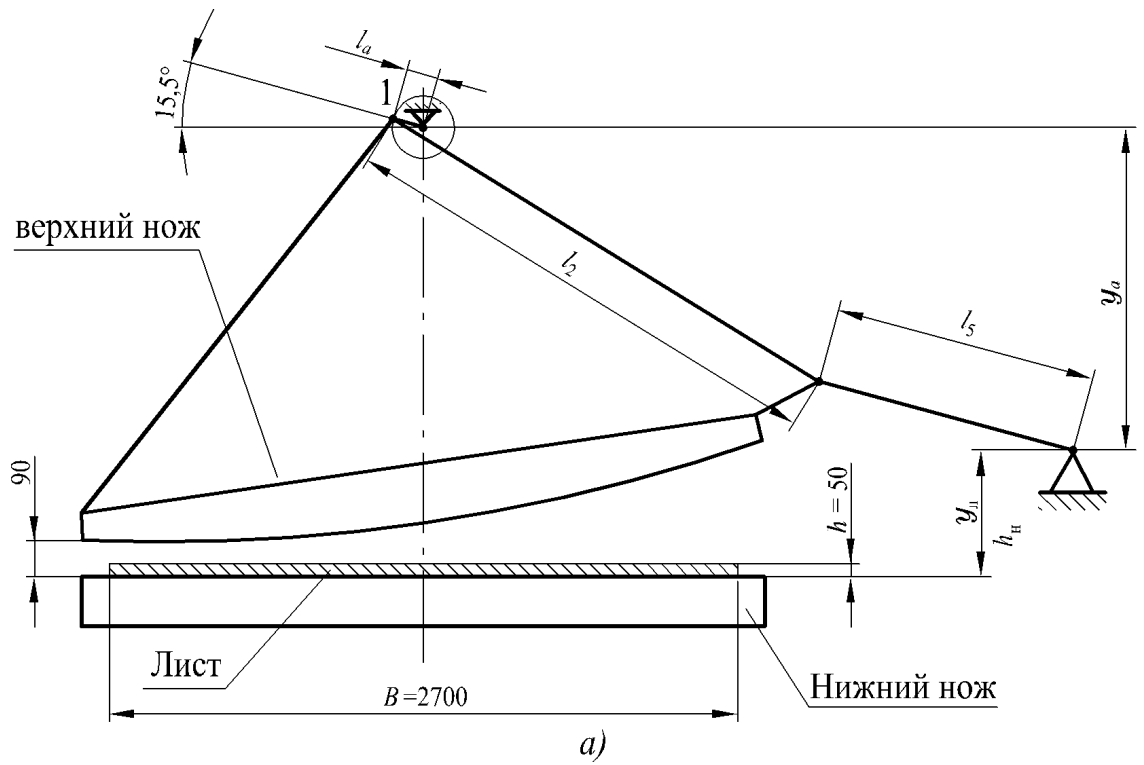


Рис. 5.3. Первое а и второе б положения механизма резания.

или из второго в первое (обратный ход). При порезке листа с повышенной коробатостью (кривизной поверхности) механизм резания переводится в 3 или 4 исходное положение. Порезка указанного проката осуществляется при повороте эксцентрикового вала из третьего в четвёртое положение и обратно. В положении для смены кассет обеспечиваются максимальный раствор ножей и параллельность направляющих верхней и нижней кассет для их смены.

Схема главного привода ножниц приведена на рис. 1.4. На схеме обозначены:

100AU1, 100AU2 — SIMOVERT MASTERDRIVES блок питания-рекуперации
~380–460 В, 50/60 Гц, 1023 А (SIEMENS);

100UZ1, 100UZ2 — SIMOVERT MASTERDRIVES VECTOR CONTROL инвертор
=510–650 В, 690 А, 400 кВт (SIEMENS);

100L1, 100L2 — трёхфазный дроссель $I_n=1120$ А, 400 В, 50 Гц, $U_k=4\%$,
 $L_n=0,0252$ Мг (SIEMENS);

100T1, 100T2 — трёхфазный автотрансформатор Перв 415 В, Втор 498 В,
50/60 Гц, $P_n=703$ кВА, ED=100% (SIEMENS);

100F1, 100F2 — SIMOVERT MASTERDRIVES DU/DT-фильтр 3-х фазный
~380–460 В, 50/60 Гц, 690 А (SIEMENS);

100QF1.1, 100QF2.1 — выключатель автоматический трёхполюсный $I_n=690$ А;

100QF1.2, 100QF2.2 — выключатель автоматический однополюсный $I_n=20$ А;

100QF1.3, 100QF2.3 — выключатель автоматический однополюсный $I_n=16$ А;

100QS1, 100QS2 — выключатель нагрузки трёхполюсный $I_n=800$ А;

100K1.1, 100K2.1 — пускатель $I_n=1000$ А, управление ~230 В, 50 Гц, с ограничителем перенапряжений (RC-звеном);

100K1.2, 100K2.2 — пускатель (контактор) $I_n=15,5$ А;

100VD1, 100VD2 — диод обратного напряжения в звене постоянного тока
 $U=3000$ В, $I=1600$ А;

100GB1, 100GB2 — стабилизированный источник питания Вход $\sim 120/230$ В,
Выход $=24$ В/ 10 А;

100XP1, 100XP2 — коннектор PROFIBUS-DP;

C1.1...C1.3, C2.1...C2.3 — конденсатор $1,5$ мкФ, 1000 В;

R1.1...R1.3, R2.1...R2.3 — резистор 30 Ом, 100 Вт;

RU1.1...R1.3, RU2.1...R2.3 — варистор $U_{ср}=715$ В, 630 Дж;

RU1.4...R1.6, RU2.4...R2.6 — варистор $U_{ср}=910$ В, 620 Дж;

100FU1, 100FU2 — предохранитель 160 А, 1000 В;

100KM1...100KM4 — контактор двухполюсный, для коммутации постоянного
тока $I_n=32$ А;

100R1, 100R2 — экономическое сопротивление форсировки 300 Вт, 300 Ом;

2QF3 — выключатель автоматический двухполюсный $I_n=40$ А;

166UZ1 — инвертор общего назначения, макс мощность 55 кВт, $U_{вых}=380/400/$
 $415/440/460$ В, $I=112$ А, $U_{вх}=380/400/415/440/460$ В, $50/60$ Гц (OMRON);

166F1 — трёхфазный выходной фильтр dU/dt $I_n=150$ А (OMRON);

166QS1 — выключатель нагрузки трёхполюсный $I_n=160$ А;

166QF2 — выключатель автоматический трёхполюсный $I_n=16$ А;

166QF1.1 — трёхфазный фильтр dU/dt $I_n=150$ А (OMRON)

166QS1.1 — разъединитель-предохранитель $I_n=250$ А с предохранителями для
защиты полупроводников $I_n=160$ А и вспомогательными контактами
(SIMENS);

166K1.1 — контактор $I_n=220$ А, управление ~ 230 В, 50 Гц с ограничителем пе-
ренапряжений (варистором) (SIMENS);

166K1.2 — контактор $I_n=6,6$ А, 24 В (MOELLER);

107L — дроссель постоянного тока $I_n=23$ А.

Управление двухдвигательным электроприводом главного привода ножниц осуществляется от отдельных комплектных устройств по схеме с общим заданием скорости и обеспечивает выравнивание нагрузок (моментов) электродвигателей в пределах 10% и остановку ножниц в исходных положениях с точностью $\pm 1^\circ$ угла поворота эксцентрикового вала. Ножницы могут включаться на выполнение каждого реза в ручную или могут выполнять порезку листа на мерные длины в автоматическом режиме при использовании передвижного упора (после обрезки переднего конца).

Механизм регулировки зазора рис. 1.32 состоит из двух червячно-винтовых редукторов (передаточное число $u = 40$), связанных между собой валом. Каждый редуктор приводится от отдельного электродвигателя и соединен с одним из двух двуплечих рычагов. Оба рычага поворачиваются на концах общей оси. Каждый рычаг тягами соединен с двумя клиньями (передним и задним), которые перемещают суппорт верхнего ножа вперед и назад по эксцентриковой шейке вала и, тем самым, и изменяет боковой зазор между ножами. Каждый из двух задних клиньев шарнирно соединен с датчиком линейного перемещения, который измеряет перемещение клина и, соответственно 1:30 (уклон клиньев), боковой зазор между ножами. Масса перемещаемых частей суппорта — 37 т. За исходное положение задних клиньев принято положение, когда боковой зазор между ножами равен 0,35 мм. Полный рабочий ход задних клиньев, при увеличении зазора между ножами от 0,35 до 4 мм, составляет 109,5 мм, а ход винта — 154 мм. Скорость регулировки бокового зазора 0,04 мм/с.

Рольганг перед ножницами состоит из 25 роликов и разбит по управлению на три секции. Секция №1 состоит из 9 роликов (не показана), а в секциях №2 и №3 — по 8 роликов. Совместно секцией №3 управляются два ролика рольганга со сталкивателем.

Включение секции №3 вперед не допускается, если коробоватость поступающего раската превосходит 90 мм. Поступление раската с повышенной коробоватостью определяется фотодатчиком, установленным в зоне секции №2 рольганга, при этом подаются предупредительный звуковой сигнал на пост управле-

ния и соответствующая информация на видеотерминал оператора. Подача раската с повышенной коробоватостью в ножницы для обрезки переднего конца и резки раската на мерные длины производится в ручном режиме управления только после соответствующего увеличения хода механизма прижима листа и увеличения раствора ножей.

Рольганг со сталкивателем рис. 1.2 помимо подачи листа к ножницам осуществляет сталкивание обрезка, остающегося на столе ножниц после порезки листа на мерные длины. Сталкиватель оснащён гидроприводом. Включением гидроцилиндра трансмиссионный вал с рычагами поворачивается и перемещает связанную с ними настильную плиту (сталкиватель) в сторону линии реза, которая, упираясь своими концами в обрезок, сбрасывает его на транспортер обрезки, а затем возвращается в исходное положение. Наибольшая ширина сталкиваемого обрезка в автоматическом режиме составляет 500 мм, максимальное усилие сталкивания — 20 кН.

При ручном управлении включение сталкивателя вперед и отключение его в необходимом положении (при проталкивании обрезка длиной более 500 мм) производится оператором поста управления. После отключения сталкивателя в необходимом положении он автоматически возвращается в исходное положение. При автоматизированном управлении включение сталкивателя вперед производится оператором, сталкиватель делает полный ход, а возврат из крайнего переднего положения производится автоматически по сигналу индуктивного датчика.

Рольганг качающийся состоит из шести роликов, установленных на опорной качающейся раме рис. 1.2. Первые три ролика за ножницами выполнены с групповым приводом, остальные три — с индивидуальным. Задняя сторона опорной рамы опирается на два катка, установленных на неподвижных кронштейнах. Передний конец опорной рамы опирается на два эксцентрика, закрепленных на общем валу с редукторным приводом вращения.

Качание рольганга при резке листа осуществляется вокруг оси задних катков, находящихся в исходном положении. При опускании (подъёме) качающегося рольганга эксцентриковый вал, связанный с тихоходным валом редуктора,

поворачивается на 180° . Включение привода на подъем при ручном управлении разрешается только при нахождении суппорта ножниц в верхнем положении.

Рольганг за ножницами состоит из двадцати трех роликов с индивидуальным приводом каждого ролика и разбит по управлению на три секции. В секции №1 — 7 роликов, В секциях №2 и №3 (не показаны) по 8 роликов. Рольганг за ножницами работает согласованно с качающимся рольгангом.

Устройство для установки листа перед ножницами включает в себя восемь балок, смонтированных на рамах рольганга, два валопровода со звёздочками, приводящими в движение тяговые цепи, восемь тележек с вертикальными роликами восемь холостых звёздочек и восемь стационарных роликов рис. 1.9. Привод устройства осуществляется от электродвигателя. Наибольшее усилие на толкающих роликах 18 кН.

В начале, раскат подается вдоль одного края рольганга к ножницам поперечной резки. Толкающие ролики находятся в исходном положении, на максимальном удалении от стационарных роликов. Раскат по рольгангу поступает в зону устройства установки листов и вступает в контакт с установленным на оси рольганга датчиком наличия листа, который дает команду на снижение скорости рольганга и разрешает включение устройства установки листа на выравнивание. Толкающие ролики входят в контакт с раскатом и перемещают его к стационарным роликам устройства. Раскат перемещается до упора в стационарные ролики и выравнивается вдоль борта рольганга. Раскат считается выравненным, когда при включённом приводе тележки прекращают движение. После выравнивания раската тележки с толкающими роликами возвращаются в исходное положение на скорости 0,4 м/с, при этом дается разрешение на увеличение скорости транспортирования раската рольгангом до 1 м/с.

Упор передвижной рис. 1.10, установленный за ножницами, осуществляет установку переднего торца раската относительно линии реза ножниц на расстоянии, соответствующем мерной длине листа. Он состоит из стационарной части, тележки и цепи траковой. Стационарная часть упора состоит из двух продольных балок с закреплёнными зубчатыми рейками и направляющими для катков

тележки. На тележке смонтированы амортизатор, привод перемещения тележки, а также датчики автоматизации. Узел амортизатора включает щит упора с пневмоприводом подъема и опускания, который обеспечивает амортизацию при ударе раската в щит. Управление положением щита упора осуществляется электропневматическим распределителем.

Наибольшая скорость перемещения тележки упора — 190 мм/с, а наибольший ход — 9,3 м. Точность остановки упора — +2 мм. Контроль перемещения тележки упора осуществляется при помощи датчика, установленного на валу зубчатого колеса, связанного с зубчатой рейкой.

После порезки переднего конца на ножницах раскат подается рольгангом к упору. При подходе его к упору контактный датчик перед упором, представляющий собой изолированный от земли упругий тросик с подведенным напряжением +24 В, дает команду на снижение скорости рольганга. Затем, с регулируемой выдержкой времени, достаточной для прижатия листа к упору, рольганги отключаются. После остановки листа и подачи команды на рез ножницами, включается прижим, щит упора поднимается и производится резка. Затем прижим отпускается, а отрезанная мерная длина листа транспортируется далее рольгангом. После ухода заднего конца мерного листа по сигналу контактного датчика, расположенного за упором, щит упора возвращается в исходное положение. Процесс подачи листа до упора повторяется.

При необходимости порезки раската на листы различной длины положение упора относительно линии реза может быть изменено в паузах между резами.

Устройство для уборки обрезки в рассматриваемом комплексе состоит из транспортера обрезки, сталкивателя обрезки и сталкивателя планок.

Транспортер обрезки предназначен для перемещения обрезки и пробных планок от ножниц поперечной резки в зону сбрасывания: обрезки в специальный короб, а планок — в карман, расположенный с противоположной стороны. Транспортер состоит из роликовой пластинчатой цепи с опорными площадками, натяжного устройства, совмещенного с узлом холостой звездочки и привода. Верхняя и нижняя ветви цепи в районе НПР перемещаются по планкам скольжения.

После выхода из ножниц и до приводной звездочки верхняя ветвь цепи, а также нижняя ветвь цепи от приводной звездочки до ножниц, перемещаются по опорным роликам.

Транспортер работает в шаговом режиме. Обрезь на выключенном транспортере набирается пакетами по 1–5 штук, затем происходит включение транспортера и перемещение его цепи со скоростью 0,7 м/с на один шаг подачи равный 3140 мм. Одновременно может транспортироваться 3 пакета. Максимальная масса одного пакета — 1000 кг.

При аварийной ситуации (разрыве пальцев муфты предельного момента и остановке цепи транспортера) при отсутствии поступления импульсов от установленного на оси холостой звездочки импульсного датчика и работающем двигателе транспортера обеспечивается подача аварийного звукового сигнала на пост управления ножниц, автоматическое отключение привода транспортера обреза и запрет его работы в шаговом режиме. Кроме того, блокируется включение приводов сталкивателей обреза и планок.

Сталкиватель обреза предназначен для сталкивания пакета обреза с транспортера в специальный короб. Он состоит из двух штанг с рейками, двух корпусов и общей для обеих штанг линейки. Включение сталкивателя обреза в автоматическом режиме производится в конце шагового перемещения транспортера. При этом линейка перемещается со скоростью 0,6 м/с из исходного положения до крайнего переднего и затем возвращается назад в исходное. Ход линейки сталкивателя — 900 мм. Привод на обе штанги выполнен общим редукторным от электродвигателя. Включение транспортера, когда сталкиватель обреза находится не в исходном положении, а также включение сталкивателя при работающем транспортёре, не допускаются.

Сталкиватель планок предназначен для сталкивания технологических планок с транспортера в карман. Он аналогичен по конструкции, параметрам и требованиям к алгоритмам управления сталкивателю обреза. При взятии технологической планки, масса которой может достигать 480 кг, и транспортировании её в район кармана оператором отключается автоматический режим работы стал-

кивателя обреза.

5.2. Математические описания. Расчёты и исследования электромеханических систем ножниц

Кинематические данные механизма резания ножниц стана 2800 приведены ниже. Длины звеньев $l_a = 138,3$ мм; $l_2 = 2922$ мм; $l_5 = 1003$ мм. Положение шарнира a относительно водила 5: $x_a = 3330$ мм; $y_a = 1655$ мм. Нижний край листа смещён относительно оси крепления коромысла вправо на 1950 мм и вниз на 395 мм. Длина ножа $x'_{\text{макс}} = 2,8$ м, а его радиус $R = 48,59$ м. Массы звеньев и их моменты инерции $m_a = 5337$ кг; $J_a = 112,5$ кг·м²; $m_{23} = 31\,000$ кг; $J_{23} = 119\,965$ кг·м²; $m_5 = 2600$ кг, $J_5 = 3453,96$ кг·м². Положения центров масс звеньев $l'_a = 138$ мм; $\alpha'_a = 0^\circ$; $l'_{23} = 1,098$ мм; $\alpha'_{23} = 20^\circ 30'$; $l'_5 = 500$ мм; $\alpha'_5 = 0^\circ$. Радиус ножа $R = 48,59$ м, система координат $x'O'y'$ смещена относительно точки 2 на $\Delta x' = -0,953$ м; угол между осями Ox и $O'x'$ составляет $\varphi_0 = 36,43^\circ$. Моделирование проводилось для листов из стали 20 с шириной 2,7 м. Механические параметры стали 20: $\tau_{\text{макс}} = 363$ МПа; $\varepsilon_{\text{отр}} = 0,35$; $\varepsilon_{\text{над}} = 0,25$. Параметры двигателей механизмов участка резки приведены в табл. 5.1 [65].

В главе 2 выполнено моделирование системы управления электроприводом механизма резания ножниц. В результате анализа полученных при моделировании данных установлено, что момент реза при порезке проката максимальной толщины $h = 50$ мм не превышает 50% величины динамических моментов при разгоне и торможении (см. рис. 2.40), откуда следует, что изменение параметров разгона и торможения позволяет использовать в ножницах подобной конструкции двигателя главного привода меньшей мощности (на 30% ... 50%).

На примере этих ножниц выполнена оптимизация режима управления электроприводом механизма резания по критерию минимума энергозатрат за цикл резки. Результаты, полученные в главе 3 показывают, что применение предложенного подхода позволяет обеспечить снижение энергозатрат на резку при сохранении заданной производительности комплекса резки на 9% (см. рис. 3.3, кривая 2). При этом определена оптимальная длительность хода ножниц, равная 4,8 с.

Таблица 5.1.1. Параметры двигателей механизмов комплекса резки.

Наименование механизма	Кол.	Тип	N, кВт	n, об/мин	J, кг·м ²	r ₁ , ^{*)} Ом	r ₂ '', ^{**) Ом}	x _Г , Ом	x _ц , Ом	x ₂ '', Ом
Рольганг перед ножицами	9	АР73-10	5	530	0,8	0,72	2,96	1,81	29	1,30
	8	АРМ73-10	5	543	0,8	0,45	2,67			
	8	АРМ73-10	5	543	0,8	0,45	2,67			
Рольганг со стальной телем	2	АРМ73-10	5	543	0,8	0,45	2,67			
Ножницы	2	ДА30-400-0Б38-1000	400	987	19	0,0947	0,0097	0,0947	2,32	0,0993
	2	Механизм регулировки бокового зазора	1,5	750						
Рольганг качающийся	1	АРМ74-10	6,7	535	1,015	0,308	1,98			
Механизм перемещения упора передвижного	1	ДМТКН111-6	3	910	0,045					
Рольганг за ножицами	9	АР73-10	5	530	0,8	0,72	2,96	1,81	29	1,30
	8	АР73-10	5	530	0,8	0,72	2,96	1,81	29	1,30
	8	АР73-10	5	530	0,8	0,72	2,96	1,81	29	1,30

*) Сопротивление r₁ дано при t = 20°;

**) Сопротивление r₂'', дано при t = 115°.

Разработан алгоритм совместного управления главным приводом ножниц и приводом механизма качания рольганга качающегося. Расчёты, приведённые в главе 4, показывают, что его внедрение позволит сократить длительность цикла резки проката на 0,85 с и уменьшить затраты электроэнергии механизмом качания на 26%.

5.3. Экспериментальные исследования на действующем комплексе

С целью определения достоверности разработанных математических моделей ЭМС управления комплексами резки были проведены экспериментальные исследования на двухкривошипных ножницах стана 5000 цеха ЛПЦ-3 ООО «Северсталь» и однокривошипных ножницах стана 2800 ООО «Уральская сталь». В состав электропривода двухкривошипных ножниц стана 5000 входят два двигателя постоянного тока по 800 кВт каждый, работающих на общий вал редуктора с передаточным числом $u = 50,46$ и питаемых от двух комплектных тиристорных преобразователей TPD32 фирмы General Electric. Силовая схема преобразователя представлена на рис. 5.4. Данные снимались и обрабатывались с использованием программного пакета CONTROL SYSTEM TOOLBOX. Переносной компьютер подключался к встроенному в преобразователь контроллеру через интерфейс RS485. Схема внешних соединений приведена на рис. 5.5. Экспериментальные данные представлены на графике рис. 5.6. Здесь отображены заданная и фактическая скорости двигателя (об/мин), а также ток якорной цепи в процентах от номинального. Система электропривода характеризуется наличием значительного момента холостого хода, изменяющегося от 5% до 25% номинального момента двигателя. Уровень помех, возникающих в ЭМС электропривода, достигает 4% от номинального тока.

Экспериментальные данные, снятые с комплектных приводов однокривошипных ножниц стана 2800, представлены на рис. 5.7. Привод ножниц осуществляется от двух асинхронных двигателей мощностью 400 кВт, работающих на общий редуктор. Питание двигателей осуществляется от двух преобразователей частоты SIMOVERT MASTER DRIVES фирмы Siemens. Структурная схема преобразователя представлена на рис. 5.8 [70]. Данные снимались и

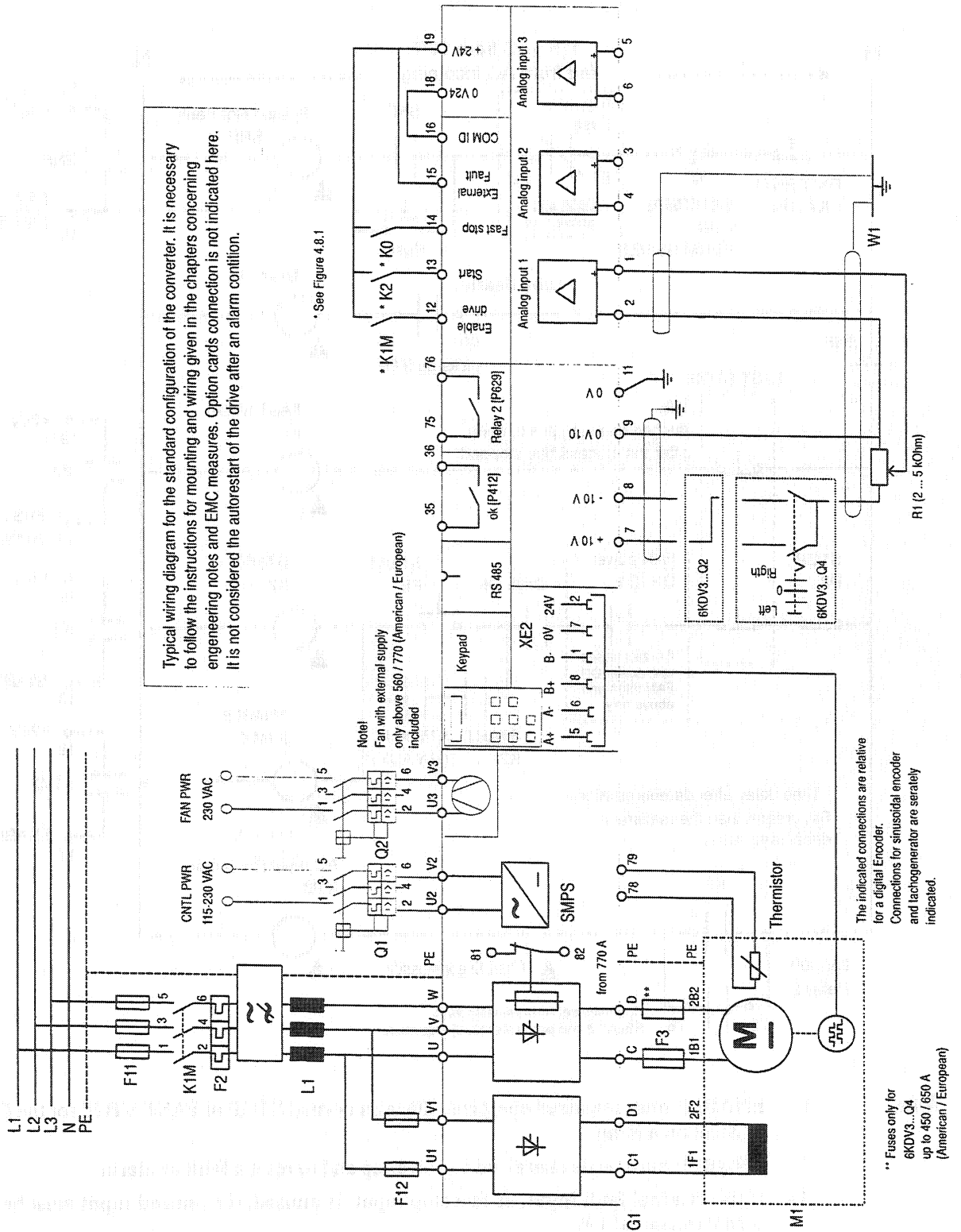


Рис. 5.5. Схема внешних соединений преобразователя TPD32.

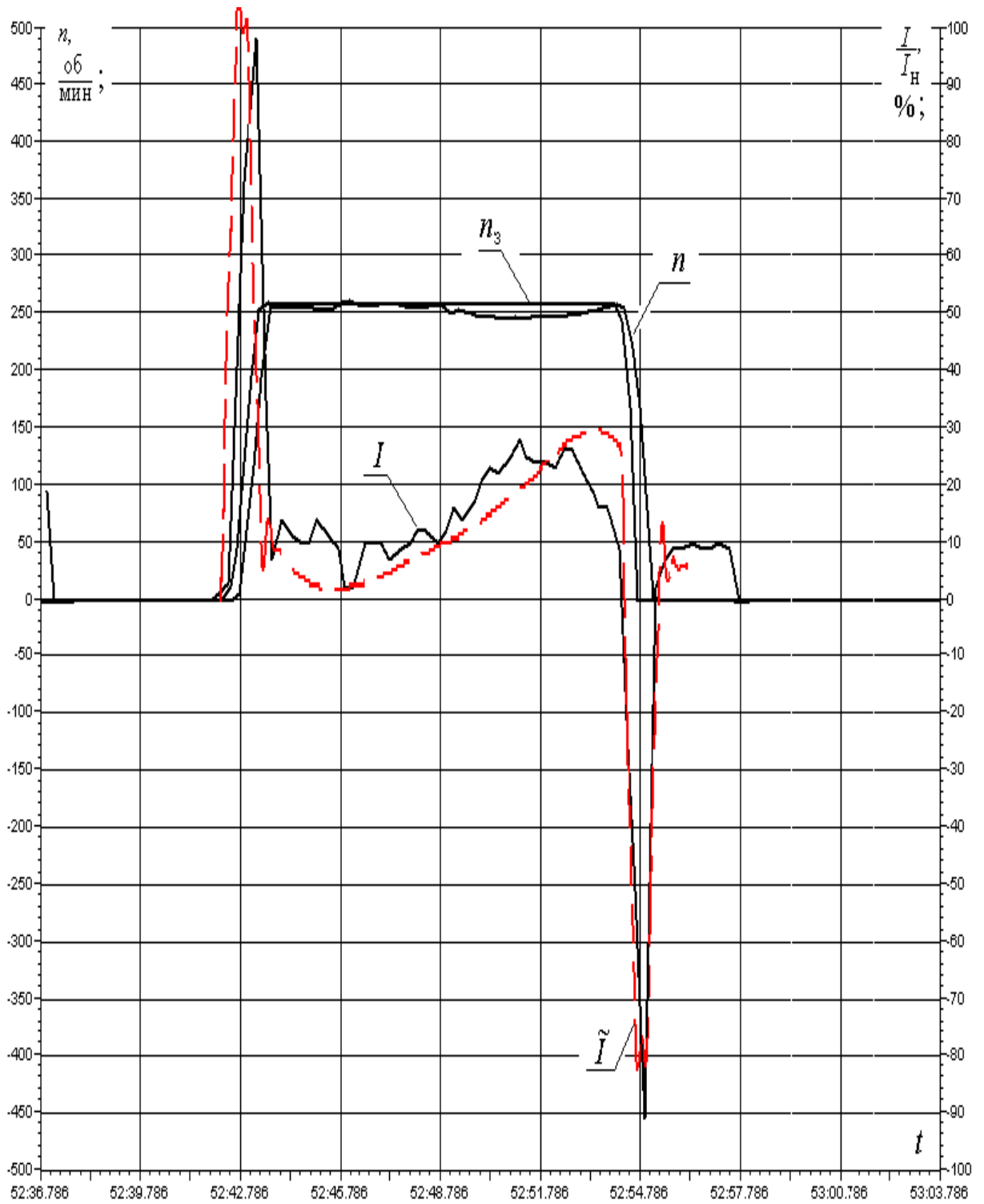


Рис. 5.6. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных с двухкривошипных ножниц стана 5000. На графиках обозначены: n — измеренная скорость двигателя, об/мин; n_3 — задание скорости преобразователя, об/мин; I , \tilde{I} — ток двигателя и модели, %.

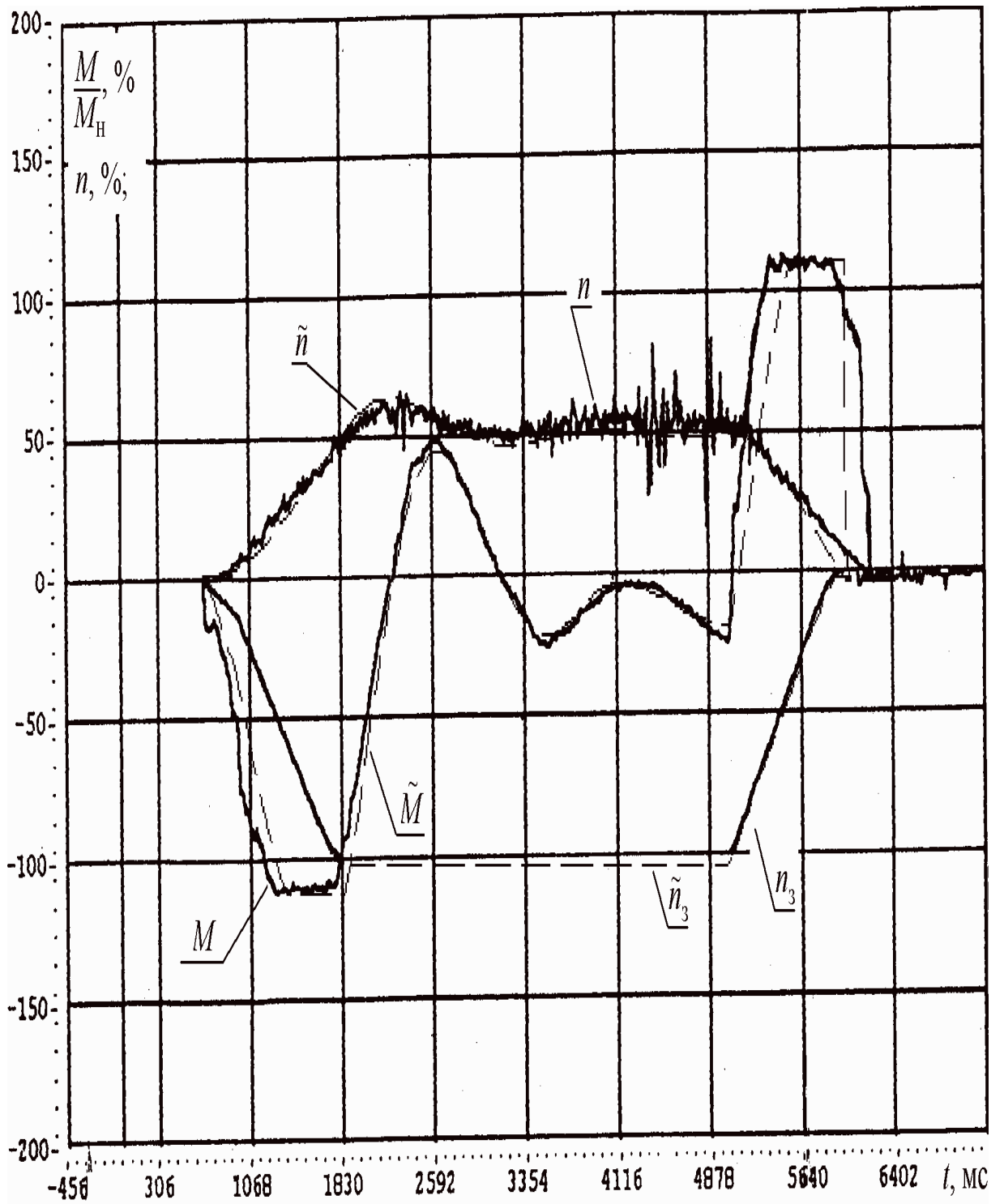


Рис. 5.7. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных с однокривошипных ножниц стана 2800. На графиках обозначены: n , \tilde{n} — скорости двигателя, измеренная и моделируемая; n_3 , \tilde{n}_3 — задания скорости преобразователя и модели; M , \tilde{M} — моменты двигателя и модели.

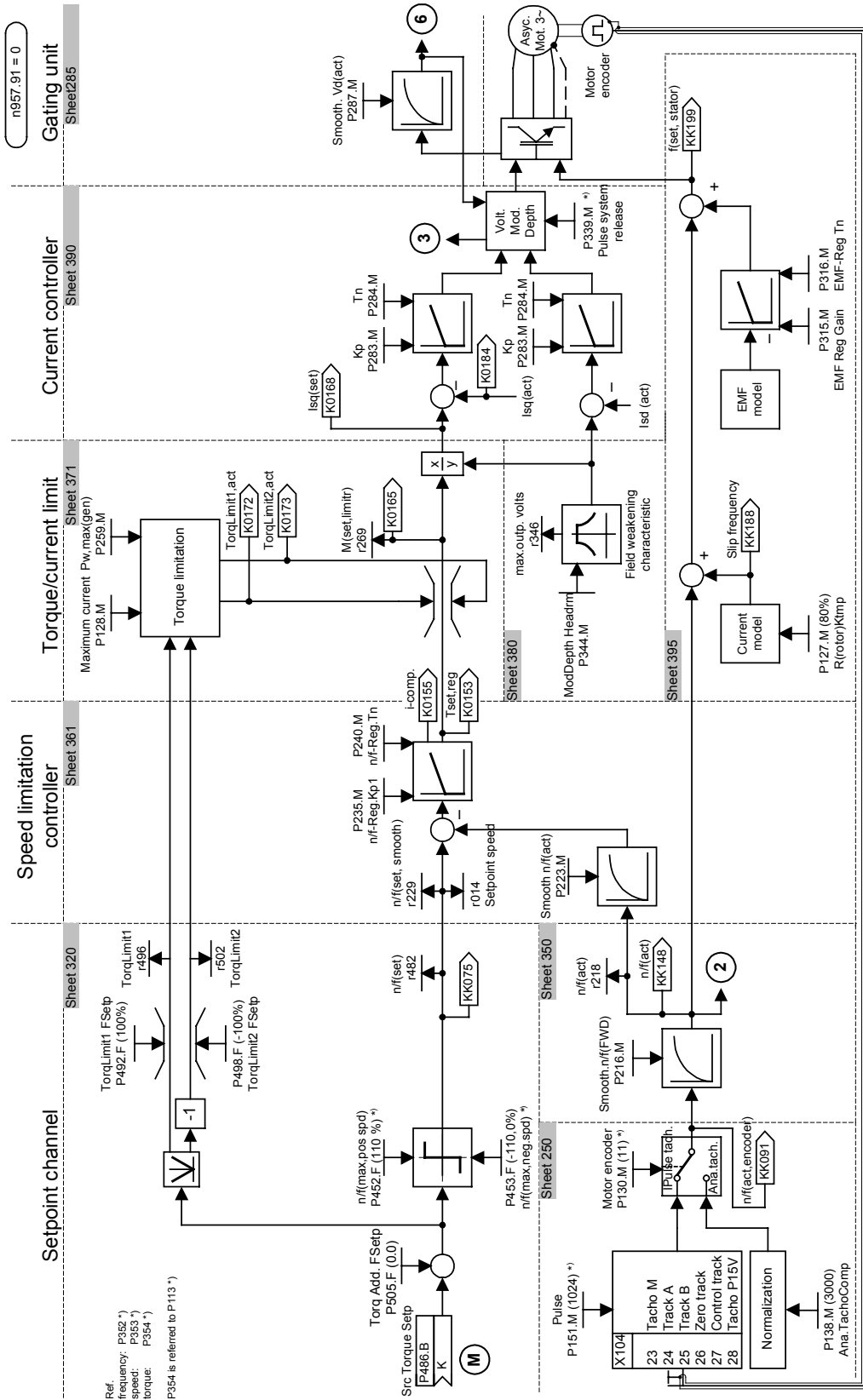


Рис. 5.8. Структурная схема частотного преобразователя.

обработывались при помощи программного пакета DRIVE MONITOR. Компьютер подключался к преобразователю частоты через интерфейс RS485 [35] по протоколу PROFIBUS DP. Схема подключений преобразователя частоты представлена на рис. 5.9.

На графике представлены в относительных единицах ток двигателя I , заданная n_z и фактическая n_p скорости, а также активная составляющая тока двигателя (которая пропорциональна моменту двигателя M_d). Из графиков следует, что система управления ножницами обладает большой колебательностью с периодом колебаний 1,5 с. Статический момент холостого хода не превышает 10%...15%.

5.4. Анализ результатов

На графике рис. 5.7 изображены зависимости тока, скорости и момента асинхронных двигателей главного привода однокривошипных ножниц за цикл резки. Анализ зависимостей показывает наличие больших помех в в системе измерения скорости, достигающих 50% фактической скорости. Настройка преобразователей частоты не оптимальна: завышена уставка тока намагничивания, вследствие чего при включении преобразователя ток намагничивания растёт до номинального значения тока двигателя и превышает его. Двигатель входит в насыщение, что приводит к появлению задержки включения привода ~0,7 с. Задержку времени можно практически полностью устранить, ограничив уставку тока намагничивания на уровне 50% от номинального тока двигателя.

На графике рис. 5.6 изображены зависимости скорости и тока двигателей постоянного тока главного привода двухкривошипных ножниц. Уровень помех, возникающих в ЭМС электропривода, достигает 4% от номинального тока, что указывает на проблематичность использования косвенного измерения момента двигателя для автоматической оптимизации бокового зазора.

Для ножниц обоих комплексов резки, на которых производились экспериментальные исследования, было выполнено моделирование систем управления ЭМС ножниц. На графиках рис. 5.6 и 5.7 изображены экспериментальные и полученные в результате моделирования кривые в одинаковых масштабах и совме-

щённые по времени. Из результатов сопоставления следует, что разработанные

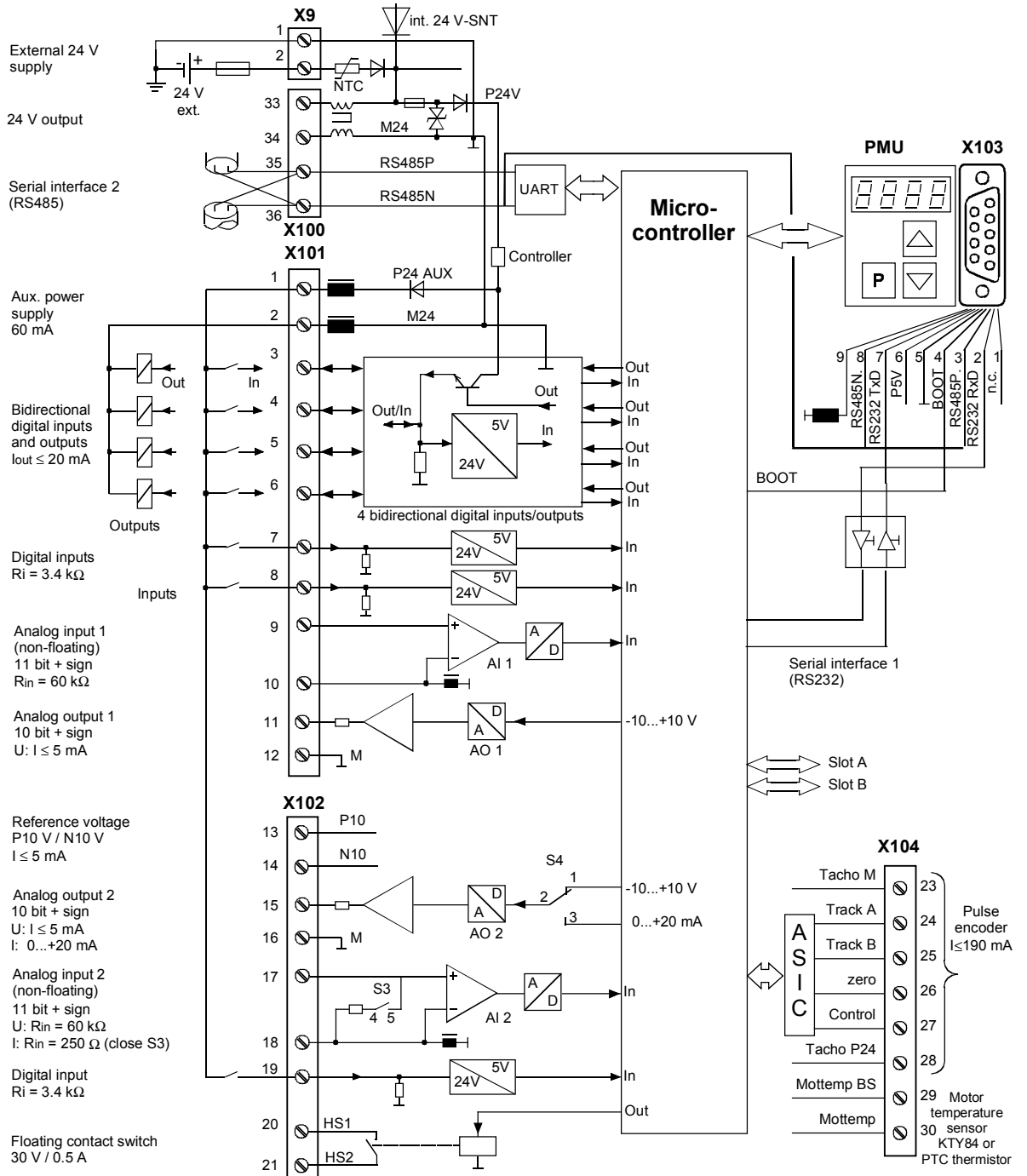


Рис. 5.9. Схема внешних соединений преобразователя SIMOVERT MASTER DRIVES.

математические модели адекватно описывают реальные процессы протекающие в ЭМС системы управления ножницами.

5.5. Выводы по главе

1. Раскрыты особенности технологического процесса резки проката на комплексе резки стана 2800 ООО «Уральская сталь» и даны технологические характеристики установленного оборудования. Электропривод всех механизмов комплекса резки осуществляется от асинхронных двигателей, питаемых преобразователями частоты SIMOVERT MASTER DRIVES фирмы Siemens. Управление преобразователями производится по сети PROFIBUS DP контроллером SIMATIC S7-400.

2. Проведён анализ существующих систем управления однокривошипными ножницами комплекса резки стана 2800 (ООО «Уральская сталь») и двухкривошипными ножницами стана 5000 (цех ЛПЦ-3 ООО «Северсталь») и выявлены основные их недостатки. Наиболее существенными из них являются: высокий уровень помех и электрического и механического характера в каналах обратных связей систем управления; завышены уставки тока намагничивания в преобразователях частоты.

3. Произведено сравнение экспериментальных данных, полученных на станах 2800 и 5000 с результатами моделирования одно- и двухкривошипных ножниц, проведённых по предложенным методикам и разработанным компьютерным моделям, которое показывает, что математические модели адекватно описывают процессы, происходящие в реальных ЭМС управления.

4. На основе предложенных методик и разработанных математических моделей выработаны рекомендации по совершенствованию систем управления комплексом резки стана 2800, позволяющие снизить энергозатраты и повысить производительность, без снижения качества готовых листов. Рассчитан режим управления главным приводом ножниц, позволяющий получить экономию электроэнергии до 9% за цикл резки. Выполнен расчёт режима согласованного управления работой привода ножниц и механизма качания рольганга, позволяющий сократить время цикла на 0,85 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная работа посвящена исследованию и совершенствованию существующих систем управления комплексами поперечной резки толстолиствого проката. Задачи, поставленные вначале диссертационной работы, отражают основные тенденции развития систем автоматизации прокатного производства. Это неоднократно отмечалось на международных, всероссийских и межвузовских конференциях, где прошла апробация научных результатов работы.

Диссертационная работа включает в себя анализ процессов и применяющихся на сегодняшний день систем управления комплексами резки толстолиствого листового проката прокатных станков, на основании чего, выявлены основные недостатки применяющихся систем управления и основные направления научной работы:

1. Траектории движения ножей во многом определяют качество готовых листов на выходе участка резки прокатных станков. Это объясняется влиянием напряжений и деформаций, возникающих в процессе резки на геометрические параметры мерного листового проката. Причиной подобных деформаций является несоответствие действительной траектории движения ножа оптимальной траектории в каждый момент времени процесса резки. Повышение качества резки возможно путём применения электрической синхронизации кривошипов взамен механической и формирования траектории движения ножа средствами систем управления электропривода.

2. Применяющийся на сегодняшний день способ установки бокового зазора между ножами оператором на основании табличных данных не обеспечивает качественного реза проката, поскольку не учитывает затупления ножей, деформации в станине ножниц в процессе реза, температуры разрезаемого проката, постепенного износа механизма резания ножниц, что приводит к дополнительным затратам на обработку кромок листа. Применение автоматизированной системы управления боковым зазором позволит учесть все эти факторы и оперативно подстраивать его с учётом всех изменяющихся факторов.

3. В настоящее время управление механизмом резания осуществляется по

трапецеидальному графику задания скорости, что в ряде случаев не является оптимальным с точки зрения энергопотребления. Поскольку суммарная мощность главного привода ножниц составляет 800 — 1600 кВт, то проблема оптимизации системы управления с целью снижения энергозатрат является на сегодняшний день актуальной.

4. Применяемые в настоящее время системы управления комплексами резки листового проката не обеспечивают минимальных удельных энергозатрат при заданной производительности комплекса, добиться которых можно путём совмещения операций во времени, сокращения промежутков времени между отдельными операциями и достижения оптимальных с точки зрения энергозатрат режимов выполнения каждой операции на участке резки в целом.

Для решения поставленных задач и проведения исследований важнейшее значение имеет построение математических моделей процесса резки и систем электропривода механизмов комплекса резки прокатных станков, учитывающих реальное взаимодействие отдельных элементов и механизмов, а также процессы, протекающие в подсистемах ПЧ–АД. Разработанные математические модели ножниц поперечной резки различного кинематического исполнения представляют собой совокупности подмоделей отдельных элементов электромеханической системы управления ножницами.

Научная новизна работы заключается в том, что повышение точности обкатывания и поддержание заданного перекрытия между ножами обеспечивается средствами электропривода за счёт электрической синхронизации кривошипов и переменного угла рассогласования в зоне реза. Разработанные математические модели учитывают взаимодействие ножа с прокатом, переменность усилия резки по длине реза механические свойства разрезаемого проката, допускают в расчёте задавать произвольную форму режущей кромки ножа и учитывают динамические свойства механизмов резания и систем ПЧ–АД.

Компьютерное моделирование, выполненное в среде пакета MATLAB 5.2/SIMULINK, позволило оценить достоверность разработанных моделей. При исследовании функционирования разработанных алгоритмов автоматической оп-

тимизации бокового зазора, оптимизации режима управления электроприводами, расчёта режима управления углом рассогласования между кривошипами использовались программы, написанные на языке скриптов MATLAB.

Научная работа проводилась в рамках хоздоговорной НИР «Исследование электромеханических систем ножниц с катящимся резом и выдача рекомендаций для проектирования», вследствие чего при моделировании и проведении исследований использовались технические и технологические параметры оборудования участка резки 2800 ОАО «Уральская Сталь».

Таким образом можно сделать следующие выводы по диссертационной работе:

1. Сформулированы требования к системам управления электроприводами комплексов резки листового проката, на основании которых обобщены принципы построения данных систем и выявлены тенденции их развития. К последним следует отнести: комплексную автоматизацию технологического процесса резки листового проката на базе современной компьютерной техники, снижение динамических нагрузок в приводах комплекса резки за счёт использования соответствующих алгоритмов управления, приближение траектории движения ножа в процессе реза к качению без проскальзывания, внедрение частотно-регулируемого асинхронного привода и энергосберегающих алгоритмов управления, увеличение производительности комплекса за счёт совмещения отдельных операций и т. д.

2. Разработаны математические и компьютерные модели ЭМС ножниц поперечной резки, наиболее полно учитывающие взаимодействие ножниц с разрезаемым прокатом, а также скрипты для пакета MATLAB, осуществляющие визуализацию механизма резания.

Математические модели ножниц включают в себя описание кинематики и динамики механизма резания, и учитывают переменность момента инерции, а также моментов от неуравновешенных масс. Кроме того, в них входит математическое описание системы ПЧ–АД. Модели учитывают взаимодействие ножа с прокатом, переменность усилия резки по длине реза и механические свойства

разрезаемого проката, допускают в расчёте задавать произвольную форму режущей кромки ножа.

Модели использовались для проведения исследований существующих и вновь разрабатываемых алгоритмов управления главными электроприводами ножниц с целью оценки их работы в условиях, максимально приближенных к реальным, а также для синтеза систем управления.

3. Предложено использование в двухкривошипных ножницах, электрической синхронизации вращения кривошипов вместо применяемой в настоящее время механической. Разработан и реализован на языке скриптов MATLAB алгоритм расчёта закона управления углом рассогласования между кривошипами, обеспечивающий заданное перекрытие между ножами практически по всей длине реза. При этом, предусматривается регулирование перекрытия между ножами в зависимости от толщины разрезаемого проката.

На сегодняшний день синхронизация вращения кривошипов осуществляется механически с помощью синхронизирующих и паразитных шестерней. Кривошипы жёстко связаны, и их мгновенные скорости вращения по модулю равны. Траектория движения ножа формируется подбором конструктивных параметров механизма резания. Однако, из-за несовершенства кинематики таким образом не удаётся обеспечить движение ножа ножниц полностью совпадающим с обкатыванием. Известно, что при резке толстых листов, использование отрицательного перекрытия благоприятно отражается на качестве резки. Новизна состоит в том, что повышение точности обкатывания и поддержание заданного перекрытия обеспечивается средствами электропривода.

Исследования показали, что обеспечить постоянное перекрытие можно только при реверсивном вращении кривошипов. Угол реза во время внедрения ножа в лист при использовании электрической синхронизации больше, чем при использовании механической, что обеспечит снижение пика усилия резки в момент врезания. После врезания ножа в лист и вплоть до окончания реза нож двигается с постоянным перекрытием, что не обеспечивается при фиксированном угле рассогласования, получаемом при механических способах синхронизации

движения кривошипов.

4. Предложены и реализованы на языке скриптов MATLAB алгоритмы оптимизации установки бокового зазора. Боковой зазор между ножами имеет большое значение для чистоты поверхности реза. Известно, что при оптимальной величине зазора усилие реза минимально, а при отклонении от неё, оно возрастает на 10...15%, при этом износ ножей происходит быстрее. На сегодняшний день, зазор устанавливается оператором по таблицам, составленным на основе опытных данных. При этом реальная величина выставленного зазора может несколько отличаться от оптимального значения, из-за деформации в станине ножниц, постепенного износа механизма резания и др. Для повышения качества резки разработан алгоритм автоматической подстройки зазора.

Он осуществляет минимизацию относительной величины бокового зазора, посредством минимизации усреднённого значения приведённого усилия. Используются измерения силы реза, полученные при резке листов длиной не менее 20 толщин листа во время установившегося процесса резания. Непосредственное измерение усилия реза осуществляется с помощью месдоз. С течением времени оптимальное значение выставляемого зазора может изменяться. Для ускорения адаптации ограничивается число учитываемых значений, а при выявлении тенденции изменения среднего усилия в одном направлении увеличивается удельный вес последних измерений. Алгоритм оптимизации бокового зазора предусматривает накопление статистики об оптимальных зазорах для резки проката в различных режимах.

5. Предложены и реализованы на языке скриптов MATLAB алгоритмы оптимизации режима управления приводами кривошипов, обеспечивающие снижение энергозатрат на цикл порезки проката.

Суммарная мощность двигателей главного привода ножниц составляет 800–1600 кВт, поэтому актуальна задача оптимизации режима их работы по энергопотреблению. Методика оптимизации заключается в следующем. На основе математической модели строится функционал, выражающий зависимость энергозатрат за цикл резки от режима управления электроприводом ножниц, а так-

же определяются граничные условия, исходя из требований технологии. Затем, оптимизируется задание положения кривошипа. Алгоритм, разработанный для этой цели учитывает ограничения, налагаемые на значения функции, а также на её производную по времени.

В настоящее время управление механизмом резания осуществляется по трапецеидальному графику задания скорости. Новизна научного положения состоит в том, что для управления механизмом резания используется задание более сложного вида. Задание положения кривошипа разбито на две зоны (зону разгона и резки листа и зону торможения). Установлено, что длительность первой зоны влияет на производительность комплекса резки, в то время, как длительность второй зоны можно произвольно изменять в больших пределах без снижения производительности. За счёт оптимизации режима управления было получено снижение энергозатрат за цикл резки на 9%.

6. Предложена методика расчёта режимов работы электроприводов механизмов комплекса резки листового проката по условию минимизации энергозатрат.

Порезка проката включает в себя ряд операций, выполняемых механизмами комплекса резки. Очерёдность их следования, возможность совмещения и, как следствие, алгоритма управления комплексом определяются технологическим процессом и возможностями ЭМС. Предлагаемая методика направлена на расчёт интервалов времени в соответствии с графиками перемещения и оптимизацию режимов работы механизмов комплекса.

Новизна методики заключается в формализованном подходе к синтезу алгоритма управления временными параметрами работы отдельных механизмов комплекса резки на основании циклограмм и уравнений динамики, а также в оптимизации режимов работы отдельных механизмов по критерию энергосбережения. Применение данного подхода позволило выявить ряд возможностей повышения производительности за счёт ускорения и совмещения ряда операций.

В результате анализа были установлены следующие возможности для по-

вышения производительности комплекса резки: так как угол наклона плоскости рольганга качающегося невелик, и рез заканчивается несколько раньше, чем нож выходит из контакта с разрезаемым прокатом, то подавать команду на отвод отрезанного листа можно сразу после окончания реза. Если механизм выравнивания листа допускает выравнивание движущегося проката, возможно минимизировать цикл за счёт меньшего снижения скорости подачи проката (когда в ножницы задаётся более широкий или длинный раскат), за счёт чего он будет быстрее проходить расстояние до линии реза.

Выполнена оптимизация взаимного перемещения механизма резания ножиц и рольганга качающегося. Расчёты и моделирование показывают, что оптимальным является вариант с реверсивным вращением эксцентрика механизма качания. Достаточно точную отработку положения обеспечивает трёхконтурная система подчинённого регулирования с параллельной коррекцией по заданию скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учебник для вузов/ А.М. Корытин, Н.К. Петров, С.Н. Радимов, Н.К. Шапарев.— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Автоматизированный электропривод промышленных установок/ Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов В.П. Грехов и др./ Под ред. Г.Б. Онищенко. — М.: РАСХН, 2001.
3. Агрегаты для обрезки кромок листов и измельчения обрезки. / Экспресс-информация, черная металлургия, сер. прокатное производство. Вып. 22. —М.,— 1985. — 2 с.: ил.
4. Адамович Р.А. Кинематический и силовой расчёты ножниц с катящимся резом. /Р.А. Адамович, Ю.Ф. Гаврюшов, А.Д. Пальмин, А.М. Рогоза, Л.М. Рудельсон// Исследование, расчёты и конструирование машин металлургического производства: сб. науч. тр./ под ред. Дроздова В.Г., Краузе Г.Н. — М.: Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1980. — С. 21—38.
5. Адамович Р.А. Методика расчёта ножниц с катящимся резом. / Р.А. Адамович, А.Д. Пальмин, А.М. Рогоза, Л.М. Рудельсон // Новые конструкции и исследования, агрегатов и машин обработки проката: сб. науч. тр. — М.: ВНИИМЕТМАШ, — 1985. — С. 62— 73.
6. Адамович Р.А. Расчёт гильотинных ножниц. / Р.А. Адамович, А.Э. Калле // Исследование, расчёты и конструирование машин металлургического производства: сб. науч. трудов/ под ред. Дрозда В. Г. — М.: Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1980. — С. 11—14.
7. Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). — М.: «Наука», 1973. — 632 с.
8. Башарин А.В. Управление электроприводами. /А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. — Л.: Энергоиздат, 1982.
9. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов /М.П. Белов, В.А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — М.: Издательский центр «Акаде-

- мия», 2004 г. — 576 с.
10. Бойденко Н.Г. Исследование процесса резки листов на ножницах. / Н.Г. Бойденко, В.П. Капота, И.И. Капнин// Новые конструкции и исследования агрегатов и машин обработки проката: сб. науч. тр./ под ред. Попова Б.В.— М.: Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1985. — С. 34 — 38.
 11. Бойденко Н.Г. Определение координат подвижного суппорта ножниц с катящимся резом. / Н.Г. Бойденко, В.Д. Шейнкман, В.П. Капота //Новые конструкции и исследования агрегатов и машин обработки проката: сб. науч. тр./ под ред. Попова Б.В. — М.: Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1985. — С. 78— 81.
 12. Бойденко Н.Г. Профилирование инструмента ножниц с катящимся резом. / Н.Г. Бойденко, В.П. Капота, В.Я. Панюхно// Прогрессивные технология и машины для обработки и отделки прокатного производства: сб. науч. тр./ под ред. Попова Б.В., Коновалова Л.В. — М.: ВНИИМЕТМАШ— 1986. — С. 47— 54.
 13. Борцов Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями. / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992.
 14. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 256 с.
 15. Гультияев А. Визуальное моделирование в среде Matlab: учеб. курс / А. Гультияев. — СПб.: Питер бук, 2000.— 430 с.
 16. Дацковский Л.Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) /Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой, Б.И. Абрамов// Электротехника. — 1997.— № 10 — С. 45—51.
 17. Довбня И.М. Роботизированные технологические комплексы в ГПС. /И.М. Довбня, А.Н. Кондратьев, Е.И. Юревич — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1990.

18. Демидов В.П. Процесс резания сортового проката вращающимся ножом на цилиндрической поверхности гладкого барабана. / В.П. Демидов, А.З. Слоним // Совершенствование технологии, конструкции и расчётов металлургических машин: сб. науч. тр. / под. ред. Попова Б.В., Коновалова Л.В. — М.: Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1986.
19. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. — М.: Металлургия, 1975.
20. Жуков. И.Б. [Исследование динамики систем управления ножницами поперечной резки листового проката.](#)/ И.Б. Жуков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. «Электротехника»/ Санкт-Петербург. гос. электротехн. ун-т. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. — Вып. 1. — С. 7— 15.
21. Жуков И.Б. Кинематический расчет двухкривошипных ножниц в задачах оптимизации электропривода комплексов резки листового проката / И.Б. Жуков; Санкт-Петербург. гос. электротехн. ун-т. — СПб., — 2004. — 23 с. — Деп. в ВИНТИ 22.06.2004, № 1048–В2004
22. Жуков И.Б. Компенсация возмущений в электроприводе. / И.Б. Жуков, Е.Н. Ковалёв // ХХІХ Неделя науки СПбГПУ: тез. докл. Межвуз. научн-техн. конф. студентов и аспирантов, г. Санкт-Петербург, 27 нояб. — 02 декаб. 2000 г. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — Ч. V. С. 136—138.
23. Жуков И.Б. [Математическое описание уравнений кинематики ножниц с катящимся резом в задачах энергосберегающего управления.](#)/ И.Б. Жуков, О.И. Зементов // Электромеханические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 8./Под ред. С.И. Лукьянова, Д.В. Швидченко. — Магнитогорск: МГТУ, 2004. — Вып. 9. — С. 73—79.
24. Жуков И.Б. Методика формирования оптимальной траектории движения ножа ножниц поперечной резки толстолистового проката / И.Б. Жуков, Е.Н. Ковалёв// Энерго-ресурсосбережение, оптимизация энергопотребления на предприятиях металлургической промышленности: тез. докл. семинара, г. Магнитогорск, 6—7 окт. 2005. С. 22—25.
25. Жуков И.Б. Расчёт кинематики и динамики однокривошипных ножниц в

- задачах оптимизации электропривода комплексов резки листового проката. / И.Б. Жуков; Санкт-Петербург. гос. электротехн. ун-т. — СПб., — 2004. — 18 с. — ил. — Библиогр. 5 назв. — Рус. — Деп. в ВИНТИ 22.06.2004, № 1047–В2004
26. Жуков. И.Б. **Способ управления электроприводом с компенсацией возмущений.** / И.Б. Жуков, Е.Н. Ковалёв // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр./СПб.: Изд-во СПбГТУРП, 2002, С. 250–254. ISBN 5–230–14288–Х.
27. Жуков И.Б. Оптимизация автоматизированных электромеханических систем ножниц для резки листового проката. / И.Б. Жуков, Л.П. Козлова // XXXII Неделя науки СПбГПУ: тез. докл. Межвуз. научн-техн. конф. студентов и аспирантов, г. Санкт-Петербург, 24–29 нояб. 2003 г. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. — Ч. V. С. 146–148.
28. Жуков И.Б. **Оптимизация комплексов резки листового проката/** И.Б. Жуков, С.С. Борисенко, Е.Н. Ковалёв// Энергоресурсосбережение на предприятиях металлургической, горной, и химической промышленности (новые решения): тез. докл. конференции, г. Санкт-Петербург, 25–27 апр. 2005. С. 52–54.
29. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. — Киев: Изд-кое объединение «Вища школа», 1975. — 424 с.
30. Зементов О.И. Минимизация энергозатрат в электромеханических системах управления ножницами с катящимся резом. /О.И. Зементов, Л.П. Козлова, И.Б. Жуков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. «Электротехника» / Санкт-Петербург. гос. электротехн. ун-т. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. — Вып. 1. — С. 19 — 27.
31. Зементов. О.И. Формализация моделей электромеханических систем комплекса резки листового проката. / О.И. Зементов, Л.П. Козлова, И.Б. Жуков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003, С. 28–32.
32. Зырянов. В.В. Опыт эксплуатации ножниц с «катящимся резом». /В.В. Зы-

- рянов, А.М. Иванов, И. Ю. Гайтанов// *Металлург.* — 2004. — № 3. — С. 51–52.
33. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: «Машиностроение», 1978. — 736 с.
34. Ильинский Н.Ф. Энергосбережение в электроприводе. /Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов // — М.: Энергоатомиздат, 1989.
35. Интерфейсы систем обработки данных: Справочник/ А.А. Мячев, В.Н. Степанов, В.К. Щербо; Под. ред. А.А. Мячева. — М.: Радио и связь, 1989.
36. Исследование однокривошипных ножниц с дугообразным ножом: Отчёт о НИР/ ВНИИМЕТМАШ; Руководитель Щербаков Л.П. — № ГР 01880039111.— М., 1988г.— 50 с.: ил.
37. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. — М.: Энергия, 1971.
38. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
39. Ковалев. Е.Н. Система управления станком поперечной резки. /Е. Н. Ковалев, С.В. Гринь, Г.И. Ольховик, С.П. Смирнов// Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр./СПбГТУРП. СПб., 2001. — С. 27–32.
40. Ковчин С. А. Теория электропривода: Учебник для вузов./ С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин — СПб.: Энергаториздат. Санкт-Петербургское отделение, 1994. — 496 с.: ил.
41. Крылов Н.И. Усилия резания металлов на ножницах. / Н.И. Крылов, Б.М. Тарасов // Труды ВНИИМЕТМАШ: сб. № 27 / под ред. Королёва А.А., Дроздова В.Г. — М.: Изд-во ВНИИМЕТМАШ, 1970.
42. Мастрюков А.В. Технология металлов: Учеб. пособие. — 2-е изд-е, перераб. и доп. — М.: Машгиз, 1952. — 494 с.
43. Медведев В.С. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов. /В.С. Медведев, В.Г. Потёмкин. — М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 1999. — 287 с.

44. Новиков В.А. Анализ и синтез типовых взаимосвязанных электромеханических систем: Учеб. пособие Л.:ЛЭТИ, 1983.
45. Новиков В.А. Типовые автоматические системы управления электроприводами производственных механизмов: Учеб. пособие. —Л. ЛЭТИ, 1992.
46. Носаль В. В. Исследование резания металлов на ножницах с наклонными ножами. /В.В. Носаль// Исследование металлургических машин: сб. науч. тр. ЦНИИТМАШ, кн. 27/ под ред. Целикова А.И. — М.: МАШГИЗ, 1949. — С. 34 — 91.
47. Пат. 696695 Российская Федерация, МПК⁴ В 23 Д 15/04. Ножницы для резки листового металла/ Крылов Н.И., Дунаевский В.И., Бойденко Н.Г., Капота В.П.; заявитель и патентообладатель Славянский филиал ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения. — № 2039563/22 — 2; заявл. 01.07.74; опубл. 30.08.86, Бюл. № 32. — 3 с.: ил.
48. Пат. 1215893 Российская Федерация, МПК⁴ В 23 Д 35/00. Нож для листовых ножниц с катящимся резом/ Адамович Р.А., Рудельсон Л.М., Рогоза А.М., Пальмин А.Д., Черников О.Р.; заявитель и патентообладатель Колпинское отделение ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения Научно-производственного объединения "ВНИИМЕТМАШ". — № 3770234/25 — 27; заявл. 06.07.84; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9. — 3 с.: ил.
49. Пат. 1286346 Российская Федерация, МПК⁴ В 23 Д 15/08. Ножницы для резки листового материала/ Винников Л.К., Панюхно В.Я., Капота В.П., Аверкиев Н.Е.; заявитель и патентообладатель Славянский филиал ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения. — № 3846350/25 — 27; заявл. 22.01.85; опубл. 30.01.87, Бюл. № 4. — 4 с.: ил.
50. Пат. 758637 Российская Федерация, МПК³ В 23 Д 15/06. Ножницы для резки листового материала/ Щербаков Л.П., Горелов О.В., Калетин И.М.; заявитель и патентообладатель Колпинское отделение ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения Научно-производственного объединения "ВНИИМЕТМАШ". — № 2681450/25 — 27; заявл. 30.10.78; опубл. 29.07.80, Бюл. № 12. — 7 с.: ил.

51. Пат. 2190506 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 Д 15/06. Ножницы для резки листового материала/ Астахов В.Г., Дунаев В.А., Кутузов А.В., Клопов В.И., Горелов О.В., Хорьков В.Б.; заявитель и патентообладатель ОАО Колпинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения. — № 2000111214/02; заявл. 05.05.2000; опубл. 10.10.2002, Бюл. № 28. — 4 с.: ил.
52. Пат. 2020046 Российская Федерация, МПК⁵ В 23 Д 15/06. Ножницы для резки листового металла/ Щербаков Л.П., Калетин И.М., Горелов О.В., Петров А.В., Кутузов В.Е.; заявитель и патентообладатель Колпинское отделение ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения им. А.И. Целикова. — № 4952445/27; заявл. 28.06.91; опубл. 30.09.94, Бюл. № 18. — 4 с.: ил.
53. Пат. 2058859 Российская Федерация, МПК⁶ В 23 Д 15/06. Кромкообрезные ножницы/ Калетин И.М., Щербаков Л.П., Горелов О.В., Кутузов В.Е., Петров А.В.; заявитель и патентообладатель Колпинское отделение ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения им. А.И. Целикова. — № 4905279/08; заявл. 28.01.91; опубл. 27.04.96, Бюл. № 12. — 6 с.: ил.
54. Пат. WO 87/04649 Российская Федерация, МКИ⁴ В 23 D 15/04, 15/08, 15/10. Способ резки листового материала и ножницы с катящимся резом для осуществления этого способа/ Бойденко Н.Г., Шандыба Н.И., Шейнман В.Д., Панюхно В.Я., Капота В.П.; Заявитель и патентообладатель Славянский филиал ВНИ и ПКИ металлургического машиностроения им. А.И. Целикова.— № PCT/SU86/00007; Заявл. 31.01.86; опубл. 13.08.87, — 21 с.: ил.
55. Прокатное производство: справочник. Под ред. д. т. н. Е. С. Рокотяна. М.: Металлургиздат, 1962.
56. Роботизированные производственные комплексы/ Ю.Г. Козырев, А.А. Кудинов, В.Э. Булатов и др.; Под ред. Ю.Г. Козырева, А.А. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987.
57. Сафронова Т. В. Энергосиловые параметры при резке толстолистового проката на ножницах. / Т. В. Сафронова // Теория и технология произ-

- водства толстого листа. — М.: Металлургия, 1986.— С. 97— 92.
58. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. — Ч.3. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
59. Создание и исследование опытного образца ножниц с регулируемым углом резания для резки листов: Отчет о НИР / ВНИИМЕТМАШ; Руководитель Л.П. Щербаков.—№ ГР 01850013696; Инв. № 0287.0076717.—М., 1987, 83 с.: ил.
60. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений /В.М. Терехов, О.И. Осипов; Под ред. В.М. Терехова. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 304 с.
61. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. — М.: Металлургия, 1981. — 576 с.
62. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода: Уч. пособие для вузов/ М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер — М.: Энергия, 1979.— 616 с., ил.
63. Файнштейн. В.М. Отделка готовой продукции в листопрокатных цехах за рубежом. / В.М. Файнштейн // Бюл. ЦНИИГиТехнЭкон, М., 1966, № 22. — С. 16 — 35.
64. НИММ Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. — М.: Мир, 1975.
65. Шелехов С.А. Рольганговые двигатели серии AP. /Шелехов С.А., Шелехова Т.С. // М.: «Энергия», 1977. — 184 с.
66. Шестаков В.М. Типовые замкнутые системы автоматического управления. / В.М. Шестаков, В.Н. Егоров // Учеб. пособие. Л.: Изд-во СЗПИ, 1979 — 70 с.
67. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. — М.: Наука, 1964. — 424 с.
68. Crasemann H. I. Kraft in Scheren. // Werkstofftechnik.—1961.— Vol. 51.— P. 396— 403.

69. SIMATIC Комплексная автоматизация производства. Каталог ST 70& — Ч. 1, ч. 2. — Germany, Erlangen, 2001 г.
70. SIMOVERT MASTER DRIVES. Vector Control. Katalog Siemens DA 65. 10. — Germany, Erlangen, 1998/1999.
71. Sperling H. Die Schnittgwalitat bei Tafelscheren/ Blech. № 4, 1968. — P. 164—169.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЛИСТИНГИ СКРИПТОВ ДЛЯ МАТЛАВ

В данном приложении приводятся листинги скриптов для пакета Matlab.

П1.1. Листинги к первой главе

Листинг №1.1. Функция поиска решения уравнения одной неизвестной с заданными параметрами (GetSolves).

```
function Ansv=GetSolves(g, XLim, y, st)
% Ищет решение уравнения  $g(x,y)=0$  одной переменной  $x$ , заданного
% в строковой форме, на интервале  $XLim=[xmin, xmax]$ 
%  $x$  -- аргумент функции, который варьируется при поиске минимума
%  $y$  -- параметр (вектор параметров) функции.
%  $st$  -- количество итераций, необязательный аргумент;
% Вызов GetSolves('функция', [Мин.  $x$ , Макс.  $x$ ], Параметры функции, количество
% итераций);
global hmiddle Rknife huser
global l1 l2 l3 l4 l5 l6 beta la lb xa ya xb yb
bx = XLim(1); x=bx; by = eval(g);
ex = XLim(2); x=ex; ey = eval(g);
if nargin == 4
    niter=st;
else
    niter=20;
end
for i=1:niter
    x=(ex+bx)/2; fy=eval(g);
    if sign(by)~=sign(ey)
        if sign(fy)==sign(ey);
            ex=x; ey=fy;
        else
            bx=x; by=fy;
        end;
    else
        if abs(by)<abs(ey);
            ex=x; ey=fy;
        else
            bx=x; by=fy;
        end;
    end;
end;
Ansv=x;
```

Листинг №1.2. Процедура поиска минимума функции одной переменной с заданными параметрами (FindMin).

```
function answ=FindMin(g, XLim, y);
% Ищет минимум функции  $g=f(x,y)$  одной переменной  $x$ , заданной
% в строковой форме, на интервале  $XLim=[xmin; xmax]$ 
%  $x$  -- аргумент функции, который варьируется при поиске минимума
%  $y$  -- параметр (вектор параметров) функции.
% Вызов FindMin('функция', [Мин.  $x$ , Макс.  $x$ ], Параметры функции);
kb=XLim(1); ke=XLim(2);
x=kb; j=x; a1=eval(g);
for i=1:10
    t=(ke-kb)/10; % t -- шаг приращения
    for x=kb:t:ke
        a2=eval(g);
```

```
    if a1>a2
        j=x; a1=a2;
    end;
end;
kb=max([j-t,kb]); ke=min([j+t,ke]);
end;
answ=j;
```

Листинг №1.3. Функция возвращает абсолютную величину вектора (AbsV)

```
function X=AbsV(Vec);
% Функция перемножает векторы.
if size(Vec)==[3, 1]
    X=abs(Vec);
elseif size(Vec)==[2, 1]
    X=sqrt(Vec(1)^2+Vec(2)^2);
elseif size(Vec)==[1, 1]
    X=sqrt(Vec(1)^2+Vec(2)^2+Vec(3)^2);
end;
```

Листинг №1.4. Функция осуществляет векторное произведение двух векторов (MultyV).

```
function Vec=MultyV(Vec1, Vec2);
% Функция перемножает векторы.
% Векторы могут быть заданы в одной из 3 форм
% 1. Вектор задан тремя своими координатами, тогда результат --
% векторное произведение, содержащее три координаты.
% 2. Вектор задан двумя координатами, тогда считается, что он расположен
% в плоскости XY, и третья координата считается равной нулю
% 3. Вектор задан одной координатой, тогда считается, что он
% перпендикулярен к плоскости XY, и число отражает координату Z.
% Если хоть один вектор задан тремя координатами, то результат --
% вектор, заданный тремя координатами.
% Если один из векторов задан плоскостью, а другой -- осью, то
% результат --- вектор, содержащий 2 координаты в плоскости (x,y)
% Если оба вектора заданы плоскостью, то результат -- вектор,
% содержащий одну координату z.
% Если оба вектора заданы одной координатой, то результат -- вектор,
% содержащий 3 координаты ([0 0 0]).
S1=size(Vec1);
if S1(1)>1
    Vec1=Vec1';
end;
S2=size(Vec2);
if S2(1)>1
    Vec2=Vec2';
end;
if size(Vec1)==[1, 3]
    V1=Vec1; n=3;
elseif size(Vec1)==[1, 2]
    V1=[Vec1, 0]; n=2;
    Vec=zeros(1,2);
elseif size(Vec1)==[1, 1]
    V1=[0, 0, Vec1]; n=1;
    Vec=zeros(1,1);
end;
if size(Vec2)==[1, 3]
    V2=Vec2; m=3;
elseif size(Vec2)==[1, 2]
    V2=[Vec2, 0]; m=2;
```

```
Vec=zeros(1,2);
else size(Vec2)==[1, 1]
    V2=[0, 0, Vec2]; m=1;
    Vec=zeros(1,1);
end;
if (m==2) & (n==2)
    Vec=V1(1)*V2(2)-V1(2)*V2(1);
elseif (m<=2) & (n<=2) & (n~=m)
    Vec(1)=V1(2)*V2(3)-V1(3)*V2(2);
    Vec(2)=-(V1(1)*V2(3)-V1(3)*V2(1));
else
    Vec(1)=V1(2)*V2(3)-V1(3)*V2(2);
    Vec(2)=-(V1(1)*V2(3)-V1(3)*V2(1));
    Vec(3)=V1(1)*V2(2)-V1(2)*V2(1);
end;
```

Листинг №1.5. Функция осуществляет интерполяцию заданных таблично данных

(Linterp).

```
function Answ=Linterp(InArr, Alpha);
global AlphaTrn
A=Alpha-floor(Alpha/pi/2)*2*pi;
Index=min(find(AlphaTrn>A));
%InSizes=size(InArr);
Index=Index-1;
y0 = InArr(Index);    y1 = InArr(Index+1);
x0 = AlphaTrn(Index); x1 = AlphaTrn(Index+1);
if min([y0, y1])<=-1e10
    Answ=0;
else
    Answ=y0+(A-x0)*(y1-y0)/(x1-x0);
end;
```

Листинг №1.6. Функция осуществляет объявление общих для всех моделей ножниц глобальных переменных (Inicomn).

```
global direct
global xlst ylst Blst h
global taumax epslnotr epslnnad sigmav z hknife
global alphGRPH alphaGRPH FresGRPH VaGRPH VmGRPH OmaGRPH
global MresGRPH XaGRPH
% Параметры для Стали 20
taumax = 37*9.8/0.001^2; % Максимальное сопротивление параллельному резанию
epslnotr = 0.35; % Глубина относительного отрыва
epslnnad = 0.25; % Глубина относительного надреза
sigmav = taumax/0.63; % Предел прочности при растяжении (для
                    % сталей с sigmat/sigmav<0,7)
z=0.95; % Значение при "бесконечной" длине отрезаемой части полосы (lambda>12)
```

Листинг №1.7. Функция выполняет расчёт угла реза и положения точек врезания ножа в лист (CalcKnifePOS).

```
function Pos = CalcKnifePOS(alph2, x2, y2);
global phi0 Deltax_ hmiddle lknife Rknife xlst ylst Blst h epslnotr
% Входные переменные:
% x2, y2 -- положение точки 2;
% alph2 -- угол наклона звена 2 ;
% Для вычислений, связанных с ножом, должны быть заданы функция,
% описывающая форму ножа fknife(x) и производная dfknife(x) функции
% fknife(x) в системе координат x'O'y'.
% Кроме того, должен быть задан угол phi0 поворота системы
% координат, смещение DeltaX_, положение линии реза hmiddle и
% длина ножа lknife. Функция возвращает
%Pos = [xm, xO_, psi, xf1, xA1, alph_1, xf2, xA2, alph_2;
%       ym, yO_, 0, yf1, yA1, Fres_1, yf2, yA2, Fres_2];
% Здесь определяются следующие параметры
% (xm, ym) -- положение нижней точки ножа;
% (xO_, yO_) -- положение начала системы координат x'O'y',
%              связанной с суппортом;
% psi -- угол между осями Ox и O'x'
%       Для случая резки к оси коросмысла
% (xf1, yf1) -- положение точки ножа, к которой приложена сила;
% (xA1, yA1) -- положение точки врезания ножа в лист;
% alph_1 -- угол реза alph
% Fres_1 -- Флаг, указывающий, что рез может происходить
%       Для случая резки от оси коросмысла
% (xf2, yf2) -- положение точки ножа, к которой приложена сила;
% (xA2, yA2) -- положение точки врезания ножа в лист;
% alph_2 -- угол реза alph
% Fres_2 -- Флаг, указывающий, что рез может происходить
%
% Определим параметры системы координат, связанной с суппортом
psi = alph2-phi0;
xO_ = x2-Deltax_*cos(psi);
yO_ = y2-Deltax_*sin(psi);
%
% Определим положение листа в системе координат x'O'y'
y_lst = [tan(psi), (xlst-xO_)/cos(psi)];
y_Blst = [tan(psi), (xlst+Blst-xO_)/cos(psi)];
ym_min_ = GetSolves('fknife(y(2)-x*y(1))-x',[ylst-1, ylst+1], y_lst);
xm_min_ = max([0, y_lst(2)-ym_min_*y_lst(1)]);
ym_max_ = GetSolves('fknife(y(2)-x*y(1))-x',[ylst-1, ylst+1], y_Blst);
xm_max_ = min([lknife, y_Blst(2)-ym_max_*y_Blst(1)]);
%
% Определим положение нижней точки ножа m
y_ = [psi, yO_, hmiddle];
y_A = [psi, yO_, ylst+h];
xm_ = GetSolves('dfknife(x)-tan(y(1))',[0, lknife], y); % в x'O'y'
ym_ = fknife(xm_);
xm = xO_+xm_*cos(psi)+ym_*sin(psi); % в xOy
ym = yO_-ym_*cos(psi)+xm_*sin(psi);
%
% Определим угол реза alph
if ylst+h>ym
    xA1_ = GetSolves('fknife(x)-tan(y(1))*x-(y(2)-y(3))/cos(y(1))', [-10, xm_], y_A);
    yA1_ = fknife(xA1_);
    xA1 = xO_+xA1_*cos(psi)+yA1_*sin(psi);
    yA1 = yO_-yA1_*cos(psi)+xA1_*sin(psi);
    xf1_ = GetSolves('fknife(x)-tan(y(1))*x-(y(2)-y(3))/cos(y(1))', [xm_min_, xm_], y);
    yf1_ = fknife(xf1_);
    xf1 = xO_+xf1_*cos(psi)+yf1_*sin(psi);
```

```

yf1 = yO_-yf1_*cos(psi)+xf1_*sin(psi);
alph_1 = psi-atan(dfknife(xf1_));
Fres_1=1;
if xA1>(xlst+Blst) | yf1<ylst+h*(1-epslnotr)
    xf1_ = 0;      yf1_ = 0;      xf1 = 0;      yf1 = 0;
    alph_1 = 0;      Fres_1 = 0;      xA1 = -1e20;
end;
%
xA2_=GetSolves('fkknife(x)-tan(y(1))*x-(y(2)-y(3))/cos(y(1))',
    [xm_, lkknife+10], y_A);
yA2_=fkknife(xA2_);
xA2 = xO_+xA2_*cos(psi)+yA2_*sin(psi);
yA2 = yO_-yA2_*cos(psi)+xA2_*sin(psi);

xf2_=GetSolves('fkknife(x)-tan(y(1))*x-(y(2)-y(3))/cos(y(1))',
    [xm_, xmax_], y);
yf2_=fkknife(xf2_);
xf2 = xO_+xf2_*cos(psi)+yf2_*sin(psi);
yf2 = yO_-yf2_*cos(psi)+xf2_*sin(psi);
alph_2 = psi-atan(dfknife(xf2_));
Fres_2=1;
if xA2<xlst | yf2<ylst+h*(1-epslnotr)
    xf2_ = 0;      yf2_ = 0;
    alph_2 = 0;
    xf2 = 0;      yf2 = 0;
    Fres_2=0;      xA2 = -1e20;
end;
else
    xf1_ = 0;      yf1_ = 0;      xf1 = 0;      yf1 = 0;
    alph_1 = 0;      Fres_1 = 0;
    xf2_ = 0;      yf2_ = 0;      xf2 = 0;      yf2 = 0;
    alph_2 = 0;      Fres_2 = 0;
    xA1 = -1e20; yA1 = 0;      xA2 = -1e20; yA2 = 0;
end
%
Pos = [xm, xO_, psi, xf1, xA1, alph_1, xf2, xA2, alph_2;
    ym, yO_, 0, yf1, yA1, Fres_1, yf2, yA2, Fres_2];

```

Листинг №1.8. Функция, описывающая режущую кромку дугообразного ножа (fkknife).

```

function y=fkknife(x)
global lkknife Rknife huser;
y=sqrt(Rknife^2-(x-lkknife./2).^2)-sqrt(Rknife^2-(lkknife/2)^2)+huser;

```

Листинг №1.9. Функция, описывающая производную режущей кромки дугообразного ножа (dfknife).

```

function y=dfknife(x)
global lkknife Rknife;
y=-(x-lkknife/2)/sqrt(Rknife^2-(x-lkknife/2)^2);

```

Листинг №1.10. Функция расчёта усилия резки в зависимости от положения ножа (ForceRes).

```

function Fres=ForceRes(alph_, xA_, vF, direct, F);
global xlst Blst h
global taumax epslnotr epslnnad sigma v z
if direct

```



```

xA=Blst-(xA_-xlst);
if alph_>=0
    ex=1;
else
    ex=0;
end;
else
    xA=xA_-xlst;
    if alph_<=0
        ex=1;
    else
        ex=0;
    end;
end;
alph=abs(alph_);
if F~=0 & ex==0
    %
    %Расчёт максимального усилия реза
    if alph >2*pi/180
        Kerp=0.7;
    else
        Kerp=1-0.075*(alph*180/pi)^2;
    end;
    10/alph;
    Fmax=Kerp*epslnotr*h^2/tan(alph)*taumax+z*sigmav*h^2;
    u=vF/(epslnnad*h); % Скорость деформации металла
    %
    %Расчёт усилия реза в зависимости от положения ножа
    Fust = 0.72*Fmax;
    xn2 = 1.25*h*cot(alph);
    xn1 = (Fust*xn2)/(4*Fmax-3*Fust);
    xn3 = Blst-0.15*h*cot(alph);
    xk = Blst+epslnotr*h*cot(alph);
    if xA>0 & xA<=xn1
        a=Fust/xn1;
        Fres=a*xA;
    elseif xA>xk
        Fres=0;
    elseif xA>=xn1 & xA<= xn2
        a1= 0.25*(4*Fmax-3*Fust)^2/(xn2^2*(Fust -Fmax));
        b1= 0.5*(4*Fmax-3*Fust)*(Fust-2*Fmax)/(xn2*(Fust-Fmax));
        c1= 0.25*Fust^2/(Fust - Fmax);
        Fres=a1*xA^2+b1*xA+c1;
    elseif xA>=xn2 & xA<=xn3
        Fres=Fust;
    else
        a2 = -Fust/(xk-xn3)^2;
        b2 = 2*Fust*xn3/(xk-xn3)^2;
        c2 = Fust*xk*(xk-2*xn3)/(xk-xn3)^2;
        Fres=a2*xA^2+b2*xA+c2;
    end;
else
    Fres=0;
end;
end;

```

Листинг №1.11. Процедура отображения положения ножа (PlotKnLst).

```

function PlotKnLst(x2, y2, alph2, xm, ym, VA, xFr, yFr, xFl, yFl);
global phi0 Deltax_ hmiddle lknife xlst ylst Blst h
% Нарисовать нож
psi = alph2-phi0;

```

```

x0=x2-cos(alph2-phi0)*Deltax_;
y0=y2-Deltax_*sin(psi);
for i=1:100
    x_=i*lknife/100;      y_=fknife(x_);
    x(i)=x0+x_*cos(psi)+y_*sin(psi);
    y(i)=y0-y_*cos(psi)+x_*sin(psi);
end;
plot(x,y,'k');
plot(xm, ym,'x');
if nargin==10
    if VA<0
        plot(xFl, yFl,'o');
    elseif VA>0
        plot(xFr, yFr,'o');
    end;
end;
% Нарисовать лист
plot([xlst xlst+Blst xlst+Blst xlst xlst],
     [ylst ylst ylst+h ylst+h ylst]);

```

П1.2. Листинги ко второй главе

В этом разделе приводятся листинги скриптов для моделирования двухкривошипных ножниц с коромыслом, с копиром, а также однокривошипных ножниц. Кроме того, приводятся листинги скриптов, осуществляющих поиск режима управления углом рассогласования двухкривошипных ножниц, обеспечивающего поддержание заданного перекрытия в зоне реза.

Ниже приводятся листинги скриптов, предназначенные для моделирования двухкривошипных ножниц с коромыслом

Листинг №2.1. Функция, осуществляющая настройку переменных для моделирования системы управления двухкривошипных ножниц (IniCalcs2Kr).

```

% Скрипт IniCalcs2Kr.m осуществляет загрузку кинематических данных,
% хранящихся в KinData2kr, и, вызывая Create2krData, выполняет
% расчёт положений шарниров механизма
cd C:\Disertacia\2kr\
KinData2kr
global XmTrn YmTrn PsiTrn XflTrn YflTrn XAlTrn AlphlTrn FreslTrn
global XfrTrn YfrTrn XArTrn AlphrTrn FresrTrn
global tLTrn AlphaTrn AlphbTrn
Calc2kr('DD', 'DDT');
% Точность расчётов
global tol_;
tol_=0.00001;

```

Листинг №2.2. Скрипт, загружающий кинематические данные механизма резания двухкривошипных ножниц (KinData2kr).

```

% Скрипт KinData2kr.m содержит исходные данные для кинематического
% и динамического расчёта ножниц
% Длины звеньев механизма и положение шарнира а
global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta x1 y1 x5 y5 psi y0_
global Xx1 Xy1 Xx5 Xy5 Xpsi
la = 0.0935;          lb = la;
l1 = 1.052;          l2 = sqrt(0.230^2+(1.950-1.160)^2);
l3 = 2.320;          l4 = l1;

```

```

l5 = 0.495;
xa = 0.456+1.950-1.160;
ya = 0.035+la*cos(35*pi/180)+sqrt(l1^2-(la*sin(35*pi/180))^2);
xb = 0.456+1.950+1.160; yb = ya;
beta= pi/2-atan(0.230/(1.950-1.160))+pi/2;
l6 = sqrt(l2^2+l3^2-2*l2*l3*cos(beta));
% Положения центров масс и моменты инерции
global l1_M alph1_M m1 J1 l23_M alph23_M m23 J23
global l4_M alph4_M m4 J4 l5_M alph5_M m5 J5
global la_M alpha_M ma Ja lb_M alphb_M mb Jb
l1_M = l1/2;          alph1_M = 0;
m1   = 2600;        J1     = 3453.96;
l23_M= l2/2;        alph23_M= 0;
m23  = 31000*1.5;   J23   = 119965*1.5;
l4_M = l4/2;        alph4_M = 0;
m4   = 2600;        J4     = 3453.96;
l5_M = l5/2;        alph5_M = 0;
m5   = 2600;        J5     = 3453.96;
la_M = la/2;        alpha_M = 0;
ma   = 5300;        Ja     = 112.5;
lb_M = lb/2;        alphb_M = 0;
mb   = 5300;        Jb     = 112.5;
global ua ub Jra Jrb
ua = 93.7; % Передаточные числа редукторов
ub = 93.7; %
Jra = 54.45; % Моменты инерции редукторов, приведённые к
Jrb = 54.45; % валам двигателей
Ja = Ja+Jra*ua^2;   Jb = Jb+Jrb*ua^2;
%
global hlowknife
hlowknife= -(0.765+0.120+0.075); % Положение нижнего ножа
% Параметры листа
global Blst xlst ylst h hmiddle epslnotr
Blst = 3.450; % Максимальная ширина листа
xlst = 2.406-1.750; % Кромка листа, ближняя к коромыслу
h = 0.05; % Толщина листа
ylst = -(0.765+0.120+0.075); % Нижняя грань листа
epslnotr=1/3; % Величина относительного отрыва
hmiddle = ylst+h*(1-epslnotr/2); % Линия, на которой происходит скол листа
%Данные для расчёта ножа с режущей кромкой в форме дуги окружности
global lkknife Rknife psi_pr h_pr psi_n psi_sm Delta % h_prpr
global phi0 Deltax_ huser
lkknife = 3.700; % Длина и радиус ножа, м
Rknife = 47.00;
Delta = 0.005; % Перекрытие между ножами (в одном из положений), м
phi0 = atan(230/790);
Deltax_ = 1.6+0.15-1.95+0.1;
huser = 0.765+Delta-Rknife*(1-cos(asin(3.700/(2*Rknife))));
psi_pr = atan((Rknife-(0.765+Delta))/1.95)-atan(0.23/(0.79));
h_pr = Rknife-sqrt(1.95^2+(Rknife-(0.765+Delta))^2);
psi_n = 2*asin(3.700/(2*Rknife)); % Угловая мера дуги ножа
psi_sm = atan(1.95/(Rknife-(0.765+Delta)))-psi_n/2; %Смещение ножа
% относительно проката

```

Листинг №2.3. Скрипт, рассчитывающий массивы положений \tilde{L} для заданных рядов значений углов поворота кривошипов (Create2krData).

```
function answ=Create2krData(DirName, FileName);
% Функция рассчитывает планы положений двухкривошипных ножниц в
% при нескольких углах рассогласования
% и сохраняет их на диске.
n = 360*2;          % Количество расчётных положений кривошипа a
m = 360*2;          % Количество расчётных положений кривошипа b
sta=2*pi/n;        % Шаг изменения угла alpha_a
stb=2*pi/m;        % Шаг изменения угла alpha_b
%global XmTrn YmTrn PsiTrn XflTrn YflTrn XAlTrn AlphlTrn FreslTrn
%global XfrTrn YfrTrn XArTrn AlphrTrn FresrTrn
global tLTrn AlphaTrn AlphbTrn
global XmTrn YmTrn
tLTrn=zeros(n+1, m+1); XmTrn=tLTrn; YmTrn=tLTrn;
AlphaTrn = [0:sta:2*pi]; AlphbTrn = [0:stb:2*pi];
PsiTrn=tLTrn; XflTrn=tLTrn; XAlTrn=tLTrn; AlphlTrn=tLTrn;
XfrTrn=tLTrn; XArTrn=tLTrn; AlphrTrn=tLTrn;
YmTrn=tLTrn; YflTrn=tLTrn; FreslTrn=tLTrn; YfrTrn=tLTrn;
FresrTrn=tLTrn;
[tL, D1, BP1]=Clc_tL(0, 0);
disp('*** Массивы выделены ***');
for i=1:n+1
    alpha=AlphaTrn(i); alphb=AlphbTrn(i);
    if alphb>=2*pi
        alphb=alphb-2*pi;
    end;
    % Расчёт величины tL
    [tL, D1, BP1, x2, y2, alph2]=Clc_tL(alpha, alphb, D1, BP1);
    D=D1; BP=BP1; tLTrn(i,1)=tL;
    % Расчёт положений некоторых точек ножа
    KnPos = CalcKnifePOS(alph2, x2, y2);
    XmTrn(i,1) = KnPos(1, 1); YmTrn(i,1) = KnPos(2, 1);
    PsiTrn(i,1) = KnPos(1, 3);
    XflTrn(i,1) = KnPos(1, 4); YflTrn(i,1) = KnPos(2, 4);
    XAlTrn(i,1) = KnPos(1, 5);
    AlphlTrn(i,1) = KnPos(1, 6); FreslTrn(i,1) = KnPos(2, 6);
    XfrTrn(i,1) = KnPos(1, 7); YfrTrn(i,1) = KnPos(2, 7);
    XArTrn(i,1) = KnPos(1, 8);
    AlphrTrn(i,1) = KnPos(1, 9); FresrTrn(i,1) = KnPos(2, 9);

for d=2:m+1
    alpha=AlphaTrn(i); alphb=AlphbTrn(d);
    if alphb>2*pi
        alphb=alphb-2*pi;
    end;
    % Расчёт величины tL
    [tL, D, BP, x2, y2, alph2]=Clc_tL(alpha, alphb, D, BP);
    tLTrn(i,d)=tL;
    % Расчёт положений некоторых точек ножа
    KnPos = CalcKnifePOS(alph2, x2, y2);
    XmTrn(i,d) = KnPos(1, 1); YmTrn(i,d) = KnPos(2, 1);
    PsiTrn(i,d) = KnPos(1, 3);
    XflTrn(i,d) = KnPos(1, 4); YflTrn(i,d) = KnPos(2, 4);
    XAlTrn(i,d) = KnPos(1, 5);
    AlphlTrn(i,d) = KnPos(1, 6); FreslTrn(i,d) = KnPos(2, 6);
    XfrTrn(i,d) = KnPos(1, 7); YfrTrn(i,d) = KnPos(2, 7);
    XArTrn(i,d) = KnPos(1, 8);
    AlphrTrn(i,d) = KnPos(1, 9); FresrTrn(i,d) = KnPos(2, 9);
end;
disp([alpha]*180/pi);
```

```

end;
disp('Создание каталога');
s=mkdir(DirName);

disp('Запись данных ножниц');
s=strcat(DirName, '\', FileName, 'Shears');
save(s, 'tLTrn', 'AlphaTrn', 'AlphbTrn', 'XmTrn', 'YmTrn',
     'PsiTrn', 'XflTrn', 'YflTrn', 'XAlTrn', 'AlphlTrn', 'FreslTrn',
     'XfrTrn', 'YfrTrn', 'XArTrn', 'AlphrTrn', 'FresrTrn');

```

Листинг №2.4. Скрипт, рассчитывающий длину вектора \vec{L} в зависимости от углов поворота кривошипов (Clc_tL).

```

function [tL, NxtD, NxtBP, X2, Y2, Alph2]=Clc_tL(alpha, alphb, D, BP);
% Функция выполняет расчёт плана положений двухкривошипных ножниц
% Входные данные: углы поворота кривошипов alpha и alphb.
% Параметры кинематики ножниц la, lb, l1, l2, l3, l4, l5, l6,
% xa, ya, xb, yb, beta являются глобальными переменными
% значения BP и D задают ориентировочные значение tL и пределы, в
% которых искомое значение может находиться.
% Возвращает длину радиус-вектора tL, а также при необходимости x2,
% y2 и alph2. Если требуется в переменных NxtBP и NxtD возвращаются
% значения входных переменных BP и D для следующего вызова
% функции Clc_tL. Ориентировочное значение используется для
% ускорения работы скрипта.
% Возможные варианты вызова функции:
% [tL, NxtD, NxtBP, X2, Y2, Alph2] = Clc_tL(...);
% [tL, X2, Y2, Alph2] = Clc_tL(...);
% [tL, NxtD, NxtBP] = Clc_tL(...);
% [tL] = Clc_tL(...);
% [...] = Clc_tL(alpha, alphb, D, BP);
% [...] = Clc_tL(alpha, alphb);
%-----
global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta
x1=xa+la*cos(alpha); y1=ya+la*sin(alpha); R1=sqrt(x1^2+y1^2);
x5=xb+lb*cos(alphb); y5=yb+ lb*sin(alphb);
if nargin == 2
    Limits = [max([abs(l2-l5), abs(R1-l1)]), min([l2+l5, l1+R1])];
    Min_tL = FindMin('R4_2(x, y)', Limits, [x1, y1, x5, y5]);
    Limits(1) = max([Limits(1), Min_tL]);
    tL = GetSolves('R4_2(x, y)-l4^2', Limits, [x1,y1,x5,y5]);
    D = (Limits(2)-Limits(1))/128;
else
    Limits=[BP-D, BP+D];
    tL = GetSolves('R4_2(x, y)-l4^2', Limits, [x1,y1,x5,y5], 24);
end
if nargin == 3
    NxtD = D; NxtBP = tL;
elseif nargin>3
    rho1 = acos(x1/R1);
    tAlph = rho1-acos((tL^2+R1^2-l1^2)/(2*R1*tL));
    gam=acos((tL^2+l2^2-l5^2)/(2*tL*l2));
    alph3=beta+tAlph+gam+pi-2*pi;
    alph2=pi-beta+alph3;
    alph5=tAlph-asin((l2/l5)*sin(gam));
    x2=l5*cos(alph5); y2=l5*sin(alph5);
    if nargin == 4
        NxtD = x2;
        NxtBP = y2;
        X2 = alph2;

```

```

elseif nargout == 6
    NxtD    = D;
    NxtBP   = tL;
    X2     = x2;
    Y2     = y2;
    Alph2  = alph2;
end;
end;
%-----
function Answer = R4_2(tL, y);
% Рассчитывает квадрат расстояния от точки 4 до точки 5
global l1 l2 l3 l4 l5 beta
    x1 = y(1);    y1 = y(2);    x5 = y(3);    y5 = y(4);
    gam = acos((tL^2+l2^2-l5^2)/(2*tL*l2));
    tAlph = talphf(tL, [x1, y1, x5, y5]);
    alph3 = beta+tAlph+gam-pi;
    Ans_x = x5-(tL*cos(tAlph)+l3*cos(alph3));
    Ans_y = y5-(tL*sin(tAlph)+l3*sin(alph3));
    Answer=Ans_x^2+Ans_y^2;
%-----
function Answer=talphf(tL, y);
% Определяет угол наклона фиктивного плеча talph в функции от
% его длины tL
global l1 l2 l3 l4 l5
    x1 = y(1);    y1 = y(2);    x5 = y(3);    y5 = y(4);
    R1    = sqrt(x1^2+y1^2);
    rho1  = acos(x1/R1);
    Answer = rho1-acos((tL^2+R1^2-l1^2)/(2*R1*tL));

```

Листинг №2.5. Функция возвращает интерполированное значение длины вектора \tilde{L} для заданных углов поворота кривошипов α_a и α_b (Get_tL).

```

function [tL, Ia0, Ib0]=Get_tL(alpha, alphb);
% Функция возвращает интерполированное значение tL, а
% также индексы Ia0 и Ib0, от которых оно отсчитывается
global tLTrn AlphaTrn AlphbTrn
Alpha = alpha-floor(alpha/pi/2)*2*pi;
Alphb = alphb-floor(alphb/pi/2)*2*pi;
Ia0 = min(find(AlphaTrn>Alpha));    Ia0=Ia0-1;
Ib0 = min(find(AlphbTrn>Alphb));    Ib0=Ib0-1;
y00 = tLTrn(Ia0, Ib0);    y01 = tLTrn(Ia0, Ib0+1);
y10 = tLTrn(Ia0+1, Ib0);    y11 = tLTrn(Ia0+1, Ib0+1);
xa0 = AlphaTrn(Ia0);    xa1 = AlphaTrn(Ia0+1);
xb0 = AlphbTrn(Ib0);    xb1 = AlphbTrn(Ib0+1);
tL1 = (y01-y00)/(xb1-xb0)*(Alphb-xb0)+y00;
tL2 = (y11-y10)/(xb1-xb0)*(Alphb-xb0)+y10;
tL = (tL2-tL1)/(xa1-xa0)*(Alpha-xa0)+tL1;

```

Листинг №2.6. Функция рассчитывает положения звеньев двухкривошипных ножниц (Clc_pos2kr).

```

function [pos2kr]=Clc_pos2kr(tL, alpha, alphb);
% Функция выполняет расчёт плана положений двухкривошипных ножниц
% Входные данные: tL alpha, alphb;
% Параметры кинематики ножниц: la, lb, l1, l2, l3, l4, l5, l6,
% xa, ya, xb, yb, beta являются глобальными переменными
% значения BP и D задают ориентировочные значение tL и пределы, в
% которых искомое значение может находиться.
% Возвращает pos2kr положения шарниров и углы наклона звеньев

```

```

global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta
x1=xa+la*cos(alpha); y1=ya+la*sin(alpha); R1=sqrt(x1^2+y1^2);
x5=xb+lb*cos(alphb); y5=yb+ lb*sin(alphb);
rho1 = acos(x1/R1);
tAlph = rho1-acos((tL^2+R1^2-l1^2)/(2*R1*tL));
%-----
alph1=acos((x1-tL*cos(tAlph))/l1);
gam=acos((tL^2+l2^2-l5^2)/(2*tL*l2));
alph3=beta+tAlph+gam+pi-2*pi;
alph2=pi-beta+alph3;
alph4=acos((x5-(tL*cos(tAlph)+l3*cos(alph3)))/l4);
alph5=tAlph-asin((l2/l5)*sin(gam));
alph6=acos((l2*cos(alph2)+l3*cos(alph3))/l6);
%-----
% Определение точек механизма
x3=x1-l1*cos(alph1); y3=y1-l1*sin(alph1);
x2=l5*cos(alph5); y2=l5*sin(alph5);
x4=x3+l3*cos(alph3); y4=y3+l3*sin(alph3);
%-----
pos2kr=[x1, x2, x3, x4, x5, 0, xa, xb;
        y1, y2, y3, y4, y5, 0, ya, yb;
        alph1, alph2, alph3, alph4, alph5, alph6, alpha, alphb];

```

Листинг №2.7. Функция рассчитывает скорости вращения кривошипов двухкривошипных ножниц (Ω_{2kr}).

```

function Answ=Omegas2kr(dEa, dEb, alpha, alphb);
% Функция осуществляет расчёт скоростей по частным производным
% кинетической энергии, и рассчитывает крутящие моменты от
% неуравновешенных масс
global tLTrn AlphaTrn AlphbTrn
global m1 m23 m4 m5 ma mb
global J1 J23 J4 J5 Ja Jb
M=[m1, m23, 0, m4, 0, 0, 0, 0];
J=[J1, J23, 0, J4, J5, 0, Ja, Jb];
while(alpha>=2*pi)
    alpha=alpha-2*pi;
end;
while(alphb>=2*pi)
    alphb=alphb-2*pi;
end;
while(alpha<0)
    alpha=alpha+2*pi;
end;
while(alphb<0)
    alphb=alphb+2*pi;
end;
[tL, Ia0, Ib0] = Get_tL(alpha, alphb); % Определим значение tL
% Найдём положения звеньев механизма
pos2kr = Clc_pos2kr(tL, alpha, alphb);
% Найдём положения центров масс
mpos2kr=CalcMPos2kr(pos2kr);
% Определим вклад скорости вращения кривошипа а в суммарную
% кинетическую энергию
spd2kr = CalcSpd2kr(1, 0, pos2kr);
mspd2kr = CalcMSpd2kr(spd2kr, mpos2kr);
OM_a = mspd2kr(1, :);
V_a = mspd2kr(4, :);
VY_a = mspd2kr(3, :);
% Определим вклад скорости вращения кривошипа b в суммарную

```

```

% кинетическую энергию
spd2kr = CalcSpd2kr(0, 1, pos2kr);
mspd2kr = CalcMSpd2kr(spd2kr, mpos2kr);
OM_b = mspd2kr(1, :);
V_b = mspd2kr(4, :);
VY_b = mspd2kr(3, :);
Jpra = sum(M.*V_a.*V_a+J.*OM_a.*OM_a);
Jprab = sum(M.*V_a.*V_b+J.*OM_a.*OM_b);
Jprba = sum(M.*V_b.*V_a+J.*OM_b.*OM_a);
Jprb = sum(M.*V_b.*V_b+J.*OM_b.*OM_b);
K=[Jpra Jprab; Jprba Jprb]\[dEa; dEb];
oma=K(1); omb=K(2);
%
M=[m1, m23, 0, m4, m5, 0, ma, mb]*9.8;
Ma=sum(VY_a.*M);
Mb=sum(VY_b.*M);
%
% Вывод результатов
Answ= [oma, omb, Ma, Mb, Ia0, Ib0];

```

Листинг №2.8. Функция рассчитывает скорости звеньев двухкривошипных ножниц (CalcSpd2kr).

```

function spd2kr=CalcSpd2kr(oma, omb, pos2kr);
% Функция выполняет расчёт плана скоростей двухкривошипных ножниц
% Входные данные: угловые скорости кривошипов oma и omb,
% переменная pos2kr, рассчитанная функцией CalcPos2kr, параметры
% кинематики ножниц la, lb, l1, l2, l3, l4, l5, l6, xa, ya, xb,
% yb, beta являются глобальными переменными.
% Возвращает переменную spd2kr, содержащую разложенные по осям
% скорости шарниров ножниц и угловые скорости звеньев.
global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta
alph1=pos2kr(3,1); alph2=pos2kr(3,2);
alph3=pos2kr(3,3); alph4=pos2kr(3,4);
alph5=pos2kr(3,5); alph6=pos2kr(3,6);
alpha=pos2kr(3,7); alphb=pos2kr(3,8);
x2=pos2kr(1,2); y2=pos2kr(2,2);
x3=pos2kr(1,3); y3=pos2kr(2,3);
x4=pos2kr(1,4); y4=pos2kr(2,4);
v12=[x2-x3, y2-y3]; v16=[x4-x2, y4-y2];
%
% Найдём угловые скорости звеньев
A=[l1*sin(alph1+pi), l2*sin(alph3-beta), 0, -l5*sin(alph5);
l1*cos(alph1+pi), l2*cos(alph3-beta), 0, -l5*cos(alph5);
l1*sin(alph1+pi), l3*sin(alph3), -l4*sin(alph4+pi), 0;
l1*cos(alph1+pi), l3*cos(alph3), -l4*cos(alph4+pi), 0];
b=[-la*oma*sin(alpha); -la*oma*cos(alpha);
lb*omb*sin(alphb)-la*oma*sin(alpha);
lb*omb*cos(alphb)-la*oma*cos(alpha)];
X = A\b;
om1 = X(1); om23 = X(2);
om4 = X(3); om5 = X(4);
%
% Определим линейные скорости (относительные и абсолютные)
va = [-la*oma *sin(alpha), la*oma *cos(alpha) ];
vb = [-lb*omb *sin(alphb), lb*omb *cos(alphb) ];
v1_a=[-l1*om1 *sin(alph1+pi), l1*om1 *cos(alph1+pi) ];
v2_1=[-l2*om23*sin(alph3-beta), l2*om23*cos(alph3-beta)];
v3_1=[-l3*om23*sin(alph3), l3*om23*cos(alph3) ];
v4_b=[-l4*om4 *sin(alph4+pi), l4*om4 *cos(alph4+pi) ];

```



```

v5 =[-15*om5 *sin(alph5),      15*om5 *cos(alph5)   ];
v1  = va+v1_a;                v2  = v1+v2_1;
v3  = v1+v3_1;                v4  = vb+v4_b;
v2_5 = -MultyV(om23, v12); v6_5 = MultyV(om23, v16);
v6  = v5+v6_5;
%
spd2kr=[om1,   om23,  om23,  om4,   om5,   om23,  oma,   omb;
        v1(1), v2(1), v3(1), v4(1), v5(1), v6(1), va(1), vb(1);
        v1(2), v2(2), v3(2), v4(2), v5(2), v6(2), va(2), vb(2)];

```

Листинг №2.9. Функция рассчитывает положения центров масс звеньев двухкривошипных ножниц (CalcMPos2kr).

```

function mpos2kr=CalcMPos2kr(pos2kr);
% Функция выполняет расчёт положений центров масс всех
% звеньев механизма.
% Входные данные: переменная pos2kr, рассчитанная
% функцией CalcPos2kr.
% Параметры кинематики ножниц l1_M, alph1_M, l23_M, alph23_M,
% l4_M, alph4_M, l5_M, alph5_M, la_M, alpha_M, lb_M, alphb_M
% являются глобальными переменными.
% Возвращает mpos2kr, содержащую положения центров масс
% и векторы их плеч.
global l1_M alph1_M l23_M alph23_M
global l4_M alph4_M l5_M  alph5_M
global la_M alpha_M lb_M  alphb_M
alph1=pos2kr(3,1); alph2=pos2kr(3,2);
alph3=pos2kr(3,3); alph4=pos2kr(3,4);
alph5=pos2kr(3,5); alph6=pos2kr(3,6);
alpha=pos2kr(3,7); alphb=pos2kr(3,8);
x1=pos2kr(1,1);   y1=pos2kr(2,1);
x2=pos2kr(1,2);   y2=pos2kr(2,2);
x5=pos2kr(1,5);   y5=pos2kr(2,5);
xa=pos2kr(1,7);   ya=pos2kr(2,7);
xb=pos2kr(1,8);   yb=pos2kr(2,8);
%
%Определим плечи центров масс
v11_m  =[l1_M*cos(alph1-pi+alph1_M), l1_M*sin(alph1-pi+alph1_M)];
v123_m =[l23_M*cos(alph2+alph23_M),  l23_M*sin(alph2+alph23_M)];
v14_m  =[l4_M*cos(alph4-pi+alph4_M),  l4_M*sin(alph4-pi+alph4_M)];
v15_m  =[l5_M*cos(alph5+alph5_M),     l5_M*sin(alph5+alph5_M)];
vla_m  =[la_M*cos(alpha+alpha_M),     l1_M*sin(alpha+alpha_M)];
vlb_m  =[lb_M*cos(alphb+alphb_M),     l1_M*sin(alphb+alphb_M)];
%
%Определим положения центров масс.
r1      =[x1, y1]+v11_m;      r23     =[x2, y2]+v123_m;
r4      =[x5, y5]+v14_m;      r5      =v15_m;
ra      =[xa, ya]+vla_m;      rb      =[xb, yb]+vlb_m;
%
mpos2kr=[r1(1), r23(1), 0,   r4(1),   r5(1),  0, ra(1),  rb(1);
         r1(2), r23(2), 0,   r4(2),   r5(2),  0, ra(2),  rb(2);
         v11_m(1),v123_m(1),0,v14_m(1),v15_m(1),0,vla_m(1),vlb_m(1);
         v11_m(2),v123_m(2),0,v14_m(2),v15_m(2),0,vla_m(2),vlb_m(2)];

```

Листинг №2.10. Функция рассчитывает скорости центров масс звеньев (CalcMSpd2kr).

```
function mspd2kr=CalcMSpd2kr(spd2kr,mpos2kr)
% Функция выполняет расчёт скоростей центров масс всех
% звеньев двухкривошипных ножниц.
% Входные данные: переменная mpos2kr, рассчитанная функцией
% CalcMPos2kr, spd2kr рассчитанная функцией CalcSpd2kr.
% Возвращает переменную mspd2kr, содержащую угловые скорости
% звеньев, а также скорости ц.м.
vl1_m = [mpos2kr(3,1), mpos2kr(4,1)];
vl23_m = [mpos2kr(3,2), mpos2kr(4,2)];
vl4_m = [mpos2kr(3,4), mpos2kr(4,4)];
vl5_m = [mpos2kr(3,5), mpos2kr(4,5)];
vla_m = [mpos2kr(3,7), mpos2kr(4,7)];
vlb_m = [mpos2kr(3,8), mpos2kr(4,8)];
om1 = spd2kr(1,1);    om23 = spd2kr(1,2);
om4 = spd2kr(1,4);    om5 = spd2kr(1,5);
oma = spd2kr(1,7);    omb = spd2kr(1,8);
v5 = [spd2kr(2,5), spd2kr(3,5)];
va = [spd2kr(2,7), spd2kr(3,7)];
vb = [spd2kr(2,8), spd2kr(3,8)];
%
%Относительные скорости центров масс звеньев 1, 23 и 4
v1_ma =MultyV(om1, vl1_m);
v23_m5 =MultyV(om23,vl23_m);
v4_mb =MultyV(om4, vl4_m);
%
%Абсолютные скорости центров масс
V1_m = va+v1_ma;      v1_m = AbsV(V1_m);
V23_m = v5+v23_m5;   v23_m = AbsV(V23_m);
V4_m = vb+v4_mb;     v4_m = AbsV(V4_m);
V5_m = MultyV(om5, vl5_m); v5_m = AbsV(V5_m);
Va_m = MultyV(oma, vla_m); va_m = AbsV(Va_m);
Vb_m = MultyV(omb, vlb_m); vb_m = AbsV(Vb_m);
%
mspd2kr=[om1,    om23,    0,om4,    om5,    0,oma,    omb;
         V1_m(1),V23_m(1),0,V4_m(1),V5_m(1),0,Va_m(1),Vb_m(1);
         V1_m(2),V23_m(2),0,V4_m(2),V5_m(2),0,Va_m(2),Vb_m(2);
         v1_m,    v23_m,    0,v4_m,    v5_m,    0,va_m,    vb_m];
```

Листинг №2.11. Функция рассчитывает положения некоторых точек ножа (ClcKn2kr).

```
function Answ = ClcKn2kr(Inp);
% Функция возвращает интерполированные значения положений
% некоторых точек ножа, а также скорости движения точки врезания.
Ia = Inp(1); Ib = Inp(2);
Alpha= Inp(3); Alphb=Inp(4);
global XmTrn XflTrn XAlTrn AlphlTrn XfrTrn XArTrn AlphrTrn YmTrn
global YflTrn FreslTrn YfrTrn FresrTrn AlphaTrn AlphbTrn tLTrn
%Выход:
% xm, ym -- положение нижней точки ножа;
%
% <<Для случая резки к оси коросмысла>>
% xfl, yfl -- положение точки ножа, к которой приложена сила;
% xA1, yA1 -- положение точки врезания ножа в лист;
% alph_1 -- угол реза alph;
% Fres_1 -- флаг, указывающий, что рез может происходить;
% val -- скорость движения точки врезания;
%
% <<Для случая резки от оси коросмысла>>
% xf2, yf2 -- положение точки ножа, к которой приложена сила;
% xA2, yA2 -- положение точки врезания ножа в лист;
% alph_2 -- угол реза alph;
```

```

% Fres_2 -- флаг, указывающий, что рез может происходить;
% va2    -- скорость движения точки врезания.
%
% Найдём текущие положения некоторых точек ножа
alpha=AlphaTrn(Ia); alphb=AlphbTrn(Ib); tL=tLTrn(Ia, Ib);
xm      = XmTrn(Ia, Ib)   ; ym      = YmTrn(Ia, Ib);
xf1     = XflTrn(Ia, Ib)  ; yf1     = YflTrn(Ia, Ib);
xA1     = XAlTrn(Ia, Ib)  ;
alph_1  = AlphlTrn(Ia, Ib); Fres_1 = FreslTrn(Ia, Ib);
xf2     = XfrTrn(Ia, Ib)  ; yf2     = YfrTrn(Ia, Ib);
xA2     = XArTrn(Ia, Ib)  ;
alph_2  = AlphrTrn(Ia, Ib); Fres_2 = FresrTrn(Ia, Ib);

alpha=AlphaTrn(Ia+1); alphb=AlphbTrn(Ib); tL=tLTrn(Ia+1, Ib);
l10xm   = XmTrn(Ia+1, Ib) ; l10ym   = YmTrn(Ia+1, Ib);
l10xf1  = XflTrn(Ia+1, Ib) ; l10yf1  = YflTrn(Ia+1, Ib);
l10xA1  = XAlTrn(Ia+1, Ib) ;
l10alph_1 = AlphlTrn(Ia+1, Ib); l10Fres_1 = FreslTrn(Ia+1, Ib);
l10xf2  = XfrTrn(Ia+1, Ib) ; l10yf2  = YfrTrn(Ia+1, Ib);
l10xA2  = XArTrn(Ia+1, Ib) ;
l10alph_2 = AlphrTrn(Ia+1, Ib); l10Fres_2 = FresrTrn(Ia+1, Ib);

alpha=AlphaTrn(Ia); alphb=AlphbTrn(Ib+1); tL=tLTrn(Ia, Ib+1);
l01xm   = XmTrn(Ia, Ib+1) ; l01ym   = YmTrn(Ia, Ib+1);
l01xf1  = XflTrn(Ia, Ib+1) ; l01yf1  = YflTrn(Ia, Ib+1);
l01xA1  = XAlTrn(Ia, Ib+1) ;
l01alph_1 = AlphlTrn(Ia, Ib+1); l01Fres_1 = FreslTrn(Ia, Ib+1);
l01xf2  = XfrTrn(Ia, Ib+1) ; l01yf2  = YfrTrn(Ia, Ib+1);
l01xA2  = XArTrn(Ia, Ib+1) ;
l01alph_2 = AlphrTrn(Ia, Ib+1); l01Fres_2 = FresrTrn(Ia, Ib+1);

alpha=AlphaTrn(Ia+1); alphb=AlphbTrn(Ib+1); tL=tLTrn(Ia+1, Ib+1);
l11xm   = XmTrn(Ia+1, Ib+1) ; l11ym   = YmTrn(Ia+1, Ib+1);
l11xf1  = XflTrn(Ia+1, Ib+1) ; l11yf1  = YflTrn(Ia+1, Ib+1);
l11xA1  = XAlTrn(Ia+1, Ib+1) ;
l11alph_1 = AlphlTrn(Ia+1, Ib+1); l11Fres_1 = FreslTrn(Ia+1, Ib+1);
l11xf2  = XfrTrn(Ia+1, Ib+1) ; l11yf2  = YfrTrn(Ia+1, Ib+1);
l11xA2  = XArTrn(Ia+1, Ib+1) ;
l11alph_2 = AlphrTrn(Ia+1, Ib+1); l11Fres_2 = FresrTrn(Ia+1, Ib+1);
%
% Определим скорости точек A1 и A2
if l10xA1>0 & xA1>0 & l01xA1>0
    vA1_a=(l10xA1-xA1)/(AlphaTrn(Ia+1)-AlphaTrn(Ia));
    vA1_b=(l01xA1-xA1)/(AlphbTrn(Ib+1)-AlphbTrn(Ib));
else
    vA1_b=0; vA1_a=0;
end;
if l10xA2>0 & xA2>0 & l01xA2>0
    vA2_a=(l10xA2-xA2)/(AlphaTrn(Ia+1)-AlphaTrn(Ia));
    vA2_b=(l01xA2-xA2)/(AlphbTrn(Ib+1)-AlphbTrn(Ib));
else
    vA2_a=0; vA2_b=0;
end;
%-----
% Интерполируем значения углов и точек
xm      = LInterp2d(Ia, Ib, xm      , l01xm      , l10xm      , l11xm      , Alpha, Alphb);
ym      = LInterp2d(Ia, Ib, ym      , l01ym      , l10ym      , l11ym      , Alpha, Alphb);
if l11Fres_1>0 & l01Fres_1>0 & l10Fres_1>0 & Fres_1>0
    xf1   = LInterp2d(Ia, Ib, xf1   , l01xf1   , l10xf1   , l11xf1   , Alpha, Alphb);
    yf1   = LInterp2d(Ia, Ib, yf1   , l01yf1   , l10yf1   , l11yf1   , Alpha, Alphb);
    xA1   = LInterp2d(Ia, Ib, xA1   , l01xA1   , l10xA1   , l11xA1   , Alpha, Alphb);
    alph_1 = LInterp2d(Ia, Ib, alph_1, l01alph_1, l10alph_1, l11alph_1, Alpha, Alphb);

```

```

else
    xf1 = 0;  yf1 = 0;  xA1 = 0;  alph_1 = 0;
end;
if l11Fres_2>0 & l01Fres_2>0 & l10Fres_2>0 & Fres_2>0
    xf2 = LInterp2d(Ia,Ib,xf2 ,l01xf2 ,l10xf2 ,l11xf2 , Alpha, Alphb);
    yf2 = LInterp2d(Ia,Ib,yf2 ,l01yf2 ,l10yf2 ,l11yf2 , Alpha, Alphb);
    xA2 = LInterp2d(Ia,Ib,xA2 ,l01xA2 ,l10xA2 ,l11xA2 , Alpha, Alphb);
    alph_2 = LInterp2d(Ia,Ib,alph_2,l01alph_2,l10alph_2,l11alph_2, Alpha, Alphb);
else
    xf2 = 0;  yf2 = 0;  xA2 = 0;  alph_2 = 0;
end;

Answ1=[xm, ym, xf1, yf1, xA1, alph_1, Fres_1, xf2, yf2, xA2, alph_2, Fres_2];
Answ=[Answ1, [vA1_a, vA1_b, vA2_a, vA2_b]];
%
function Answ=LInterp2d(Ia0, Ib0, y00, y01, y10, y11, Alpha, Alphb);
global AlphaTrn AlphbTrn
xa0 = AlphaTrn(Ia0);      xa1 = AlphaTrn(Ia0+1);
xb0 = AlphbTrn(Ib0);     xb1 = AlphbTrn(Ib0+1);
y1  = (y01-y00)/(xb1-xb0)*(Alphb-xb0)+y00;
y2  = (y11-y10)/(xb1-xb0)*(Alphb-xb0)+y10;
Answ = (y2-y1)/(xa1-xa0)*(Alpha-xa0)+y1;

```

Листинг №2.12. Функция отображает положение механизма резания (Plot2kr).

```

function doomu=Plot2kr(pos2kr, Kn);
% Функция рисует ножницы на основе данных переменной pos2kr вида
%
%pos2kr =[x1,    x2,    x3,    x4,    x5,    0,    xa    xb;
%         y1,    y2,    y3,    y4,    y5,    0,    ya    yb;
%         alph1, alph2, alph3, alph4, alph5, alph6, alpha alphb];
%
% и возвращает переменную doomu, содержащую в первой строке отклонения
% расчётных длин звеньев l1, l2, l3, l4, l5 и l6 от заданных в процентах;
% во второй строке в первых двух столбцах отклонения длин звеньев la и lb
% от заданных, а в двух последних столбцах -- углы наклона этих звеньев в
% градусах;
% в третьей строке углы наклона звеньев alph1, alph2, alph3, alph4, alph5
% и alph6 в градусах.
% Переменная Kn имеет формат
% Kn=[Xm, Ym];
% или
% Kn=[Xm, Ym, Va, Xfr, Yfr, Xfl, Yfl];
global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 phi0
global lknife Rknife psi_pr h_pr h_prpr psi_n psi_sm hlowknife Delta
global Blst xlst ylst h hmiddle phi0
plot([0 5],[2 -1.5], '.'); % Задать границы фигуры
hold on;
%
% Построить механизм
x=[0, pos2kr(1,2), pos2kr(1,3), pos2kr(1,1), pos2kr(1,7)];
y=[0, pos2kr(2,2), pos2kr(2,3), pos2kr(2,1), pos2kr(2,7)];
plot(x,y,'k');

x=[pos2kr(1,3), pos2kr(1,4), pos2kr(1,5), pos2kr(1,8)];
y=[pos2kr(2,3), pos2kr(2,4), pos2kr(2,5), pos2kr(2,8)];
plot(x,y,'k');

x=[pos2kr(1,2), pos2kr(1,4)];
y=[pos2kr(2,2), pos2kr(2,4)];
plot(x,y,'k');

```

```

x=[pos2kr(1,1), pos2kr(1,2), pos2kr(1,3), pos2kr(1,4), pos2kr(1,5)];
y=[pos2kr(2,1), pos2kr(2,2), pos2kr(2,3), pos2kr(2,4), pos2kr(2,5)];
plot(x,y,'ok');

x=[0, pos2kr(1,7), pos2kr(1,8)];
y=[0, pos2kr(2,7), pos2kr(2,8)];
plot(x,y,'*k');

vla=sqrt((pos2kr(1,1)-pos2kr(1,7))^2+(pos2kr(2,1)-pos2kr(2,7))^2);
vlb=sqrt((pos2kr(1,5)-pos2kr(1,8))^2+(pos2kr(2,5)-pos2kr(2,8))^2);
vl1=sqrt((pos2kr(1,3)-pos2kr(1,1))^2+(pos2kr(2,3)-pos2kr(2,1))^2);
vl2=sqrt((pos2kr(1,2)-pos2kr(1,3))^2+(pos2kr(2,2)-pos2kr(2,3))^2);
vl3=sqrt((pos2kr(1,4)-pos2kr(1,3))^2+(pos2kr(2,4)-pos2kr(2,3))^2);
vl4=sqrt((pos2kr(1,4)-pos2kr(1,5))^2+(pos2kr(2,4)-pos2kr(2,5))^2);
vl5=sqrt(pos2kr(1,2)^2+pos2kr(2,2)^2);
vl6=sqrt((pos2kr(1,4)-pos2kr(1,2))^2+(pos2kr(2,4)-pos2kr(2,2))^2);
title(strcat('Положение кривошипа (\alpha_a=', num2str(pos2kr(3,7)*180/pi),'
            \alpha_b=', num2str(pos2kr(3,8)*180/pi),'
            \alpha_a-\alpha_b=', num2str((pos2kr(3,7)-pos2kr(3,8))*180/pi)));
%
if nargin==2 & max(size(Kn))==9
    text(0.2,1.65, strcat('F_{pez}= ', num2str(Kn(8)), ' Н'));
    text(0.2,1.45, strcat('\alpha_{pez}= ', num2str(180/pi*Kn(9)), ' град'));
    text(0.2,1.85, strcat('Перекрытие: ', num2str(1000*(ylst-Kn(2))), ' мм'));
    if Kn(8)~=0
        PlotKnLst(pos2kr(1,2), pos2kr(2,2), pos2kr(3,2), Kn(1), Kn(2), Kn(3),
                  Kn(4), Kn(5), Kn(6), Kn(7));
    else
        PlotKnLst(pos2kr(1,2), pos2kr(2,2), pos2kr(3,2), Kn(1), Kn(2));
    end
elseif nargin==2
    text(0.2,1.85, strcat('Перекрытие: ', num2str(1000*(ylst-Kn(2))), ' мм'));
    PlotKnLst(pos2kr(1,2), pos2kr(2,2), pos2kr(3,2), Kn(1), Kn(2));
else
    PlotKnLst(pos2kr(1,2), pos2kr(2,2), pos2kr(3,2), 0, 0);
end;
doomy=[[ (vl1-11)/11, (vl2-12)/12, (vl3-13)/13, (vl4-14)/14, (vl5-15)/15,
        (vl6-16)/16]*100;
        [(vla-la)/1a, (vlb-lb)/1b]*100, 0, 0, pos2kr(3,7)*180/pi,
        pos2kr(3,8)*180/pi;
        [pos2kr(3,1),pos2kr(3,2),pos2kr(3,3),pos2kr(3,4),pos2kr(3,5),
        pos2kr(3,6)]*180/pi];

```

Ниже приводятся листинги скриптов, предназначенные для моделирования однокривошипных ножниц.

Листинг №2.13. Процедура, выполняющая настройку переменных для моделирования системы управления однокривошипными ножницами (IniCalcs1kr).

```

% Точность расчётов
global tol_;
tol_=0.0001;
inicomm;
KinData1kr;
global AlphaTrn X2Trn Y2Trn X3Trn Y3Trn Alph2Trn XdTrn YdTrn
global om23_Trn v2_Trn
global JTrn dJdAlphTrn MpTrn Mcl_Trn Mcr_Trn
global XmTrn YmTrn PsiTrn XflTrn YflTrn XAlTrn Alph1Trn
global XfrTrn YfrTrn XArTrn AlphrTrn

```

```
global VATrn VmTrn VfTrn FreslTrn FresrTrn v5x_Trn v5y_Trn
```

Листинг №2.14. Процедура, загружающая кинематические данные однокривошипных ножиц (KinData1kr).

```
% Длины звеньев механизма и положение шарнира а
global la l2 l5 xa ya
la=0.1383;                l2=2.922;
l5=1.003;
xa= 3.33;                ya= 1.655;
% Положения центров масс
global la_M alpha_M ma Ja l23_M alph23_M m23 J23
global l5_M alph5_M m5 J5
ma      = 7800*pi/4*1.1*0.89^2;
Ja      = 112.5;
la_M    = la; % Берётся вес эксцентрика
alpha_M = 0;
m23     = 31000;          J23     = 119965;
l23_M   = 0.04*sqrt(754); alph23_M = 20.4589*pi/180;
m5      = 2600;          J5      = 3453.96;
l5_M    = l5/2;          alph5_M = 0;
% Система координат, связанная с ножом и его длина
global phi0 Deltax_ hmiddle lknife Rknife huser
phi0=36.43*pi/180;
Deltax_=-0.951+0.002;
% Расчёты для круглого ножа
lknife=2.800; % Длина и радиус ножа, м
Rknife=48.59;
huser=11/50-0.0087; % Добавка пользователя
% Параметры листа
Blst = 2.700; % Ширина листа
xlst = 1.950; % Кромка листа, ближняя к оси коромысла
ylst = -0.445; % Нижняя грань листа
h     = 0.05; % Толщина листа
hmiddle=ylst+h*5/6; % Линия, на которой происходит рез
```

Листинг №2.15. Процедура, осуществляющая расчёт массивов данных для моделирования системы управления (Calc1kr.m).

```
function Calc1kr;
% Входные данные
global la l2 l5 xa ya tol_
global phi0 Deltax_ psi xO_ yO_ hmiddle lknife Rknife
global h xlst ylst Blst l23_M alph23_M m23 J23
global l5_M alph5_M J5 m5 la_M alpha_M Ja ma
%
% Выходные данные
global AlphaTrn X2Trn Y2Trn X3Trn Y3Trn Alph2Trn XdTrn YdTrn
global JTrn dJdAlphTrn MpTrn Mcl_Trn Mcr_Trn
global om23_Trn v5x_Trn v5y_Trn
% JTrn, dJdAlphTrn -- приведённый к кривошипному валу момент
% инерции и его производная;
% MpTrn -- момент от неуравновешенных масс на
% кривошипном валу;
% om23_Trn -- угловая скорость суппорта ножа (при
% oма=1 рад/с);
% v5x_Trn, v5y_Trn -- скорость движения подвижного конца коромысла
% (при oма=1 рад/с).
global XmTrn YmTrn PsiTrn XflTrn YflTrn XAlTrn
```

```

global Alph1Trn XfrTrn YfrTrn YARTrn AlphrTrn
global XArTrn XAlTrn XmTrn YmTrn XflTrn XflTrn
% XAlTrn XArTrn    -- положение точки врезания (слева и справа
%                  от ножа);
% XfrTrn XflTrn   -- положение точки реза (слева и справа от ножа);
% Mcl_Trn,Mcr_Trn -- момент сопротивления, вызванный едничным
%                  усилием реза (слева и справа от ножа);
% XmTrn YmTrn     -- положение нижней точки ножа.
global VATrn VmTrn VfTrn
% VAlTrn          -- положение точки врезания (слева и справа от
%                  ножа);
% VfrTrn          -- положение точки реза (слева и справа от ножа);
% VmTrn           -- положение нижней точки ножа.
global FresrTrn FreslTrn
%=====
% Начальная установка переменных
%=====
X3Trn = [];      Y3Trn = [];      om23_Trn = [];
X2Trn = [];      Y2Trn = [];      v5x_Trn  = [];
Alph2Trn = [];  AlphaTrn = [];    v5y_Trn  = [];
XdTrn = [];      YdTrn = [];
XmTrn = [];      YmTrn = [];      VmTrn = [];
JTrn = [];      dJdAlphTrn= [];
MpTrn = [];      Mcl_Trn  = [];    Mcr_Trn=[];
Ya=[];          Y23=[];          Y5=[];
PsiTrn= [];
XflTrn= [];      YflTrn  = [];    VfTrn = [];
XAlTrn= [];      Alph1Trn = [];
XfrTrn= [];      YfrTrn  = [];
YARTrn= [];      AlphrTrn = [];
FreslTrn= [];    FresrTrn = [];
Da      = 0.1*pi/180;      tol_ = Da;      alpha =-Da;
%=====
% Цикл основных расчётов
%=====
for i=1:2*pi/Da+1
    alpha=alpha+Da;
    AlphaTrn(end+1)=alpha;
%-----
% Расчёт положений звеньев ножниц
X3Trn(end+1) = xa+la*cos(alpha);
Y3Trn(end+1) = ya+la*sin(alpha);
vtL          = [X3Trn(end); Y3Trn(end)];
tL           = AbsV(vtL);  talph =atan(Y3Trn(end)/X3Trn(end));
alph5        = talph-acos((tL^2+15^2-12^2)/(2*tL*15));
X2Trn(end+1) = 15*cos(alph5);
Y2Trn(end+1) = 15*sin(alph5);
v12          = [X2Trn(end)-X3Trn(end); Y2Trn(end)-Y3Trn(end)];
v15          = [X2Trn(end); Y2Trn(end)];
Alph2Trn(end+1)= acos((-v12(1))/12);
%-----
% Расчёт скоростей звеньев ножниц (в относительных единицах)
vva_=[-la*sin(alpha); la*cos(alpha)];
om23_=(la*(sin(alpha)/tan(alph5)-cos(alpha)))/(12*
(sin(Alph2Trn(end))/tan(alph5)-cos(Alph2Trn(end))));
om5_=(la*sin(alpha)-12*om23_*sin(Alph2Trn(end)))/(15*sin(alph5));
vv2_a_=[-om23_*12*sin(pi+Alph2Trn(end)); om23_*12*cos(pi+
Alph2Trn(end))];
om23_Trn(end+1) = om23_;
v5_=MultyV(om5_, v15);
v5x_Trn(end+1) = v5_(1);  v5y_Trn(end+1) = v5_(2);
%-----

```

```

% Расчёт приведённого момента инерции
vv23_Ma_ = [om23_*l23_M*sin(Alph2Trn(end)+alph23_M);
            -om23_*l23_M*cos(Alph2Trn(end)+alph23_M)];
vv23_M_   = vv23_Ma_+vva_;
v23_M_    = AbsV(vv23_M_);
JTrn(end+1)= J5*(om5_)^2+ Ja+J23*(om23_)^2+m23*(v23_M_)^2;
Ya(end+1)  = la_M*sin(alpha_M+alpha);
Y23(end+1) = l23_M*sin(Alph2Trn(end)+alph23_M);
Y5(end+1)  = l5_M*sin(alph5_M+alph5);
%
% Расчёт положений некоторых точек ножа и их скоростей
KnPos = CalcKnifePOS(Alph2Trn(end), X2Trn(end), Y2Trn(end));
XmTrn(end+1) = KnPos(1, 1);   YmTrn(end+1) = KnPos(2, 1);
PsiTrn(end+1) = KnPos(1, 3);
Xf1Trn(end+1) = KnPos(1, 4);   Yf1Trn(end+1) = KnPos(2, 4);
XAlTrn(end+1) = KnPos(1, 5);
Alph1Trn(end+1) = KnPos(1, 6);   Fres1Trn(end+1) = KnPos(2, 6);
XfrTrn(end+1) = KnPos(1, 7);   YfrTrn(end+1) = KnPos(2, 7);
XArTrn(end+1) = KnPos(1, 8);
AlphrTrn(end+1) = KnPos(1, 9);   FresrTrn(end+1) = KnPos(2, 9);
%      1      2      3      4      5      6      7      8      9
%Pos = [xm,   xO_, psi,  xf1,  xA1,  alph_1,  xf2,  xA2,  alph_2;
%       ym,   yO_,  0,   yf1,  yA1,  Fres_1,  yf2,  yA2,  Fres_2];
%XArTrn XAlTrn XmTrn YmTrn XfrTrn Xf1Trn
XdTrn(end+1) =X2Trn(end)+lknife*cos(PsiTrn(end)); % Рассчитаем
YdTrn(end+1) =Y2Trn(end)+lknife*sin(PsiTrn(end)); % дальний край ножа
%
% Определим момент на кривошипе, вызываемый единичным усилием реза
if Fres1Trn(end) ~= 0
    mres_3=MultyV([-sin(Alph1Trn(end)); cos(Alph1Trn(end))],
                  [Xf1Trn(end)-X3Trn(end); Yf1Trn(end)-Y3Trn(end)]);
    m5_3=MultyV([cos(alph5); sin(alph5)],v12);
    F5=-mres_3/m5_3;
    Y_=[-F5*cos(alph5)+sin(Alph1Trn(end)); -F5*sin(alph5)-
        cos(Alph1Trn(end))];
    X_=[cos(alpha), -sin(alpha); sin(alpha), cos(alpha)]\Y_;
    Fa_r=X_(1);
    Fa=X_(2);
    if Fa<0
        Mcl_Trn(end+1)=Fa*la;
    else
        Mcl_Trn(end+1)=0;
        Alph1Trn(end)=0;
    end;
else
    Mcl_Trn(end+1)=0;
    F5=0;
    Fa=0;
end
if FresrTrn(end) ~= 0
    mres_3=MultyV([-sin(AlphrTrn(end)); cos(AlphrTrn(end))],
                  [XfrTrn(end)-X3Trn(end); YfrTrn(end)-Y3Trn(end)]);
    m5_3=MultyV([cos(alph5); sin(alph5)],v12);
    F5=-mres_3/m5_3;
    Y_=[-F5*cos(alph5)+sin(AlphrTrn(end));
        -F5*sin(alph5)-cos(AlphrTrn(end))];
    X_=[cos(alpha), -sin(alpha); sin(alpha), cos(alpha)]\Y_;
    Fa_r=X_(1);
    Fa=X_(2);
    if Fa>0
        Mcr_Trn(end+1)=Fa*la;
    else

```



```

        Mcr_Trn(end+1)=0;
        AlphrTrn(end)=0;
    end;
else
    Mcr_Trn(end+1)=0;
    F5=0;
    Fa=0;
end
end;
%
% -----
% Расчёт значения производной момента инерции по углу поворота
% кривошипа
dJdAlphTrn = (JTrn(2:end)-JTrn(1:end-1));
dJdAlphTrn = [JTrn(1)-JTrn(end-1), dJdAlphTrn]/Da;
%
% -----
% Расчёт приведённого момента статического от неуравновешенных масс
DeltaYa = (Ya(2:end)-Ya(1:end-1));
DeltaYa = [Ya(1)-Ya(end-1), DeltaYa];
DeltaY23 = (Y23(2:end)-Y23(1:end-1));
DeltaY23 = [Y23(1)-Y23(end-1), DeltaY23];
DeltaY5 = (Y5(2:end)-Y5(1:end-1));
DeltaY5 = [Y5(1)-Y5(end-1), DeltaY5];
MpTrn = (DeltaYa*ma+DeltaY23*m23+DeltaY5*m5)*9.8/Da;
%=====
% Отображение результатов кинематического расчёта
%=====
%Момент инерции
figure;
subplot(2,1,1);
plot(AlphaTrn*180/pi, JTrn);
axis([0 360, 0, max(JTrn)*1.2]);
grid on;
title('Зависимость момента инерции J от поворота кривошипа \alpha_a');
%
%Производная момента инерции
subplot(2,1,2);
plot(AlphaTrn*180/pi, dJdAlphTrn);
axis([0 360, min(dJdAlphTrn)*1.2, max(dJdAlphTrn)*1.2]);
grid on;
title('Зависимость производной момента инерции {\partial J / \partial \alpha_a} от поворота кривошипа \alpha_a');
%
% Момент статический от неуравновешенных масс
figure;
plot(AlphaTrn*180/pi, MpTrn);
axis([0 360, min(MpTrn)*1.2, max(MpTrn)*1.2]); grid on;
title('Момент статический от неуравновешенных масс');
%
% Траектория точки M в системе координат xOy
figure;
plot(XmTrn, YmTrn); hold on;
plot([xlst xlst+Blst xlst+Blst xlst xlst],
     [ylst ylst ylst+h ylst+h ylst]);
title('Траектория точки M в системе координат xOy');
% Траектория точки M в системе координат, связанной с листом
figure;
plot(XmTrn-xlst, YmTrn-ylst);
axis([-0.5 Blst+0.5 -0.01 0]); grid on;
title('Траектория точки M в системе координат, связанной с листом');
%
% -----
% Зависимость угла реза alph от угла поворота кривошипа alph_a
figure;

```

```

subplot(2,1,2);
plot(AlphaTrn*180/pi, AlphrTrn*180/pi);
title('Зависимость угла реза \alpha от \alpha_a при движении
      точки реза от оси коромысла');
axis([0 360 1.2*min([AlphrTrn*180/pi]) max([AlphrTrn*180/pi])*1.2]);
grid on; subplot(2,1,1);
plot(AlphaTrn*180/pi, AlphlTrn*180/pi); grid on;
axis([0 360 1.2*min([AlphlTrn*180/pi]) max([AlphlTrn*180/pi])*1.2]);
title('Зависимость угла реза \alpha от \alpha_a при движении
      точки реза к оси коромысла');
%
% -----
% Зависимость момента сопротивления от угла поворота
% кривошипа alph_a
figure; subplot(2,1,1);
plot(SetAngle(AlphaTrn), Mcl_Trn); grid on;
axis([0 360, min(Mcl_Trn)*1.2, max(Mcl_Trn)*1.2]);
title('Зависимость момента реза M_c от \alpha_a при движении точки
      реза от оси коромысла');
subplot(2,1,2);
plot(SetAngle(AlphaTrn), Mcr_Trn);
axis([0 360, min(Mcr_Trn)*1.2, max(Mcr_Trn)*1.2]); grid on;
title('Зависимость момента реза M_c от \alpha_a при движении
      точки реза к оси коромысла');
open_system('sulkr');

```

Листинг №2.16. Процедура отображения результатов моделирования (Plot1kr.m).

```

function doomy=Plot1kr(Alpha, time);
global la l2 l5 xa ya ylst
global l23_M alph23_M m23 J23
global l5_M alph5_M J5 m5 la_M alpha_M Ja ma
global AlphaTrn X2Trn Y2Trn X3Trn Y3Trn Alph2Trn XdTrn YdTrn
global JTrn dJdAlphTrn MpTrn Mcl_Trn Mcr_Trn
global om23_Trn v2_Trn
global XflTrn YflTrn XAlTrn
global AlphlTrn XfrTrn YfrTrn YARTrn AlphrTrn
global XArTrn XAlTrn XmTrn YmTrn XfrTrn XflTrn
global VaGRPH FresGRPH VmGRPH alphGRPH XaGRPH
%
% -----
if nargin==2
    TIME=Alpha(:,1); I=[];
    for T=time
        I=[I, min(find(TIME>=T))];
    end;
    Alpha1=Alpha(I,2);
    Alpha1=setangle(Alpha1)*pi/180;
    j=0; Alpha1=Alpha1';
else
    Alpha1=setangle(Alpha)*pi/180;
end;
k=size(AlphaTrn);
figure;
for Angle=Alpha1
    hold off; % ОЧИСТИТЬ ОКНО
    plot([0 5],[2 -1], '.');
    hold;
    t=1;
    while AlphaTrn(t)<Angle
        t=t+1;
    end;
    % Построить механизм

```

```

x=[0, X2Trn(t), X3Trn(t), xa, X3Trn(t), XdTrn(t), X2Trn(t)];
y=[0, Y2Trn(t), Y3Trn(t), ya, Y3Trn(t), YdTrn(t), Y2Trn(t)];
plot(x,y,'k');

x=[X2Trn(t), X3Trn(t)];
y=[Y2Trn(t), Y3Trn(t)];
plot(x,y,'ok');

x=[0, xa];
y=[0, ya];
plot(x,y,'*k');

text(0.2,1.85, strcat('Перекрытие: ',
                    num2str(1000*(ylst-YmTrn(t))), ' мм'));
if nargin==2
    j=j+1;
    title(strcat('Положение кривошипа \alpha_a=',
                num2str(AlphaTrn(t)*180/pi),' в момент времени
                t= ', num2str(FresGRPH(I(j),1))));
    text(0.2,1.65, strcat('F_{pez}= ', num2str(FresGRPH(I(j),2)),
                        ' Н'));
    text(0.2,1.45, strcat('\alpha_{pez}= ',
                        num2str(180/pi*alphGRPH(I(j),2)), ' град'));
    if FresGRPH(I(j),2)~=0
        PlotKnLst(X2Trn(t), Y2Trn(t), Alph2Trn(t), XmTrn(t), YmTrn(t),
                 VaGRPH(I(j),2), XfrTrn(t), YfrTrn(t), XflTrn(t),
                 YflTrn(t));
    else
        PlotKnLst(X2Trn(t), Y2Trn(t), Alph2Trn(t), XmTrn(t), YmTrn(t));
    end;
else
    PlotKnLst(X2Trn(t), Y2Trn(t), Alph2Trn(t), XmTrn(t), YmTrn(t));
end
end
pause(0.2);
end;

```

Ниже приведены листинги скриптов, предназначенные для расчёта режима управления углом рассогласования и отображения результатов расчёта.

Листинг №2.17. Функция, осуществляющая расчёт управляющего воздействия угла рассогласования (ClcDalph).

```

function [Alph_z, DAlph_ab] = ClcDalph;
% Скрипт, осуществляющий поиск оптимального угла рассогласования.
global Z X
KinData2kr;          % Загрузка кинематических параметров ножниц
global Tmp1 Tmp2 Tmp3 Tmp4 Tmp5
global lknife Rknife psi_pr h_pr psi_n psi_sm hlowknife
global Delta ylst xlst h Blst
global ALPHZ DALPH
global epslnotr h % Величина относительного отрыва и толщина отрезаемого листа
if isempty(epslnotr) % Если величина относительного отрыва листа не задана,
    epslnotr=1;      % то принять её равной нулю
end;

ALPHZ=[]; DALPH=[];
Fdira=0; Fdirb=0; VAnglZ=280*pi/180;

%xlst      -- положение края листа
%Blst      -- ширина листа

```

```
%Alph_z0      -- "начальный средний угол";
%Alph_zStep   -- шаг изменения "среднего угла";
%Alph_z       -- Массив средних углов;
%DAlph_ab     -- Массив углов рассогласования.

%
% Ввод исходных данных

Delta=0.001*input('Введите желаемое перекрытие, мм: ');
while(isempty(Delta))
    Delta=0.001*input('Введите желаемое перекрытие, мм:');
end;
DalphMin=0.5*pi/180*input('Минимальное значение угла рассогласования, град: ');
while(isempty(Delta))
    DalphMin=0.5*pi/180*input('Минимальное значение угла рассогласования,
                                град: ');
end;
DalphMax=0.5*pi/180*input('Введите максимальное значение угла рассогласования
                            в начале работы, град: ');
while(isempty(Delta))
    DalphMax=0.5*pi/180*input('Введите максимальное значение угла
                                рассогласования, град: ');
end;
if ~isempty(input('Параметры по умолчанию? (Пустой ввод - да)'))
    Alph_zStep=pi/180*input('Введите шаг изменения "среднего угла" (по
                                умолчанию -- 0,25 град.), град: ');
    if isempty(Alph_zStep)
        Alph_zStep = pi/720;
    end;
    Alph_z0=pi/180*input('Введите начальный "средний угол" (по
                                умолчанию -- 270 град.), град: ');
    if isempty(Alph_z0)
        Alph_z0=3/2*pi;
    end;
    Direct = input('Направление реза (0 -- от оси коромысла; 1 -- к оси
                                коромысла)');
    F_KinRis=input('Рисовать ножницы в процессе работы алгоритма? (Пустой
                                ввод - нет)');
else
    Alph_zStep = pi/720;
    Alph_z0=3/2*pi;
    Direct = 1;
    F_KinRis=[];
end;

%
% Определение положения участка траектории нижней точки ножа, линейность
% которого нужно обеспечить
h_prpr=Rknife*(Delta+h)/(Rknife - Delta - h);
lnr=sqrt((Rknife+h_prpr)^2-Rknife^2)-sqrt(h_prpr^2-(Delta+h)^2);
if Direct ==1 % Движение к коромыслу
    xleft = xlst;
    xright = xlst+Blst+1.3*lnr;
elseif Direct ==0 % Движение от коромысла
    xleft = xlst-lnr;
    xright = xlst+Blst;
else
    error('Неверно задано направление');
end;

%
%Расчёт начального угла рассогласования
```

```

Alph_ab0 =GetSolves('GetErrDelta(y+x, y-x)', [DalphMin, DalphMax], Alph_z0);
% Здесь x = Alph_ab0; y = Alph_z0.
xm = Tmp1; ym = Tmp4;
Alph_z1(1)= Alph_z0;   Alph_ab1(1, 1) = Alph_ab0;
Alph_z2(1)= Alph_z0;   Alph_ab2(1, 1) = Alph_ab0;

i=1;  xm1 = xm;  ym1= ym;  xm2 = xm;  ym2= ym;

if ~isempty(F_KinRis)
    BPlot2kr(Alph_z0+Alph_ab0, Alph_z0-Alph_ab0, Tmp3, [xm, ym]); % Построить
    pause(0.3); % ножницы с полученным положением
end;
XXX1=xm; XXX2=xm;

disp('_____');
disp('Расчёт вправо');
ALPHZ=[Alph_z0]; DALPH=[Alph_ab0];
while(xm1<xright & xm1>xleft & ym1<ylst+h)
    i=i+1; Alph_z1(1, i) = Alph_z1(i-1) + Alph_zStep;
    if Fdira == Fdirb
        IntZ=[Alph_ab1(i-1)-1.01*Alph_zStep, Alph_ab1(i-1)+1.01*Alph_zStep];
    else
        IntZ=[Alph_ab1(i-1)+1.5*Alph_zStep, Alph_ab1(i-1)+3*Alph_zStep];
    end;
    if XXX1<=xm1
        XXX1=xm1;
        Alph_ab1(1, i) = GetSolves('GetErrDelta(y+x, y-x)', IntZ, Alph_z1(i));
        % x -- половина угла рассогласования
        % y -- средний угол
    else
        XXX1=+inf;
        Alph_ab1(1, i) = FindMin('GetXM(y+x, y-x)', IntZ, Alph_z1(i));
    end;

    xm1 = Tmp1; ym1=Tmp4;
    if ~isempty(F_KinRis)
        BPlot2kr(Alph_z1(i)+Alph_ab1(1, i), Alph_z1(i)-Alph_ab1(1, i), Tmp3,
            [xm, ym]);
        pause(0.3);
    end;
    ALPHZ=[ALPHZ, Alph_z1(1, i)]; DALPH=[DALPH, Alph_ab1(1, i)];
    if DALPH(end)-DALPH(end-1)>Alph_zStep
        Fdira=1;
    end;
end;
i=1; Fdira=0;
disp('_____');
disp('Расчёт влево');

while(xm2<xright & xm2>xleft & ym2<ylst+h)
    i=i+1; Alph_z2(1, i) = Alph_z2(i-1) - Alph_zStep;
    if Fdira == Fdirb
        IntZ=[Alph_ab2(i-1)-1.01*Alph_zStep, Alph_ab2(i-1)+1.01*Alph_zStep];
    else
        IntZ=[Alph_ab2(i-1)+1*Alph_zStep, Alph_ab2(i-1)+2*Alph_zStep];
    end;
    if XXX2>=xm2
        XXX2=xm2;
        Alph_ab2(1, i)=GetSolves('GetErrDelta(y+x, y-x)', IntZ, Alph_z2(i));
    else
        XXX2=-inf;
        Alph_ab2(1, i)=GetSolves('GetErrDelta(y+x, y-x)+1000', IntZ, Alph_z2(i));
    end;
end;

```

```
end;
xm2=Tmp1;          ym2=Tmp4;
if ~isempty(F_KinRis)
    BPlot2kr(Alph_z2(i)+Alph_ab2(1, i), Alph_z2(i)-Alph_ab2(1, i), Tmp3,
             [xm, ym]);
    pause(0.3);
end;
ALPHZ=[Alph_z2(1, i), ALPHZ]; DALPH=[Alph_ab2(1, i), DALPH];
if Alph_ab2(i)-Alph_ab2(i-1)>Alph_zStep
    Fdirb=1;
end;
end;

%
% Подготовка результатов расчёта и их вывод

Alph_z2=flip1r(Alph_z2(2:end));
Alph_z  = [Alph_z2,    Alph_z0,  Alph_z1(2:end)];
Alph_ab2=flip1r(Alph_ab2(2:end));
DAlph_ab = 2*[Alph_ab2, Alph_ab0, Alph_ab1(2:end)];

PlotPer(Alph_z, DAlph_ab, Direct);
Z = Alph_z;      X = DAlph_ab;
%
function ErrDelta = GetErrDelta(alpha, alphb);
    global Delta ylst hlst h
    global lknife Rknife psi_pr h_pr psi_n  psi_sm hlowknife
    global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta
    global Tmp1 Tmp2 Tmp3 Tmp4 Tmp5

    tL = Clc_tL(alpha, alphb);

    x1=xa+la*cos(alpha);    y1=ya+la*sin(alpha);    R1=sqrt(x1^2+y1^2);
    x5=xb+lb*cos(alphb);    y5=yb+ lb*sin(alphb);
    rho1    = acos(x1/R1);
    tAlph   = rho1-acos((tL^2+R1^2-l1^2)/(2*R1*tL));
    alph1=acos((x1-tL*cos(tAlph))/l1);
    gam=acos((tL^2+l2^2-l5^2)/(2*tL*l2));
    alph3=beta+tAlph+gam+pi-2*pi;
    alph2=pi-beta+alph3;
    alph5=tAlph-asin((l2/l5)*sin(gam));
    x2=15*cos(alph5);      y2=15*sin(alph5);

    ym= y2+(Rknife-h_pr)*sin(alph2+psi_pr)-Rknife;
    xm=x2+(Rknife-h_pr)*cos(alph2+psi_pr);

    FacDelta= hlowknife - ym;
    ErrDelta = FacDelta -Delta;
    Tmp1= xm; Tmp2= ErrDelta; Tmp3=tL; Tmp4=ym;

%
function XM = GetXM(alpha, alphb);
    global Delta ylst hlst h
    global lknife Rknife psi_pr h_pr psi_n  psi_sm hlowknife
    global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta
    global Tmp1 Tmp2 Tmp3 Tmp4 Tmp5

    tL = Clc_tL(alpha, alphb);
    x1=xa+la*cos(alpha);    y1=ya+la*sin(alpha);    R1=sqrt(x1^2+y1^2);
    x5=xb+lb*cos(alphb);    y5=yb+ lb*sin(alphb);
    rho1    = acos(x1/R1);
    tAlph   = rho1-acos((tL^2+R1^2-l1^2)/(2*R1*tL));
    alph1=acos((x1-tL*cos(tAlph))/l1);
```

```

gam=acos((tL^2+l2^2-15^2)/(2*tL*12));
alph3=beta+tAlph+gam+pi-2*pi;
alph2=pi-beta+alph3;
alph5=tAlph-asin((l2/15)*sin(gam));
x2=15*cos(alph5);      y2=15*sin(alph5);

ym= y2+(Rknife-h_pr)*sin(alph2+psi_pr)-Rknife;
XM=x2+(Rknife-h_pr)*cos(alph2+psi_pr);
FacDelta= hlowknife - ym;
ErrDelta = FacDelta -Delta;
Tmp1 = XM; Tmp2 = ErrDelta;  Tmp3=tL; Tmp4=ym;

```

Листинг №2.18. Функция строит графики перекрытия ножей, положения кривошипов, угла реза (PlotPer).

```

function doomy=PlotPer(Alph_z, DAlph_ab, direct);
% Функция строит графики перекрытия, угла резания и пр.
% при вращении кривошипов в одном направлении
global Blst xlst ylst h hmiddle Rknife hlowknife
epslnotr=0.3;
if nargin==2
    direct = input('Направление реза (0 -- от оси коромысла;
                  1 -- к оси коромысла)');
end;
% _____
% Построить траекторию нижней точки ножа
figure;
i=0;
% Построить траекторию при постоянном угле рассогласования
for alpha=0:2*pi/50:2*pi
    i=i+1;
    alphb= alpha-70*pi/180;
    [xm, ym]=GetPer(alpha, alphb);
    X1(i)= xm; Y1(i)= ym;
    if ym <= hmiddle
        Alph1(i)=acos((Rknife-(hmiddle-ym))/Rknife)*180/pi;
    else
        Alph1(i)=0;
    end;
    Alpha1(i)=alpha;
end;
hold on
if direct==0
    axis([-1 5 ylst-0.02 ylst+0.07]);
elseif direct==1
    axis([-1 6 ylst-0.02 ylst+0.07]);
end;
plot(X1, Y1, '--');
% Построить лист
plot([xlst xlst+Blst xlst+Blst xlst xlst], [ylst ylst ylst+h ylst+h ylst]);
plot([xlst xlst+Blst], [ylst+h*(1-epslnotr) ylst+h*(1-epslnotr)], ':');
grid on
% Построить траекторию при переменном угле рассогласования
k=size(Alph_z); k=k(2); X1=[]; Y1=[];
for i=1:k
    [xm, ym]=GetPer(Alph_z(i)+DAlph_ab(i)/2, Alph_z(i)-DAlph_ab(i)/2);
    X1(i) = xm;      Y1(i) = ym;
    XM(i)= xm; YM(i)= ym;
    Alpha(i)=Alph_z(i)+DAlph_ab(i)/2;
    if hmiddle>ym

```

```

        Alph2(i) = acos((Rknife-(hmiddle-ym))/Rknife)*180/pi;
    else
        Alph2(i) = 0;
    end;
end;
plot(X1, Y1, 'r');
% Построить несколько положений ножа
for i=[1:k/11:k, k]
    [xm, ym]=GetPer(Alph_z(floor(i))+DAlph_ab(floor(i))/2,
                    Alph_z(floor(i))-DAlph_ab(floor(i))/2);
    plot(xm, ym, 'x'); % Построить нижнюю точку ножа
    if direct==0
        X1 = xm-0.1:0.1:xm+2.5;
    elseif direct==1
        X1 = xm-2.5:0.1:xm+0.1;
    end;
    Y1 = -sqrt(Rknife^2-(X1-xm).^2)+ym+Rknife;
    plot(X1,Y1,'k');
end;
title('Траектория нижней точки ножа');
%
% -----
% Графики угла резания и перекрытия в функции от угла
% поворота кривошипа а
% График угла рассогласования в функции поворота кривошипа а
figure;
[Z, K]=SetAngle(Alpha);
subplot(2,1,2);
plot(Z(K==0), hlowknife-YM(K==0));
axis([0, 360, hlowknife-max(YM)-(max(YM)-min(YM))*0.05,
      hlowknife-min(YM)+(max(YM)-min(YM))*0.05]);
hold on
plot(Z(K==1), hlowknife-YM(K==1));
plot(Z(K==1), hlowknife-YM(K==1));
grid on;
title('Зависимость величины перекрытия от поворота кривошипа {\it a}');
subplot(2,1,1);
plot(Z(K==0), Alph2(K==0), 'r');
axis([0, 360, min(Alph2)-(max(Alph2)-min(Alph2))*0.1, max(Alph2)+
      (max(Alph2)-min(Alph2))*0.1]);
hold on
plot(Z(K==1), Alph2(K==1), 'r');
plot(Z(K==1), Alph2(K==1), 'r');
grid on;
[Z, K]=setangle(Alpha1);
plot(Z(K==0), Alph1(K==0), '-. ');
plot(Z(K==1), Alph1(K==1), '-. ');
plot(Z(K==1), Alph1(K==1), '-. ');
title('Зависимость угла резания от поворота кривошипа {\it a}');
%
% -----
% График движения точки m по оси Ox в зависимости от среднего угла
figure;
subplot(2,1,1);          plot(XM);  ylabel('XM'); grid on;
subplot(2,1,2);          plot(YM);  ylabel('YM'); grid on;
%
% -----
% Графики относительной скорости
figure;
alpha = Alph_z+DAlph_ab/2;
alphb = Alph_z-DAlph_ab/2;
DA = alpha(2:end)-alpha(1:end-1);
DB = alphb(2:end)-alphb(1:end-1);
DZ = Alph_z(2:end)-Alph_z(1:end-1);
DA=DA./DZ;   DB=DB./DZ;

```



```

subplot(2, 1, 1); plot(Alph_z(1:end-1), DA, 'x-'); grid on;
ylabel('\omega_a/\omega_z');
title('Зависимость угла рассогласования от поворота кривошипа {\it a}');
subplot(2, 1, 2); plot(Alph_z(1:end-1), DB, 'x-'); grid on;
ylabel('\omega_b/\omega_z');
title('Зависимость угла рассогласования от поворота кривошипа {\it b}');
disp('Сохранить данные на диске?');
YN='0'
pause;
while(YN~='y' | YN~='y' )
    YN=input('y -- да, n -- нет');
    if YN=='y'
        name=input('Имя файла');
        save(name, 'Alph_z', 'DAlph_ab');
    elseif YN=='n'
        break;
    end;
end;
end;
%
function [xm, ym]=GetPer(alpha, alphb);
global Delta ylst hlst h
global lknife Rknife psi_pr h_pr psi_n psi_sm hlowknife
global la lb l1 l2 l3 l4 l5 l6 xa ya xb yb beta
global Tmp1 Tmp2 Tmp3 Tmp4 Tmp5
tL=clc_tl(alpha, alphb);
x1=xa+la*cos(alpha); y1=ya+la*sin(alpha); R1=sqrt(x1^2+y1^2);
x5=xb+lb*cos(alphb); y5=yb+ lb*sin(alphb);
rho1 = acos(x1/R1);
tAlph = rho1-acos((tL^2+R1^2-l1^2)/(2*R1*tL));
alph1=acos((x1-tL*cos(tAlph))/l1);
gam=acos((tL^2+l2^2-l5^2)/(2*tL*l2));
alph3=beta+tAlph+gam+pi-2*pi;
alph2=pi-beta+alph3;
alph5=tAlph-asin((l2/l5)*sin(gam));
x2=l5*cos(alph5); y2=l5*sin(alph5);
xm = x2+(Rknife-h_pr)*cos(alph2+psi_pr);
ym = y2+(Rknife-h_pr)*sin(alph2+psi_pr)-Rknife;

```

П1.3. Листинги к третьей главе

Ниже приводятся листинги скриптов, в которых реализован алгоритм оптимизации бокового зазора. Процедуры работы с базой данных оптимальных зазоров.

Листинг №3.1. Функция возвращает указатель на элемент базы данных зазоров, содержащий данные об резке металла заданной марки, толщины и температуры ножами с указанной степенью затупления (ZGetPointer)

```

function p=ZGetPointer(Mark, t, h, r);
% Скрипт выдаёт указатель p на элемент БД с указанными условиями
% резки. Если элемента нет, то создаётся новый элемент
global BDZ Fhskropt Nmarks rs Dr Dh
ir = max(find(rs<=r+Dr/2 & rs>=r-Dr/2)); % Определим индекс ir (по степени
MarkFounded=0; % затупления ножей)
for im=1:Nmarks % Найдём марку (определим индекс im)
    if isequal(BDZ(im).Marka, Mark);
        MarkFounded=1; break; % Марка найдена в базе данных
    end;
end;
end;
if MarkFounded==1

```

```

if h>BDZ(im).hmin      % Если толщина проката превышает минимальную, с которой
    Fhskropt = 0;      % разрешается оптимизация, то разрешить оптимизацию
    %Поиск толщины которая находится в заданном диапазоне толщин
    ih=max(find(BDZ(im).hs+Dh>h & BDZ(im).hs<=h));
    if ~isempty(ih);   % Элемент ih найден
        iT = max(find(BDZ(im).hDat(ih).Ts<t+BDZ(im).DT/2 &
            BDZ(im).hDat(ih).Ts>=t-BDZ(im).DT/2));
        if isempty(iT) % Если элемент iT не найден, то скопировать
            % данные для ближайшего диапазона температур
        % Предполагается, что есть данные хотя бы для одного температурного
        % диапазона
            iTl = max(find(BDZ(im).hDat(ih).Ts<t));
            iTr = min(find(BDZ(im).hDat(ih).Ts>t));
            if isempty(iTl) % Найдём ближайший температурный диапазон
                iTT = iTr; iT = 1;
            elseif isempty(iTr)
                iTT = iTl; iT = iTl+1;
            else
                if t-BDZ(im).hDat(ih).Ts(iTl)>BDZ(im).hDat(ih).Ts(iTr)-t
                    iTT = iTr; iT = iTr;
                else
                    iTT = iTl; iT = iTr;
                end;
            end;
            % Вставим элемент TDat, равный элементу из ближайшего
            % температурного диапазона
            BDZ(im).hDat(ih).TDat=[BDZ(im).hDat(ih).TDat(1:iTl,:);
                BDZ(im).hDat(ih).TDat(iTT,:);
                BDZ(im).hDat(ih).TDat(iTr:end,:)];
            Tmp = round(t/BDZ(im).DT)*BDZ(im).DT; % Округлим температуру
            BDZ(im).hDat(ih).Ts=[BDZ(im).hDat(ih).Ts(1:iTl), Tmp,
                BDZ(im).hDat(ih).Ts(iTr:end)];
        end;
    if isempty(BDZ(im).hDat(ih).TDat(iT, ir).deltas)
        % Оптимизация для данной степени затупления не проводилась.
        % Нужно использовать данные, соответствующие ближайшей степени
        % затупления в том же температурном диапазоне
        irl=[];
        for i=1:max(size(rs))
            if ~isempty(BDZ(im).hDat(ih).TDat(iT, i).deltas)
                irl(end+1) = i;
            end;
        end;
        irr = irl(min(find(irl>=ir)));
        irl = irl(max(find(irl<ir)));
        if isempty(irl) % Найдём ближайший диапазон степеней затупления
            irT=irr;
        elseif isempty(irr)
            irT=irl;
        else
            if r-rs(irl)>rs(irr)-r
                irT=irr;
            else
                irT=irl;
            end;
        end;
        BDZ(im).hDat(ih).TDat(iT, ir)=BDZ(im).hDat(ih).TDat(iT, irT);
    end;
else
    % Оптимизация для заданной толщины не проводилась
    % (элемент ih не найден). Нужно создавать новый
    ih1 = max(find(BDZ(im).hs < h));

```

```

    ihr = min(find(BDZ(im).hs > h));
    if isempty(ihl) % Найдём ближайшую толщину
        ihT=ihr-1;  ih = 1;
    else
        ihT=ihl;    ih = ihl+1;
    end;
    Tmp = round(h/Dh)*Dh; % Округлим значение толщины и вставим его в ряд
                        % толщин, для которых проводилась оптимизация
    BDZ(im).hs = [BDZ(im).hs(1:ihT), Tmp, BDZ(im).hs(ihT+1:end)];
    BDZ(im).hDat = [BDZ(im).hDat(1:ihT), BDZ(im).hDat(1),
                    BDZ(im).hDat(ihT+1:end)];
    for i=1:max(size(rs)) % Вставим элемент в массив hDat
        BDZ(im).hDat(ih).TDat(1, i).deltas = [];
        BDZ(im).hDat(ih).TDat(1, i).deltaDat(1).Fsr = 0;
        BDZ(im).hDat(ih).TDat(1, i).deltaDat(1).k = 1;
        BDZ(im).hDat(ih).TDat(1, i).deltaDat(1).n = 0;
        BDZ(im).hDat(ih).TDat(1, i).deltaDat(1).s = 0;
    end;
    BDZ(im).hDat(ih).Ts=round(t*BDZ(im).DT)/BDZ(im).DT; % Округлим
                                                         % температуру
    iT = 1; % Присвоим индексу температуры "1", т.к. он всего для
           % данной толщины один
    disp(sprintf('Толщина стали, мм: , %g', 1000*h));
    BDZ(im).hDat(ih).TDat(1, ir).deltas = 0.01*input('Введите боковой
                                                       зазор для данной марки стали, %');
end;
p.im = im;    p.ih = ih;    p.iT = iT;    p.ir = ir;
else % Выход из алгоритма с запретом оптимизации, если толщина поступающего
% проката слишком мала
    Fhskpopt = 1; % Запретить оптимизацию
end;
else % Новая марка стали
    BDZ(end+1).Марка = Mark;
    BDZ(end).hs = round(h/Dh)*Dh; % Округлим толщину
    BDZ(end).hmin = 0.001*input('Минимальная толщина, для которой разрешена
                                оптимизация, мм? ');
    BDZ(end).DT = input('Температурный диапазон, в пределах которого свойства
                        проката мало меняются? ');
    BDZ(end).hDat.Ts= round(t*BDZ(end).DT)/BDZ(end).DT;
    for i = 1:max(size(rs))
        BDZ(end).hDat.TDat(1, i).deltas = [];
        BDZ(end).hDat.TDat(1, i).deltaDat(1).Fsr = 0;
        BDZ(end).hDat.TDat(1, i).deltaDat(1).k = 1;
        BDZ(end).hDat.TDat(1, i).deltaDat(1).n = 0;
        BDZ(end).hDat.TDat(1, i).deltaDat(1).s = 0;
    end;
    disp(sprintf('Толщина стали, мм: , %g', 1000*h));
    BDZ(end).hDat.TDat(1, ir).deltas = 0.01*input('Введите боковой зазор для
                                                данной марки стали, % ');
    p.im = max(size(BDZ));    p.ih = 1;    p.iT = 1;    p.ir = ir;
    Nmarks = Nmarks + 1;
    if BDZ(end).hmin<h
        Fhskpopt = 1;
    else
        Fhskpopt = 0;
    end;
end;
end;
end;

```

Листинг №3.2. Функция возвращает значение указанной величины из базы данных зазоров (ZGetValue)

```
function ZSetValue(p, var, delta, v);
% Установить значение переменной 'var' в значение v.
% 'var' -- имя переменной:
%     Fsr   -- среднее значение усилия резки при зазоре delta
%     n     -- число резов с зазором delta
%     k     -- коэффициент "ускорения" сходимости
%     s     -- количество последних резов, изменивших Fsr в одном направлении
global BDZ
id = [];
for i=1:max(size(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas))
    if abs(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(i)-delta)<eps;
        id = i; break;
    end;
end;
if isempty(id) % Если для данного зазора нет записи, то создать её
    idl = max(find(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas < delta));
    idr = min(find(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas > delta));
    if isempty(idl) % Найдём ближайший боковой зазор
        id = 1;    idT=idr;
    else
        id = idl+1; idT=idl;
    end;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas=
    [BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(1:idl), delta,
    BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(idr:end)];
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat=
    [BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(1:idl),
    BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(idT),
    BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(idr:end)];
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).Fsr = 0;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).k   = 1;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).n   = 0;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).s   = 0;
end;
X=strcat('BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).',var, '= v;');
eval(X);
```

Листинг №3.3. Функция присваивает заданное значение указанной величине в базе данных зазоров (ZSetValue)

```
function ZSetValue(p, var, delta, v);
% Установить значение переменной 'var' в значение v.
% 'var' -- имя переменной:
%     Fsr   -- среднее значение усилия резки при зазоре delta
%     n     -- число резов с зазором delta
%     k     -- коэффициент "ускорения" сходимости
%     s     -- количество последних резов, изменивших Fsr в одном направлении
global BDZ
id = [];
for i=1:max(size(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas))
    if abs(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(i)-delta)<eps;
        id = i; break;
    end;
end;
if isempty(id) % Если для данного зазора нет записи, то создать её
    idl = max(find(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas < delta));
    idr = min(find(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas > delta));
```

```

if isempty(idl)          % Найдём ближайший боковой зазор
    id = 1;      idT=idr;
else
    id = idl+1; idT=idl;
end;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas=
    [BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(1:idl), delta,
    BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(idr:end)];
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat=
    [BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(1:idl),
    BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(idT),
    BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(idr:end)];
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).Fsr = 0;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).k   = 1;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).n   = 0;
BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).s   = 0;
end;
X=strcat('BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).',var, '= v;');
eval(X);

```

Листинг №3.4. Функция возвращает оптимальную величину бокового зазора при заданных параметрах резки (ZGetOptDelta)

```

function [deltaopt, Fsrmin] = ZGetOptDelta(p);
% Дать оптимальное значение бокового зазора
global BDZ Fhskpopt
deltaopt = -1; Fsr= 0;
if Fhskpopt == 0 % Если оптимизация разрешена для данной толщины
if ~isempty(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas)
    for id=1:max(size(BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas))
        Fsr_id = BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltaDat(id).Fsr;
        if Fsr_id~=0 % Рассматриваются только те значения, для которых
            % проводились опыты
            if Fsr ==0
                Fsr = Fsr_id;
                deltaopt = BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(id);
            elseif Fsr_id < Fsr
                Fsr = Fsr_id;
                deltaopt = BDZ(p.im).hDat(p.ih).TDat(p.iT, p.ir).deltas(id);
            end;
        end;
    end;
end;
end;
end;
if nargin == 2
    Fsrmin=Fsr;
end;

```

Далее приведена процедура оптимизации зазора, а также процедуры, предназначенные для анализа её работы.

Листинг №3.5. Процедура оптимизации бокового зазора (Zopt).

```

function f=Zopt;
% Алгоритм оптимизации зазора
global p delta Fsr0 Ddelta Fskpopt Fuskpopt Fsr F
global alph h % угол резания в момент измерения усилия резки и толщина проката
global nmax nmin s0 delta_max deltamin k0
f=ZReska; % Выполнить рез с установленным боковым зазором

```

```

if ~Fskpopt
% Алг 3
    F=f*tan(alpha)/h^2; % "нормализация усилия"
    Fsr = ZGetValue(p, 'Fsr', delta);
    k = ZGetValue(p, 'k', delta);
    n = ZGetValue(p, 'n', delta);
    s = ZGetValue(p, 's', delta);
    if n<nmax
        n=n+1; ZSetValue(p, 'n', delta, n);
    end;
    si = sign(F-Fsr);
    Fsr= Fsr+k/n*(F-Fsr); ZSetValue(p, 'Fsr', delta, Fsr);
    if abs(s+si)>abs(s)
        s=s+si;
    else
        s=0;
    end;
    ZSetValue(p, 's', delta, s);
    if abs(s)>s0
        if k+k0<=n
            k=k+k0; ZSetValue(p, 'k', delta, k);
            disp(sprintf('* %g',k));
        end;
    else
        if k>1
            k=k-k0; ZSetValue(p, 'k', delta, k);
            disp(sprintf('- %g',k));
        end;
    end;
% Конец Алг 3
if n>=nmin
if ~Fuskpopt
    if Fsr>Fsr0
        Ddelta=-Ddelta;
    end;
    Tmp = (delta+Ddelta)*h;
    if Tmp<deltamax & Tmp>deltamin
        delta =delta+Ddelta; Fsr0=Fsr;
    else
        Ddelta=-Ddelta; delta=delta+Ddelta; Fsr0=Fsr;
    end;
end;
end;
end;

```

Листинг №3.6. Процедура, имитирующая измерения силы реза (Zreska).

```

function [F1, F2] = ZReska;
global h delta DFS alpha DeltOpt DeltF indx
% Функция имитирует усилие, замеренное во время реза
% Dfs -- разброс усилия резки в процентах
inicomm
Kep=0.7;
Fmax=Kep*epslnotr*h^2/tan(alpha)*taumax+z*sigmav*h^2;
Fn = 0.72*Fmax; % Усилие при оптимальном зазоре
delta_=(delta-DeltOpt(indx))*h;
if delta_<h*0.029
    F=1.1*Fn;
elseif delta_<h*0.045
    F=Fn+(1+cos((delta_-0.029*h)/((0.045-0.029)*h/pi)))*0.05*Fn;
elseif delta_<h*0.045*3

```

```

    F=Fn+(1-cos((delta_-0.045*h)/((0.045*3-0.045)*h/pi))*0.075*Fn;
else
    F=1.15*Fn;
end;
F=F*(1+0.01*DeltF(indx));
F1=F*(1+DFS*0.02*(sum(rand(1,5))/5-0.5));
if nargout==2
    F2=F;
end;

```

Листинг №3.7. Процедура, настраивающая переменные перед началом моделирования работы алгоритма оптимизации зазора (ZIni).

```

clear global
clear
global p delta Fsr0 Ddelta Fskropt Fuskropt Fsr F
global alph h % угол резания в момент измерения усилия резки
                % и толщина проката
global nmax nmin s0 deltamax deltamin Ddeltai k0
global BDZ Nmarks rs Dr Dh
Dr= 0.05;  rs = [0:Dr:0.4];
Dh= 0.01;
Nmarks=0;
% Ограничения бокового зазора
deltamax = 4.00e-3;    deltamin = 0.35e-3;
Ddeltai = 0.001;    % Минимальный шаг зазора
cd c:\disertacia\4zazor

```

Листинг №3.8. Процедура, имитирующая работу системы управления боковым зазором при порезке нескольких раскатов (ZoptAnaliz).

```

% Скрипт предназначен для выполнения анализа работы алгоритма
% оптимизации бокового зазора
% Задание начальных значений управляющих переменных
Fsr0 = 0;  Fskropt = 0;  Fuskropt = 0;
Ddelta = -Ddeltai;
%
% Задание значений, определяющих работу алгоритма
nmax = 50;    % Максимальное число учитываемых значений
nmin = 15;    % Минимальное число резов с данным зазором, прежде
                % чем будет осуществлён переход к следующему зазору
s0 = 10;
k0 = 24;
%
% Параметры резки
Mark= 'СТ20'; % Марка стали
t = 400;    % Температура листа
h = 0.04;    % Толщина листа
r = 0;    % Ножи заточены
alph = 2*pi/180; % Угол реза
% Оптимальное значение БЗ 1.8мм для h=40мм
Nmdl = 300;    % Число резов
if isempty(BDZ)
    Nmarks = 0;
end;
p=ZGetPointer(Mark, t, h, r);
%
% Переменные, используемые для моделирования возмущений
% DeltOpt задаёт смещение с течением времени оптимального бокового зазора

```

```

% DeltF задаёт изменение силы реза с течением времени
% DFS задаёт величину помехи в % в измерениях усилия резки
global DFS DeltOpt DeltF
%
disp('0 -- нет возмущ. усилия, 1 -- шум в усилении 2,5%');
disp('00 -- нет возмущ. зазора, 10 -- плавное 20 -- скачок 1%h');
disp('30 -- плавное возмущ. в усилении 40 -- скачок 5%F');
Tmp=input('Введите вид возмущения');
if 10*round(Tmp/10) == Tmp
    DFS = 0; % Без случайной помехи
else
    DFS = 2.5; % С наличием случайной помехи
end;
Tmp=round(Tmp/10);
DeltOpt = zeros(1, Nmdl); DeltF = zeros(1, Nmdl);
if Tmp==1
    % 2. При медленно изменяющемся оптимальном зазоре (что может иметь место
    % при постепенном износе клиньев)
    for indx=20:Nmdl
        DeltOpt(indx) = 0.01*(indx-1)/(Nmdl-1);
    end;
elseif Tmp==2
    % 3. При скачкообразно изменяющемся оптимальном зазоре
    % (что может иметь место при постепенном износе механизма резания,
    % когда данный сорт проката долго не резался)
    % (увеличение оптимального зазора на 5% скачком)
    DeltOpt = [zeros(1,20) 0.01*ones(1, Nmdl-20)];
elseif Tmp==3
    % 4. При постепенно изменяющемся усилении резки, что может иметь место при
    % постепенном затуплении ножей,
    for indx=20:Nmdl
        DeltF(indx) = 5*(indx-1)/(Nmdl-1);
    end;
elseif Tmp==4
    % 5. При скачкообразно изменяющемся усилении резки
    DeltF = [zeros(1,20) 5*ones(1, Nmdl-20)];
end;
% а) когда зазор установлен меньше оптимального
delta = 0.04; % Начальное значение бокового зазора
% б) когда зазор установлен больше оптимального
delta = 0.05; % Начальное значение бокового зазора
% в) использовать зазор, полученный в предыдущем опыте
TMP = ZGetOptDelta(p);
if TMP>0
    delta = TMP;
end;
% Определим переменные, используемые для построения
% результатов работы алгоритма
Farr=zeros(1,Nmdl); Darr=zeros(1,Nmdl); Ndelt=zeros(1,Nmdl);
DelFs=zeros(2,Nmdl);
%
global indx
for indx=1:max(size(DeltOpt))
    Darr(1,indx) = delta*h; Ndelt(1,indx) = indx;
    dlt=delta;
    [Tmp DelFs(1,indx)]=ZReska;
    Farr(1,indx) = Zopt;
    DelFs(2,indx)=ZGetValue(p, 'Fsr', dlt)*h^2/tan(alpha);
end;
ZPlot(Darr, Ndelt, Farr, DelFs);

```


Листинг №3.9. Процедура, отображающая результаты моделирования работы алгоритма оптимизации зазора (ZPlot).

```
function ZPlot(Darr, Ndelt, Farr, DelFs, OneGraph);
% График усилия и найденный минимум (2 последние штуки)
global h DFS DeltOpt DeltF Ddeltai deltamax delta indx
detla_=delta;
ds=0:h*Ddeltai:deltamax;
for i=1:max(size(ds))
    delta=ds(i)/h;    [Tmp FFs(1,i)] = ZReska;
end;
if DeltOpt(1)~=DeltOpt(end) | DeltF(1)~=DeltF(end)
indx=1;
for i=1:max(size(ds))
    delta=ds(i)/h;    [Tmp FFs(2,i)] = ZReska;
end;
end;
figure;
subplot(2,1,1);
plot(ds, FFs); hold on
plot(Darr, Farr, 'xk');
plot(Darr(end-1:end), Farr(end-1:end), 'or');
plot(Darr(1), Farr(1), 'og');
plot(ds, FFs);
% График поиска (ось абсцисс -- delta; ось ординат -- шаг)
subplot(2,1,2);
plot(Darr, Ndelt);
axis([ds(1), max(ds), 1, max(Ndelt)]);
hold on
if nargin <5
    figure;
    plot(Ndelt, Darr, '-'); hold on
    plot(Ndelt, 0.045*h+DeltOpt*h, 'r');
    legend('Установленный зазор', 'Оптимальный зазор')
    figure;
    plot(DelFs(1, :), 'r'); hold on
    plot(DelFs(2, :), 'k:');
    legend('Измеренное усилие', 'Усреднённое усилие')
    figure;
    Tmp=100*(DelFs(2, :)-DelFs(1, :))./DelFs(1, :);
    plot(Tmp, 'r');
end;
delta=detla_;
```

Листинг №3.10. Процедура оптимизации закона управления (optz).

```
function [answx, answw]=optz;
global X X0 X1 Xmin Xmax dXmin dXmax dt
global n m
global I1 I xi v vi Xi
global i1 i2 i0 i3
I0=m+1:n-1;    % Исходный список индексов, подлежащих расчёту
ik = max(size(I0));
I1 = I0(round(ik/2)); % Список индексов, обсчитываемых в текщем цикле, в
                    % порядке возрастания
I = I1; % Список индексов, обсчитываемых в текщем цикле, в
        % порядке обсчёта
I0(round(ik/2))=[]; % Удаление индекса из списка индексов, подлежащих
                  % обсчёту в последующих циклах
EndOfCalcs = 0; % Разрешить расчёт оптимального значения
```

```

while(EndOfCalcs==0)
    if isempty(I0)      % Если список индексов, подлежащих обчёту пуст,
        EndOfCalcs = 1; % то этот цикл расчёта -- последний.
    end;
    for i=I
        if X(i)>Xmax(i)
            X(i)=Xmax(i);
            setili2(i);
            setxs(X(i),i);
        elseif X(i)<Xmin(i)
            X(i)=Xmin(i);
            setili2(i);
            setxs(X(i),i);
        end;
    end;
    Xi=X;
    vi=optfunction;
    % _____
    % Цикл собственно оптимизации
    figure;
    optimize
    plot(I1, Xi(I1), 'rx'); title(vi); hold on
    plot(Xi); pause(0.1);
    % _____
    % Удвоим количество обсчитываемых индексов
    for i=max(size(I1)):-1:2 % Вставим индексы между элементами списка индексов
        k=find(I0>I1(i-1) & I0<I1(i));
        if ~isempty(k)
            ik= ceil(max(size(k)/2));
            I1 = [I1(1:i-1) I0(k(ik)) I1(i:end)];
            I0(k(ik))=[];
        end;
    end;

    k=find(I0<I1(1));      % Вставим индекс в начале списка индексов
    if ~isempty(k)
        ik= round(max(size(k)/2));
        I1 = [I0(k(ik)) I1];
        I0(k(ik))=[];
    end;

    k=find(I0>I1(end));    % Вставим индекс в конце списка индексов
    if ~isempty(k)
        ik= ceil(max(size(k)/2));
        I1 = [I1 I0(k(ik))];
        I0(k(ik))=[];
    end;
    % _____
    I2=fliplr(I1);        % Переставим индексы
    iI=2:2:max(size(I1)); I(iI)=I2(iI/2);
    iI=1:2:max(size(I1)); I(iI)=I1((iI+1)/2);
    disp('****');
end;
% _____
answx=Xi;
if nargout==2
    answw=vi;
end;
%=====
function v=var_xi(x,i);
global X Xmin Xmax I1 m n il i2
X(i)=x;

```

```
setili2(i);
setxs(x,i);
v=optfunction;
%=====
function optimize
global X I I1 xi v vi Xmin Xmax Xi i1 i2 dXmin dXmax dt
global n m Tmpv
TmpX = X; TmpX(1) = TmpX(1)-1;
Tmpv = 10*(abs(vi)+1);
%while(~isequal(TmpX,X))
while(~isequal(TmpX,X) & abs((Tmpv-vi)/vi)>1e-5)
    TmpX=X;
    Tmpv=v;
    for i=I
        setili2(i);
        % Учёт ограничений скорости
        xmin=max([Xmin(1,i), dXmin*(i-i1)*dt+X(1,i1), X(1,i2)-dXmax*(i2-i)*dt]);
        xmax=min([Xmax(1,i), dXmax*(i-i1)*dt+X(1,i1), X(1,i2)-dXmin*(i2-i)*dt]);
        if xmin>xmax
            XXX=strcat('Слишком жёсткие условия [', num2str(xmin), ', ',
                num2str(xmax), ']');
            error(XXX);
        end;
        xi=FindMin('var_xi(x,y(1))', [xmin xmax], i);
        X(1,i)=xi;
        setxs(xi,i);
        v=optfunction;
        if vi>v
            Xi=X; vi=v;
        else
            X=Xi;
        end;
    end;
    hold on
    disp(strcat(sprintf('Значение функционала %g',vi), sprintf(' Число точек
        %g',max(size(I)))));
end;
%=====
function setili2(i)
global i1 i2 I1 m n
l=find(I1==i);
if l==1
    i1=m;
else
    i1=I1(l-1);
end;
if i==I1(end);
    i2=n;
else
    i2=I1(l+1);
end;
%=====
function setxs(x,i)
global X i1 i2
k = (x-X(i1))/(i-i1);
for j=i1+1:i-1
    X(j) = X(i1)+k*(j-i1);
end;
k = (X(i2)-x)/(i2-i);
for j=i+1:i2-1
    X(j) = x+k*(j-i);
end;
```

Листинг №3.11. Процедура отображения результата работы процедуры оптимизации закона управления (PlotOpt).

```
function PlotOpt(X)
global Xmin Xmax dXmin dXmax dt T m n
while(1)
q = input('Введите производную график которой нужно построить');
if isempty(q)
break;
end;
Y=X;
z=m;
for i=1:q
z=z-1;
Y=(Y(2:end)-Y(1:end-1))./dt;
%Y=(Y(8:end)-Y(1:end-7))./(8*dt);
end;
for i=-1:-1:q
z=0;
y=0;
for k=1:max(size(Y)+1)
if k<max(size(Y)+1)
y1=Y(k)*dt;
end;
Y(k)=y;
y=y+y1;
end;
end;
figure
plot(0:dt:(max(size(Y)-1)*dt), Y);
hold on
if z>0
plot((z)*dt:dt:(n-2)*dt, Y((z+1):(n-1)), 'rx');
plot(0:dt:(max(size(Y)-1)*dt), Y);
end;
if q==0
hold on
plot(0:dt:(max(size(Y)-1)*dt), Xmin, 'r--');
plot(0:dt:(max(size(Y)-1)*dt), Xmax, 'r--');
grid on
hold on
elseif q==1
hold on
plot([0 T], [dXmin dXmin], 'r--');
plot([0 T], [dXmax dXmax], 'r--');
grid on
XXX=0.1*(max(Y)-min(Y));
YYY=axis;
axis([YYY(1:2) min(Y)-XXX max(Y)+XXX ]);
elseif q==2
grid on
end;
end;
end;
```

П1.4. Листинги к четвёртой главе

Ниже приводятся скрипты, предназначенные для моделирования и оптимизации режимов работы механизма качания рольганга качающегося.

Листинг №4.1. Скрипт, настраивающий переменные для моделирования рольганга

(rkini).

```
% Скрипт задаёт исходные данные для рольганга качающегося
load PmGRPH
global PmGRPH
global ured ev Jsht Jmb Jred Jprs Jev Jr Jlst Jmmk mv mp
global mev mu dcap kpd L1 L2 mmk mvlst hk
global MN_mk lambd_mk Jd_mk omN_mk
global tr tu tt tp trk trkn tnk
global Blst h
global Dhmin ktp
ured = 24.9; % Передаточное число редуктора механизма качания рольганга
% качающегося
kpd = 0.9; % КПД редуктора
ev = 0.029; % Эксцентриситет эксцентрикового вала
L1 = 2.750; % Расстояние от линии реза до оси эксцентрика
L2 = 3.550; % Длина рольганга между эксцентриком и задней опорой
hk = 0.005; % Расстояние между верхней гранью нижнего ножа и линией
% рольганга
Jsht = 0.238; % Момент инерции шкива тормоза, кг*м^2
Jmb = 0.12; % Момент инерции муфты быстроходной, кг*м^2
Jred = 0.07; % Момент инерции редуктора, кг*м^2
Jprs = 1.2; % Соединение промежуточное, кг*м^2
Jev = 6; % Момент инерции вала эксцентрикового, кг*м^2
Jr = 4.96e5; % Момент инерции рольганга без листа, кг*м^2
mv = 27000; % Масса рольганга и листа, воспринимаемая механизмом качания, кг
mp = 37500; % Полная масса рольганга без листа, кг
mev = 1143; % Масса эксцентрикового вала с бандажом, кг
mu = 0.01; % Приведённый коэффициент трения в подшипниках
dcap = 0.3; % Диаметр цапф подшипника качения
%
% Параметры двигателя
MN_mk = 305; % Номинальный момент двигателя Н*м
lambd_mk = 3.7; % Перегрузочная способность
Jd_mk = 0.638; % Момент инерции ротора двигателя
omN_mk = 940*pi/30; % Номинальная скорость двигателя
%
% Расчёты
mmk = mv+mev; % Масса механизма качания, создающая момент на двигателе
Jmmk = Jsht+Jmb+Jred+Jprs+Jd_mk; % Постоянная составляющая момента инерции
% механизма качания, приведённого к валу двигателя
mlst = 7800*h*Blst*(L1+L2); % Масса листа, находящегося над рольгангом
Jlst = mlst*(L1+L2)^2/3; % Момент инерции листа (принимая, что режутся
% листы длиной L1+L2)
mvlst= mlst*mv/(mp+mlst); % Масса листа, приходящаяся на рольганг.
%
% Режим работы двигателя
tr = 0.3; % Разгон
tu = 0.495; % Установившийся режим
tt = 0.3; % Томожение
tp = 4-2*(tr+tu+tt); % Время паузы во время резки
trkn= 1; % Момент начала работы рольганга
tnk = 4.9; % Момент времени, окончания работы ножиц
% (от начала моделирования ножиц)
Dhmin=0.01; % Запас расстояния между ножом и прокатом
```

```
ktr = 0.009682; % Коэффициент мощности тепловых потерь
X=[0 0 0]; n=2; m=2; dt=1; X1=[0 0];
open_system('RKmodel.mdl')
```

Листинг №4.2. Скрипт, настраивающий переменные для оптимизации режимов работы рольганга (rkiniopt).

```
global X X0 X1 Xmin Xmax dXmin dXmax dt T
global n m l1 RKWastes
X0=[0 0 0]; % Начальные условия
X1=[2*pi 0 0]; % Конечные условия, первый вариант оптимизации
%X1=[0 0 0]; % Конечные условия, второй вариант оптимизации
n = 124 % Количество точек, на которых осуществляется оптимизация
m = 3; % Количество учитываемых производных плюс 1
T= 4; % Длительность оптимизации
dt=T/n; %
% Рассчитаем ограничения
t=0;
Xmin=zeros(1,n+m-1); Xmax=Xmin;
for i=1:n+m-1
    XmYm=RKGetshears(PmGRPH, t);
    if (XmYm(1,2)-h-Dhmin-hk-ylst)*L2/((L1+L2)*ev)<0
        Xmin(i) = acos(1+(XmYm(1,2)-h-Dhmin-hk-ylst)*L2/((L1+L2)*ev));
    else
        Xmin(i) = 0;
    end;
    Xmax(i) = 2*pi-Xmin(i);
    t=t+dt;
end;
180/pi*plot(Xmin, 'r'); hold on
180/pi*plot(Xmax, 'r--');
dXmax= omN_mk/ured; % Ограничения скорости
dXmin= -dXmax;
X=zeros(1, n+m-1);
TmpX0=X0; TmpX1=X1;
for i=1:m
    X(i) = TmpX0(1); X(i+n-1) = TmpX1(1);
    TmpX0=TmpX0(1:end-1)+TmpX0(2:end)*dt;
    TmpX1=TmpX1(1:end-1)+TmpX1(2:end)*dt;
end;
```

Листинг №4.3. Скрипт, вычисляющий положение края рольганга у линии реза (RKGeth).

```
function h = RKGeth(phi);
% Функция рассчитывает положение края рольганга у линии реза
global ev L1 L2 ylst hk
h = (L1+L2)/L2*ev*(cos(phi)-1)+hk+ylst;
```

Листинг №4.4. Скрипт, вычисляющий момент сопротивления валу двигателя от неуравновешенных масс (RKGetMc).

```
function Mc = RKGetMc(phi, ListFailed);
% Функция рассчитывает момент сопротивления на валу двигателя
global mmk dcap mu ev ured kpd mvlst
if ListFailed==0
    % Лист на рольганг ещё не упал
```

```
Mc = -9.8*mmk*ev*sin(phi)/(ured*kpd);
else
% Лист на рольганг уже упал
Mc = -9.8*(mmk+mvlst)*ev*sin(phi)/(ured*kpd);
end;
```

Листинг №4.5. Скрипт, вычисляющий момент инерции, приведённый к валу двигателя вала (RKGetJ).

```
function J = RKGetJ(phi, ListFailed);
% Функция рассчитывает момент инерции механизма качания
global Jmmk ured ev mp L1 L2 Jr Jlst
if ListFailed==0
% Лист на рольганг ещё не упал
Jvar = Jr.*(ev.*sin(phi)).^2./(L2^2-(ev.*cos(phi)).^2);
else
% Лист на рольганг уже упал
Jvar = (Jr+Jlst).*(ev.*sin(phi)).^2./(L2^2-(ev.*cos(phi)).^2);
end;
J = Jmmk+Jvar/ured^2;
```

Листинг №4.6. Скрипт, вычисляющий производную момента инерции по углу поворота эксцентрикового вала (RKGetdJ).

```
function dJ = RKGetdJ(phi, ListFailed);
tol_ = 1e-6;
dJ = (RKGetJ(phi+tol_, ListFailed)-RKGetJ(phi-tol_, ListFailed))/(2*tol_);
```

Листинг №4.7. Скрипт, выдающий значение переменной ножниц в указанный момент времени (RKGetshears).

```
function value=RKGetshears(var, t);
% Функция выдаёт значение переменной var в момент времени t
global alphaGRPH VaGRPH FresGRPH alphGRPH XaGRPH PmXaGRPH
global trkn tnk
T=min([max([trkn+t,0]) tnk]);
T=max(find(var(:,1)<=T));
value=var(T,2:end);
```

Листинг №4.8. Скрипт, вычисляющий значение оптимизируемого функционала (optfunction).

```
function v=optfunction;
global ured ktp
% ured -- передаточное число редуктора
% ktp -- коэффициент потерь
global X n m Xmin Xmax dt
dX = (X(2:end)-X(1:end-1))/dt;
d2X = (dX(2:end)-dX(1:end-1))/dt;
dJ = RKGetdJ(X(1:end-2), 0);
J = RKGetJ(X(1:end-2), 0);
Mc = RKGetMc(X(1:end-2), 0);
Md=-Mc+ured.*d2X.*J+ured.*(dX(1:end-1).^2)/2.*dJ;
v=sqrt(sum(Md.*ured.*dX(1:end-1)+Md.^2*ktp)*dt);
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ДВУХКРИВОШИПНЫХ НОЖНИЦ.

Планы положений и скоростей. Для выполнения кинематического расчёта должны быть заданы следующие параметры механизма: длины звеньев $l_a, l_b, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$ и жёсткий угол β ; координаты $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$ точек крепления кривошипов a и b ; положения кривошипов α_a, α_b и их угловые скорости ω_a и ω_b . Расчётная схема для плана положений приведена на рис. 2.1. Все углы отсчитываются в положительном направлении против часовой стрелки. При расчёте положений звеньев механизма искомыми переменными являются углы наклона звеньев 1–6 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$); координаты точек (шарниров) 1, 2, 3, 4 и 5 ($(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ и (x_5, y_5)) и векторы звеньев $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3, \vec{l}_4, \vec{l}_5$ и \vec{l}_6 .

Введём систему координат xOy . Начало координат выберем в точке O , в которой закреплено коромысло 5. Положение механизма однозначно задаётся углами поворота кривошипов α_a и α_b . Положение механизма можно также задать и какими-либо двумя другими обобщёнными координатами, например, $(\tilde{L}, \tilde{\alpha})$, где \tilde{L} — модуль радиус-вектора точки 3, $\tilde{\alpha}$ — угол его наклона.

Координаты точек (x_1, y_1) и (x_5, y_5) определяются по выражениям

$$x_1 = x_a + l_a \cos \alpha_a; \quad y_1 = y_a + l_a \sin \alpha_a; \quad (2)$$

$$x_5 = x_b + l_b \cos \alpha_b; \quad y_5 = y_b + l_b \sin \alpha_b. \quad (3)$$

Выразим угол наклона $\tilde{\alpha}$ радиус-вектора через его длину \tilde{L} и координаты (x_1, y_1) точки 1.

$$(x_1 - \tilde{L} \cos \tilde{\alpha})^2 + (y_1 - \tilde{L} \sin \tilde{\alpha})^2 = l_1^2;$$

$$x_1^2 - 2x_1 \tilde{L} \cos \tilde{\alpha} + \tilde{L}^2 \cos^2 \tilde{\alpha} + y_1^2 - 2y_1 \tilde{L} \sin \tilde{\alpha} + \tilde{L}^2 \sin^2 \tilde{\alpha} = l_1^2.$$

Обозначив $R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ и подставляя в последнее уравнение, получим

$$\tilde{L}^2 - 2 \cdot (x_1 \cos \tilde{\alpha} + y_1 \sin \tilde{\alpha}) \cdot \tilde{L} - (l_1^2 - R_1^2) = 0.$$

Выразим $\tilde{\alpha}$ через \tilde{L}

$$\tilde{L}^2 - 2 \cdot \left(\frac{x_1}{R_1} \cos \tilde{\alpha} + \frac{y_1}{R_1} \sin \tilde{\alpha} \right) \cdot R_1 \tilde{L} - (l_1^2 - R_1^2) = 0.$$

Обозначив через $\cos \varphi_1 = \frac{x_1}{R_1}$ и $\sin \varphi_1 = \frac{y_1}{R_1}$, получим

$$\tilde{L}^2 - 2(\cos \varphi_1 \cos \tilde{\alpha} + \sin \varphi_1 \sin \tilde{\alpha}) \cdot R_1 \tilde{L} - (l_1^2 - R_1^2) = 0;$$

$$\tilde{L}^2 - 2 \cos(\varphi_1 - \tilde{\alpha}) \cdot R_1 \cdot \tilde{L} - (l_1^2 - R_1^2) = 0,$$

или

$$\cos(\varphi_1 - \tilde{\alpha}) = \frac{\tilde{L}^2 - l_1^2 + R_1^2}{2R_1 \tilde{L}}.$$

Окончательно получаем

$$\tilde{\alpha}(\tilde{L}) = \varphi_1 - \arccos \frac{\tilde{L}^2 - l_1^2 + R_1^2}{2R_1 \tilde{L}}. \quad (4)$$

Знак «−» перед \arccos указывает, что радиус-вектор $\tilde{\mathbf{L}}$ расположен ниже вектора \mathbf{R}_1 ($\angle \tilde{\alpha} \leq \angle \varphi_1$), направленного от начала координат (оси крепления коромысла) до точки (x_1, y_1) , что справедливо для существующих конструкций ножниц.

Величина угла α_1 определяется из равенства

$$l_1 \cos \alpha_1 = -\tilde{L} \cos \tilde{\alpha} + x_1,$$

откуда находим

$$\alpha_1 = \arccos \frac{x_1 - \tilde{L} \cos \tilde{\alpha}(\tilde{L})}{l_1}. \quad (5)$$

Теперь определим α_3 . Для этого найдём по теореме косинусов угол γ

$$l_5^2 = \tilde{L}^2 + l_2^2 - 2\tilde{L}l_2 \cos \gamma,$$

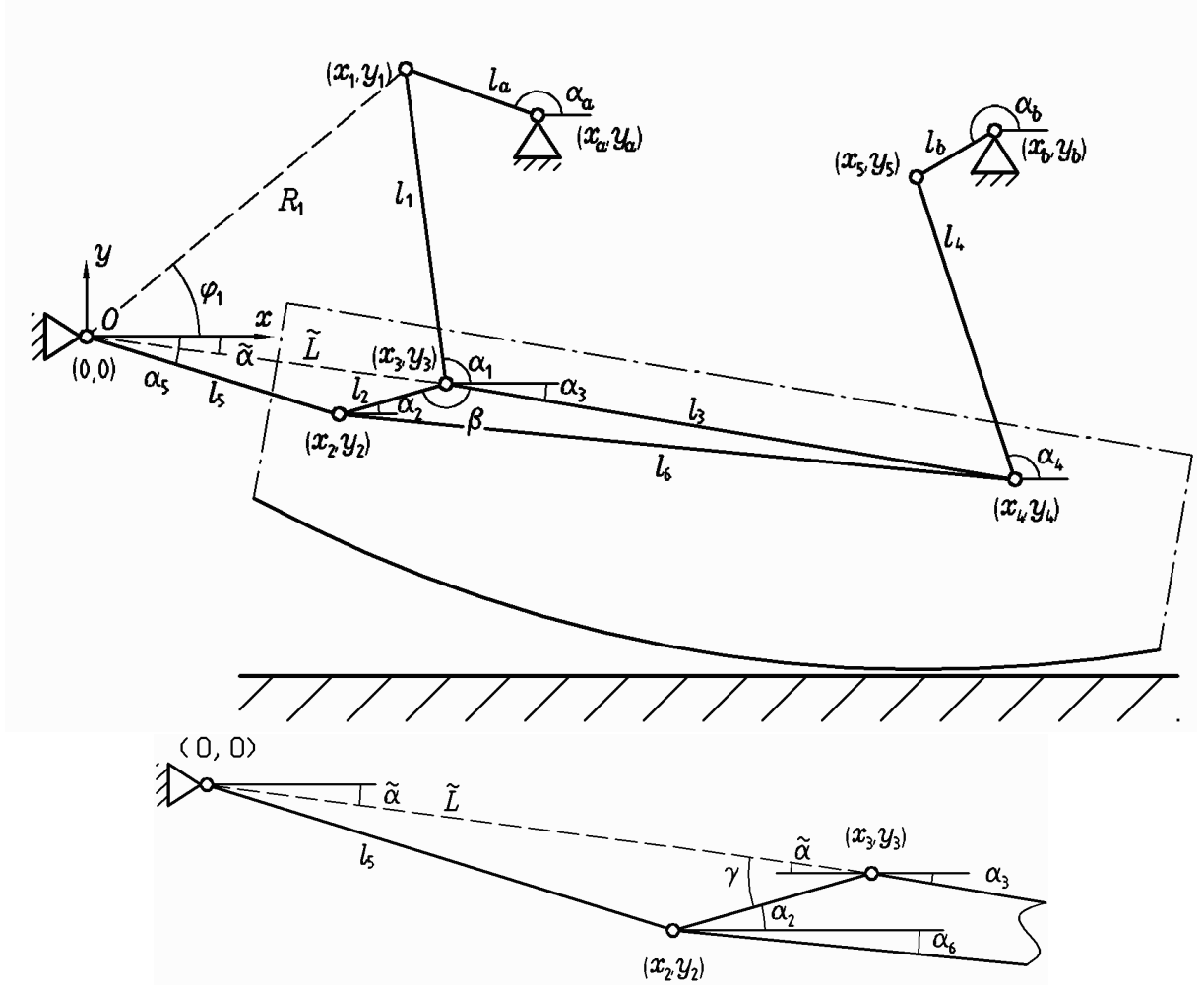


Рис. 1. Кинематическая схема ножниц.

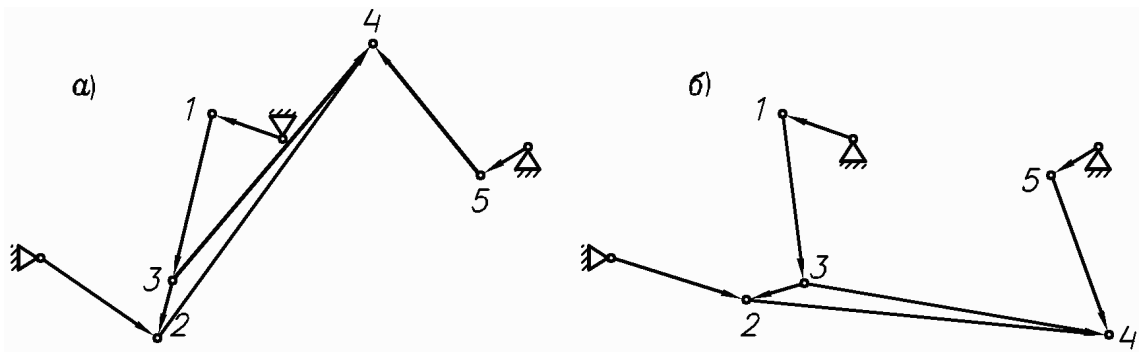


Рис. 2. Варианты расчёта плана положений. Неправильный вариант а и правильный вариант б.

откуда

$$\gamma = \arccos \frac{\tilde{L}^2 + l_2^2 - l_5^2}{2\tilde{L}l_2}. \quad (6)$$

С другой стороны, из геометрических соображений

$$\gamma = 180^\circ - \tilde{\alpha} - \beta + \alpha_3,$$

исходя из чего, найдём

$$\alpha_3(\tilde{L}) = \beta + \tilde{\alpha}(\tilde{L}) - 180^\circ + \arccos \frac{\tilde{L}^2 + l_2^2 - l_5^2}{2\tilde{L}l_2}. \quad (7)$$

Из геометрических соображений найдём

$$\alpha_2 = 180^\circ - \beta + \alpha_3, \quad (8)$$

так как односторонние углы в сумме должны давать 180° .

Определим угол α_5 по теореме синусов

$$\frac{l_2}{\sin(\tilde{\alpha} - \alpha_5)} = \frac{l_5}{\sin \gamma}.$$

Окончательно получим

$$\alpha_5 = \tilde{\alpha}(\tilde{L}) - \arcsin \left(\frac{l_2}{l_5} \sin \gamma \right). \quad (9)$$

Координаты точки (x_2, y_2) определяются выражениями

$$x_2 = l_5 \cos \alpha_5; \quad y_2 = l_5 \sin \alpha_5, \quad (10)$$

а координаты точки (x_3, y_3) — выражениями

$$x_3 = x_2 + l_2 \cos \alpha_2; \quad y_3 = y_2 + l_2 \sin \alpha_2. \quad (11)$$

Координаты точки (x_4, y_4)

$$x_4 = x_3 + l_3 \cos \alpha_3; \quad y_4 = y_3 + l_3 \sin \alpha_3. \quad (12)$$

Найдём угол α_4

$$x_5 - (\tilde{L} \cos \tilde{\alpha} + l_3 \cos \alpha_3) = l_4 \cos \alpha_4,$$

откуда следует

$$\alpha_4 = \arccos \frac{x_5 - \tilde{L} \cos \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \cos \alpha_3(\tilde{L})}{l_4}. \quad (13)$$

Угол α_6

$$\alpha_6 = \arccos \frac{l_2 \cos \alpha_2 + l_3 \cos \alpha_3(\tilde{L})}{l_6}, \quad (14)$$

где

$$l_6 = \sqrt{l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos \beta}.$$

Возможны два подхода к определению \tilde{L} и $\tilde{\alpha}$: аналитический и численный. Аналитический метод трудоёмок, поэтому, искать решение будем численными методами. Для этого надо использовать уравнение связи

$$l_4^2 = [x_5 - (\tilde{L} \cos \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \cos \alpha_3(\tilde{L}))]^2 + [y_5 - (\tilde{L} \sin \tilde{\alpha}(\tilde{L}) + l_3 \sin \alpha_3(\tilde{L}))]^2, \quad (15)$$

подставив вместо $\tilde{\alpha}$ выражение (4), а вместо α_3 — (7). После решения (15) будет найдено значение \tilde{L} , используя которое, можно найти $\tilde{\alpha}$ и остальные искомые переменные.

Перед началом численного решения уравнений следует определить область допустимых значений, в которой может находиться искомое решение. Найдём ОДЗ аргумента \tilde{L} из геометрических соображений. Т. к. сумма длин любых двух сторон треугольника, образованного \tilde{L} , l_2 и l_5 , должна быть меньше длины третьей стороны, то

$$\begin{cases} \tilde{L} \leq l_5 + l_2, \\ l_5 \leq \tilde{L} + l_2, \\ l_2 \leq \tilde{L} + l_5. \end{cases}$$

В более краткой форме выражение примет вид

$$|l_2 - l_5| \leq \tilde{L} \leq l_5 + l_2. \quad (16)$$

Аналогично для треугольника, образованного линиями l_1 , \tilde{L} и R_1

$$\begin{cases} \tilde{L} \leq l_1 + R_1, \\ l_1 \leq \tilde{L} + R_1, \\ R_1 \leq \tilde{L} + l_1, \end{cases}$$

или

$$|l_1 - R_1| \leq \tilde{L} \leq l_1 + R_1. \quad (17)$$

Уравнение (15) может иметь несколько корней, поэтому необходимо ввести дополнительные ограничения. При слишком малом значении \tilde{L} план положений может иметь вид приведённый на рис. 1004.2, *a*. Такое положение реальный механизм занять не может. В действительности при тех же углах поворота кривошипов механизм должен занимать положение аналогичное приведённому на рис. 1004.2, *б*. Оно соответствует большей длине радиус-вектора \tilde{L} . Чем меньше \tilde{L} , тем выше поднимается точка 4. Если пренебречь связью, накладываемой звеном 4, то расстояние между точками 4 и 5 минимально тогда, когда точки 3, 4 и 5 лежат на одной прямой. Естественно, что при этом уравнение (15) не должно удовлетворяться. Очевидно, что значение длины \tilde{L} , которое соответствует реальному положению, должно удовлетворять неравенству

$$\tilde{L}^* \leq \tilde{L}, \quad (18)$$

в котором \tilde{L}^* — значение длины радиус-вектора \tilde{L} , при которой правая часть уравнения (15) минимальна.

Объединив (16), (17) и (18), получаем, что величина \tilde{L} должна находиться в интервале

$$\max(\tilde{L}^*, |l_2 - l_5|, |l_1 - R_1|) \leq \tilde{L} \leq \min(l_2 + l_5, l_1 + R_1). \quad (19)$$

В результате расчёта плана скоростей (расчётная схема приведена на рис. 1004.3) должны быть получены значения линейных скоростей v_1 шарнира 3 (конца шатуна 1), v_5 шарнира 2 (коромысла 5 и концов звеньев 2 и 6) и v_3 шарнира 4 (концов звеньев 3, 6 и шатуна 4); значения линейных скоростей v_a и v_b концов кривошипов *a* и *b* (точек 1 и 5), а также значения угловых скоростей ω_1 и ω_4 шатунов 1 и 4, ω_{23} ножа (звеньев 2, 3 и 6) и ω_5 коромысла (звена 5).

Составим векторные уравнения скоростей

$$\vec{v}_a + \vec{v}_1^a + \vec{v}_2^1 = \vec{v}_5; \quad (20)$$

$$\vec{v}_a + \vec{v}_1^a + \vec{v}_3^1 = \vec{v}_b + \vec{v}_4^b, \quad (21)$$

где v_1^a — скорость движения точки (шарнира) 3 относительно точки 1 (скорость вращения конца шатуна 1 относительно подвижного конца кривошипа *a*); v_2^1 — скорость движения точки 2 относительно точки 3 (вращения конца звена 2 относительно конца шатуна 1); v_3^1 — скорость движения точки 4 относительно точки 3 (скорость вращения конца звена 3 относительно шатуна 1); v_4^b — скорость движения точки 4 относительно точки 5 (вращения конца шатуна 4 относительно кривошипа *b*).

Учитывая, что $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{l} = (-l\omega \sin \alpha; l\omega \cos \alpha)$, где угловая скорость ω положительна, если направление вращения осуществляется против часовой стрелки, а в противном случае — отрицательна, запишем проекции скоростей на оси координат

$$\vec{v}_a = (v_{ax}, v_{ay}) = (-l_a \omega_a \sin \alpha_a, l_a \omega_a \cos \alpha_a); \quad (22)$$

$$\vec{v}_b = (v_{bx}, v_{by}) = (-l_b \omega_b \sin \alpha_b, l_b \omega_b \cos \alpha_b); \quad (23)$$

$$\vec{v}_1^a = (v_{1x}^a, v_{1y}^a) = (-l_1 \omega_1 \sin(\alpha_1 + 180^\circ), l_1 \omega_1 \cos(\alpha_1 + 180^\circ)); \quad (24)$$

$$\vec{v}_2^1 = (v_{2x}^1, v_{2y}^1) = (-l_2 \omega_{23} \sin(\alpha_3 - \beta), l_2 \omega_{23} \cos(\alpha_3 - \beta)); \quad (25)$$

$$\vec{v}_3^1 = (v_{3x}^1, v_{3y}^1) = (-l_3 \omega_{23} \sin \alpha_3, l_3 \omega_{23} \cos \alpha_3); \quad (26)$$

$$\vec{v}_4^b = (v_{4x}^b, v_{4y}^b) = (-l_4 \omega_4 \sin(\alpha_4 + 180^\circ), l_4 \omega_4 \cos(\alpha_4 + 180^\circ)); \quad (27)$$

$$\vec{v}_5 = (v_{5x}, v_{5y}) = (-l_5 \omega_5 \sin \alpha_5, l_5 \omega_5 \cos \alpha_5). \quad (28)$$

Подставив проекции в уравнения для скоростей, получим

$$\begin{cases} -l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_1 \omega_1 \sin(\alpha_1 + \pi) - l_2 \omega_{23} \sin(\alpha_3 - \beta) = -l_5 \omega_5 \sin \alpha_5, \\ l_a \omega_a \cos \alpha_a + l_1 \omega_1 \cos(\alpha_1 + \pi) + l_2 \omega_{23} \cos(\alpha_3 - \beta) = l_5 \omega_5 \cos \alpha_5, \\ -l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_1 \omega_1 \sin(\alpha_1 + \pi) - l_3 \omega_{23} \sin \alpha_3 = -l_b \omega_b \sin \alpha_b - l_4 \omega_4 \sin(\alpha_4 + \pi), \\ l_a \omega_a \cos \alpha_a + l_1 \omega_1 \cos(\alpha_1 + \pi) + l_3 \omega_{23} \cos \alpha_3 = l_b \omega_b \cos \alpha_b + l_4 \omega_4 \cos(\alpha_4 + \pi). \end{cases}$$

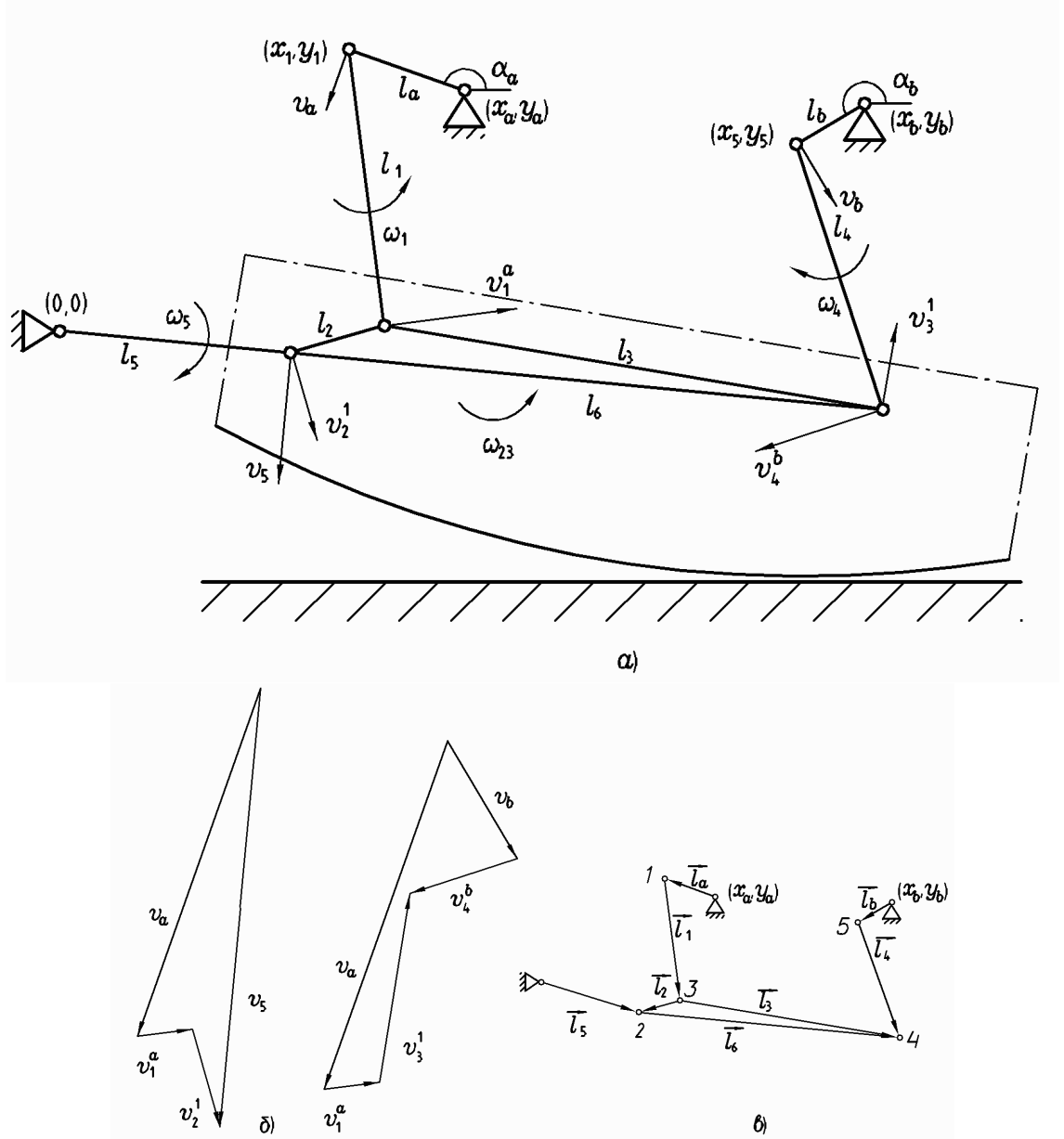


Рис. 3. План скоростей двухкривошипных ножниц. Точки приложения скоростей — a ; векторная диаграмма скоростей — b ; векторы звеньев — c .

В данной системе уравнений неизвестными являются переменные ω_1 , ω_{23} , ω_4 и ω_5 . Перенесём их в левую часть уравнения, а известные (ω_a, ω_b) — в правую.

$$\begin{cases} l_1 \omega_1 \sin(\alpha_1 + \pi) + l_2 \omega_{23} \sin(\alpha_3 - \beta) - l_5 \omega_5 \sin \alpha_5 = -l_a \omega_a \sin \alpha_a, \\ l_1 \omega_1 \cos(\alpha_1 + \pi) + l_2 \omega_{23} \cos(\alpha_3 - \beta) - l_5 \omega_5 \cos \alpha_5 = -l_a \omega_a \cos \alpha_a, \\ l_1 \omega_1 \sin(\alpha_1 + \pi) + l_3 \omega_{23} \sin \alpha_3 - l_4 \omega_4 \sin(\alpha_4 + \pi) = l_b \omega_b \sin \alpha_b - l_a \omega_a \sin \alpha_a, \\ l_1 \omega_1 \cos(\alpha_1 + \pi) + l_3 \omega_{23} \cos \alpha_3 - l_4 \omega_4 \cos(\alpha_4 + \pi) = l_b \omega_b \cos \alpha_b - l_a \omega_a \cos \alpha_a. \end{cases} \quad (29)$$

Запишем эту систему уравнений в матричной форме

$$\begin{pmatrix} l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_2 \sin(\alpha_3 - \beta) & 0 & -l_5 \sin \alpha_5 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_2 \cos(\alpha_3 - \beta) & 0 & -l_5 \cos \alpha_5 \\ l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_3 \sin \alpha_3 & -l_4 \sin(\alpha_4 + \pi) & 0 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_3 \cos \alpha_3 & -l_4 \cos(\alpha_4 + \pi) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_{23} \\ \omega_4 \\ \omega_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ -l_a \omega_a \cos \alpha_a \\ l_b \omega_b \sin \alpha_b - l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ l_b \omega_b \cos \alpha_b - l_a \omega_a \cos \alpha_a \end{pmatrix}. \quad (29^*)$$

Решение данной системы уравнений весьма трудоёмко, поэтому при моделировании оно осуществляется средствами MATLAB. После того, как определены угловые скорости ω_1 , ω_{23} , ω_4 и ω_5 , вычисляются остальные линейные скорости. Скорость v_3 шарнира 4 определяется по формуле

$$\vec{v}_3 = \vec{v}_1 + \vec{v}_3^1,$$

а скорости шарниров 3 и 4 относительно шарнира 2 (концов звеньев 2 и 6 относительно коромысла 5) — по формулам

$$\vec{v}_2^5 = -\vec{\omega}_{23} \times \vec{l}_2; \quad \vec{v}_6^5 = \vec{\omega}_{23} \times \vec{l}_6.$$

Расчёт положений и скоростей центров масс. Расчёт положений центров масс служит для расчёта динамики механизма и расчёта моментов на валах кривошипов от неуравновешенных масс. Шатуны 1, 4 и суппорт верхнего ножа, образованный звеньями 2, 3 и 6, совершают сложное плоскопараллельное движение, и, поэтому, их поведение в динамике можно описать только тогда, когда известны их массы m_1 , m_4 и m_{23} , соответственно, положения центров масс (ЦМ) и моменты инерции относительно ЦМ J_1 , J_4 и J_{23} , соответственно. Звенья механизма a , b и 5 совершают вращательные движения и поэтому при расчёте динамики могут характеризоваться только моментами инерции J_a , J_b и J_5 . Однако, для расчёта моментов от неуравновешенных масс также необходимо знать их массы m_a , m_b и m_5 , а также положения ЦМ. Положения ЦМ плеч 1 и 2 определяются расстояниями l'_1 и l'_4 от точек (x_1, y_1) и (x_5, y_5) , соответственно, и углами отклонения α'_1 и α'_4 от плеч 1 и 4, отсчитываемыми против часовой стрелки рис. 2.2. Положение ЦМ суппорта верхнего ножа (плеча 23) задаётся расстоянием l'_{23} от точки (x_2, y_2) и углом отклонения α'_{23} плеча l'_{23} отсчитываемым против часовой стрелки от l_2 . Положения ЦМ кривошипов a , b и 5 задаются расстояниями l'_a , l'_b , l'_5 и углами α'_a , α'_b и α'_5 .

Определим плечи центров масс

$$\begin{aligned} \vec{l}'_1 &= (l'_1 \cos(\alpha_1 - 180^\circ + \alpha'_1); l'_1 \sin(\alpha_1 - 180^\circ + \alpha'_1)); \\ \vec{l}'_{23} &= (l'_{23} \cos(\alpha_2 + \alpha'_{23}); l'_{23} \sin(\alpha_2 + \alpha'_{23})); \\ \vec{l}'_4 &= (l'_4 \cos(\alpha_4 - 180^\circ + \alpha'_4); l'_4 \sin(\alpha_4 - 180^\circ + \alpha'_4)); \\ \vec{l}'_5 &= (l'_5 \cos(\alpha_5 + \alpha'_5); l'_5 \sin(\alpha_5 + \alpha'_5)); \\ \vec{l}'_a &= (l'_a \cos(\alpha_a + \alpha'_a); l'_a \sin(\alpha_a + \alpha'_a)); \\ \vec{l}'_b &= (l'_b \cos(\alpha_b + \alpha'_b); l'_b \sin(\alpha_b + \alpha'_b)). \end{aligned}$$

Определим положения центров масс

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= (x_1, y_1) + \vec{l}'_1; & \vec{r}_{23} &= (x_2, y_2) + \vec{l}'_{23}; \\ \vec{r}_4 &= (x_5, y_5) + \vec{l}'_4; & \vec{r}_5 &= \vec{l}'_5; \\ \vec{r}_a &= (x_a, y_a) + \vec{l}'_a; & \vec{r}_b &= (x_b, y_b) + \vec{l}'_b. \end{aligned}$$

Абсолютные скорости центров масс определяем исходя из равенств

$$\begin{aligned} \vec{v}'_a &= \vec{\omega}_a \times \vec{l}'_a; & \vec{v}'_b &= \vec{\omega}_b \times \vec{l}'_b; \\ \vec{v}'_1 &= \vec{v}_a + \vec{\omega}_1 \times \vec{l}'_1; & \vec{v}'_{23} &= \vec{v}_5 + \vec{\omega}_{23} \times \vec{l}'_{23}; \\ \vec{v}'_4 &= \vec{v}_b + \vec{\omega}_4 \times \vec{l}'_4; & \vec{v}'_5 &= \vec{\omega}_5 \times \vec{l}'_5. \end{aligned}$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**