

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Галушин С. А., Злобина М. В., Блинов Ю. И., Никаноров А. Н.</i> Современный подход к оптимальному проектированию Hi-Tech электротермических установок	3
<i>Жуков И. Б.</i> Исследование динамики систем управления ножницами поперечной резки листового проката	7
<i>Доан Ань Туан, Коськин Ю. П.</i> Математическая модель линейного асинхронного двигателя при широтно-импульсной модуляции напряжения	15
<i>Дубровин В. А., Коськин Ю. П.</i> Расчет волновых индуктивностей статорных обмоток частотно-управляемых асинхронных двигателей	26
<i>Кекконен А. В.</i> Выбор микропроцессорной техники для электропривода	33
<i>Вейнмейстер А. В., Кузнецов В. Е., Поляхов Н. Д.</i> Наблюдатели состояния для оценки частоты вращения асинхронного электродвигателя	36
<i>Тагиев Р. А.</i> Формирование очередности укладки «деталей» конструкции из армированных композитов	41
<i>Жарковский А. В., Лямкин А. А., Микуленко Н. П., Тревгода Т. Ф.</i> Тестирование функционального программного обеспечения комплексов управления	44
<i>Скороходов Д. А., Стариченков А. Л., Степанов И. В.</i> Методологические основы оценки эффективности системы управления безопасностью судоходной компании	48

Редакционная коллегия:

Г. И. Прокофьев
(председатель),
М. П. Белов
(ответственный за выпуск),
Ю. И. Блинов, Ю. А. Бычков,
А. С. Васильев

Редактор *И. Г. Скачек*
Комп. верстка *Н. Б. Хохлачев*

Подписано в печать 13.07.05 г.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».
Печать: ризограф.
Печ. л. 6,75.
Тираж 100 экз. Заказ 66.

Издательство
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НОЖНИЦАМИ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Приводится математическое описание однокривошипных ножниц с катящимся резом и модель электромеханической системы управления, разработанная для среды Matlab. Показаны динамические процессы, протекающие в электромеханической системе за цикл резки.

Ножницы с катящимся резом, математическая модель, толстолистовой прокат, система управления

В настоящее время для резки листового проката используются ножницы различной конструкции: гильотинные, двухкривошипные с «катящимся резом» и др. Перспективной является новая однокривошипная конструкция ножниц, разработанная в «НИиПКИМет-маш», которая обеспечивает такое же высокое качество реза, как и двухкривошипные ножницы, и вместе с тем обладает значительно более простой кинематикой. Впервые ножницы данной конструкции были спроектированы и изготовлены в 2000 г. для ОАО «Носта». Как показал опыт эксплуатации, двигатели главного привода были выбраны с завышением. Экономически оправданный выбор двигателей можно обеспечить только на основе исследований динамических процессов в системе управления электроприводом, которые могут быть выполнены, в частности, на компьютерной модели ножниц.

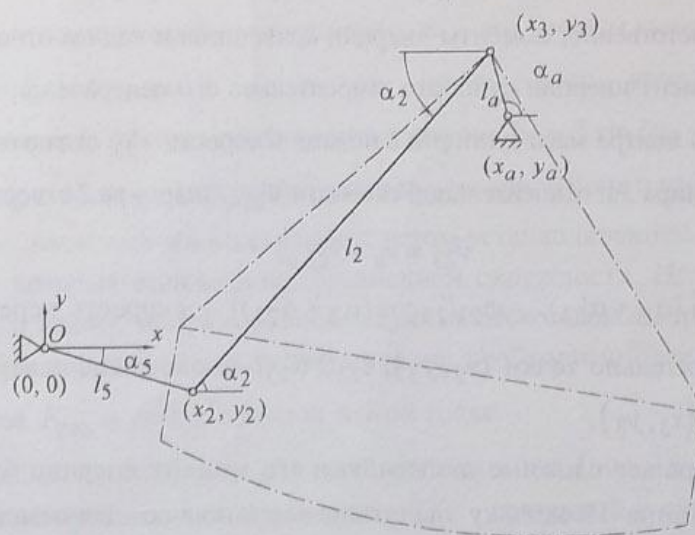


Рис. 1

Приведём математическое описание ножниц, использованное при разработке модели для пакета Matlab. Расчётная схема для кинематического расчёта приведена на рис. 1. Введём систему координат xOy с началом координат в точке O оси водила 5. Рассчитать положения всех звеньев механизма [1] можно по формулам

$$\begin{aligned}
x_3 &= x_a + l_a \cos \alpha_a; \\
y_3 &= y_a + l_a \sin \alpha_a; \\
\alpha_5 &= \operatorname{arctg} \frac{y_3}{x_3} - \arccos \frac{x_3^2 + y_3^2 + l_5^2 - l_2^2}{2l_5 \sqrt{x_3^2 + y_3^2}}; \\
x_2 &= l_5 \cos \alpha_5; \\
y_2 &= l_5 \sin \alpha_5; \\
\alpha_2 &= \arccos \frac{x_3 - x_2}{l_2}.
\end{aligned}$$

Для расчёта динамики ножиц необходимо определить скорости всех звеньев механизма (рис. 2), воспользовавшись следующими формулами:

$$\begin{aligned}
\bar{v}_a &= (-l_a \omega_a \sin \alpha_a; l_a \omega_a \cos \alpha_a); \\
\omega_{23} &= \frac{l_a \omega_a (\sin \alpha_a \cdot \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_a)}{l_2 (\sin \alpha_2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_5 - \cos \alpha_2)}; \\
\omega_5 &= \frac{l_a \omega_a \sin \alpha_a - l_2 \omega_{23} \sin \alpha_2}{l_5 \sin \alpha_5}; \\
\bar{v}_2 &= \bar{\omega}_5 \times (x_2, y_2).
\end{aligned}$$

Приведённый к валу двигателя момент инерции можно рассчитать по формуле

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

Здесь J_a , J_5 – соответственно, моменты инерции кривошипа и водила относительно осей их крепления; J_{23} – момент инерции суппорта относительно его центра масс; m_{23} – масса суппорта; v'_{23} – скорость центра масс суппорта с ножом. Скорость v'_{23} складывается из переносной скорости v_a шарнира 3 и относительной скорости $v'_{23 a}$ шарнира 2 относительно точки 3:

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

где $\bar{v}'_{23 a} = [\omega_{23} l'_{23} \sin (\alpha_2 + \alpha'_{23}); -\omega_{23} l'_{23} \cos (\alpha_2 + \alpha'_{23})]$ – скорость перемещения центра масс суппорта относительно точки (x_3, y_3) ; l'_{23} , α'_{23} – положение центра масс суппорта относительно точки (x_3, y_3) .

Механизм совершает сложные движения, и его момент инерции будет зависеть от угла поворота кривошипа. Поскольку аналитические выкладки для отыскания $\partial J_{\text{пр}} / \partial \alpha_a$ трудоёмки, определять эту величину будем приближенно по формуле

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

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

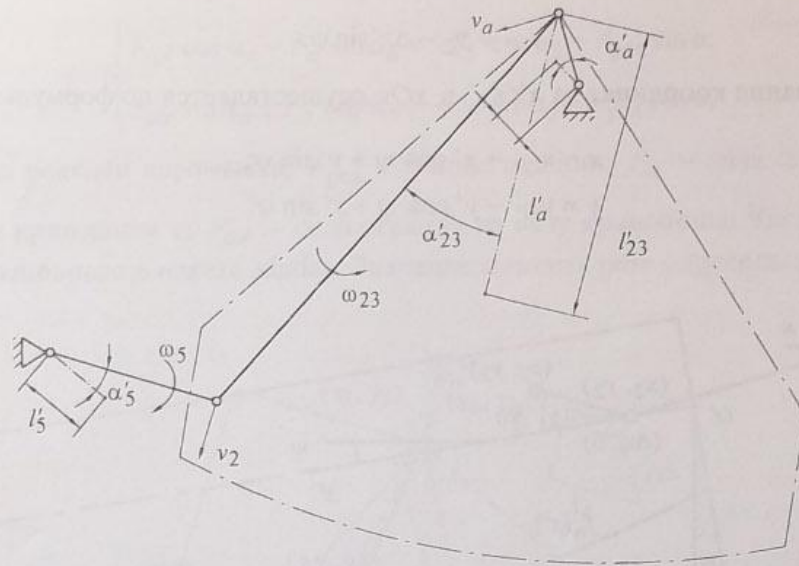


Рис. 2

В ножницах с катящимся резом момент от неуравновешенных масс может составлять значительную часть от общего момента, развиваемого двигателем, поэтому целесообразно его учитывать при моделировании. Рассчитать его можно по формуле

$$M_n \approx g \left(m_a \frac{h_a(\alpha_a + \Delta\alpha_a) - h_a(\alpha_a)}{\Delta\alpha_a} + m_{23} \frac{h_{23}(\alpha_a + \Delta\alpha_a) - h_{23}(\alpha_a)}{\Delta\alpha_a} + m_5 \frac{h_5(\alpha_a + \Delta\alpha_a) - h_5(\alpha_a)}{\Delta\alpha_a} \right),$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; m_a, m_5 – массы кривошипа и водила соответственно; $h_a = l'_a \sin(\alpha_a + \alpha'_a)$ – высота центра масс кривошипа; $h_{23} = -l'_{23} \times \sin(\alpha_2 + \alpha'_{23})$ – высота центра масс суппорта с ножом; $h_5 = l'_5 \sin(\alpha_5 + \alpha'_5)$ – высота центра масс водила; l'_a, α'_a и l'_5, α'_5 – положения центров масс кривошипа и водила соответственно.

Как правило, на ножницах с катящимся резом устанавливаются дугообразные ножи, режущая кромка которых описывается уравнением окружности. Но в ряде случаев нож может иметь иную форму, например, состоящую из нескольких сопряженных дуг окружности [2]. При моделировании для расчёта усилия необходимо определить точку F приложения силы реза $F_{\text{рез}}$ и угол резания α в этой точке.

Кривая, описывающая форму режущей кромки ножа (рис. 3), задаётся уравнением $y' = f_n(x')$ в подвижной системе координат $x'O'y'$, связанной с суппортом. Положение системы координат $x'O'y'$ задаётся углом φ_0 , отсчитываемым от плеча l_2 до оси $O'x'$, и смещением $\Delta x'$ начала координат O' относительно точки (x_2, y_2) . При этом оси Ox и Oy образуют с осями $O'x'$ и $O'y'$ угол ψ .

Начало подвижной системы координат находится в точке

$$x_{O'} = x_2 - \Delta x' \cos \psi;$$

$$y_{O'} = y_2 - \Delta x' \sin \psi.$$

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

$$x = x_{O'} + x' \cos \psi + y' \sin \psi;$$

$$y = y_{O'} - y' \cos \psi + x' \sin \psi.$$

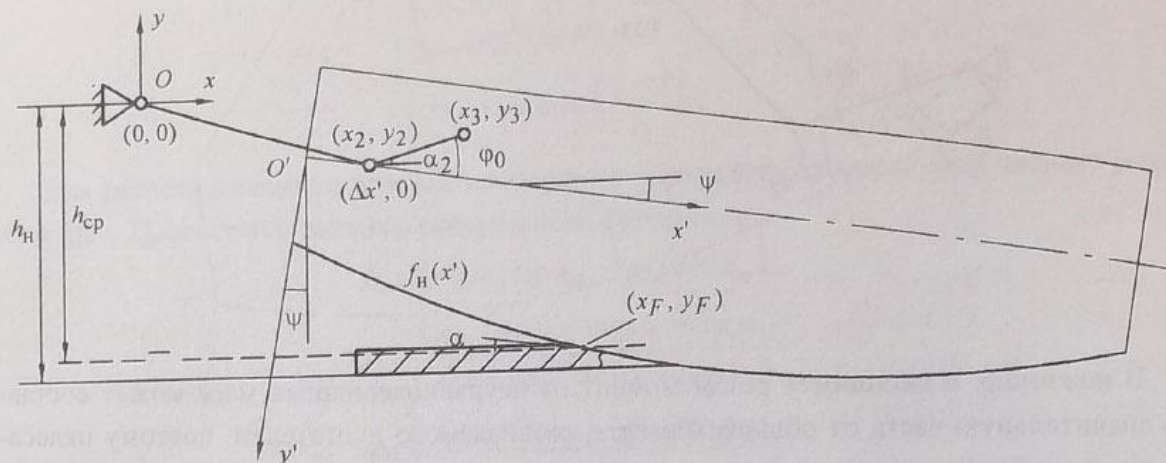


Рис. 3

Точка F с координатами (x_F, y_F) , к которой приложена сила реза, находится в точке пересечения прямой, параллельной Ox , расположенной на высоте реза h_{cp} и линии $y' = f_n(x')$ (кромки ножа). Величина h_{cp} определяется, как:

$$h_{cp} = h_n + h \left(1 - \frac{\epsilon_{отр}}{2} \right),$$

где h_n – положение нижнего ножа относительно оси коромысла; h – толщина листа; $\epsilon_{отр}$ – относительное углубление ножа в металл до скалывания по всему сечению.

Так как линия, расположенная на высоте h_{cp} , и линия режущей кромки ножа описаны в разных системах координат, необходимо их привести в единую систему координат. Проще всего это сделать с прямой, уравнение которой в $x'O'y'$ имеет вид

$$y'_p = \frac{h_{cp}}{\cos \psi} + x' \operatorname{tg} \psi.$$

В общем случае, в результате решения уравнения $y'_p(x') = f_n(x')$ могут появиться два корня. Физический смысл будет иметь только одно решение. В случае поворота ножа по часовой стрелке – наибольшее из них, а в случае поворота против часовой – наименьшее. При моделировании решение этого уравнения искалось приближенными методами. Угол реза можно найти по выражению

$$\alpha = \psi - \operatorname{arctg} \left. \frac{df_n}{dx'} \right|_{x'=x'_F}$$

Чтобы определить создаваемый силой реза $F_{рез}$ крутящий момент $M_{рез}$ на кривошипном валу (рис. 4), нужно решить относительно F_a и $F_{a,r}$ систему уравнений

$$\begin{cases} F_{ar} \cos \alpha_a - F_a \sin \alpha_a = -F_5 \cos \alpha_5 + F_{рез} \sin \alpha; \\ F_{ar} \sin \alpha_a + F_a \cos \alpha_a = -F_5 \sin \alpha_5 - F_{рез} \cos \alpha, \end{cases}$$

где F_5 – сила реакции коромысла; $F_{рез}$ – усилие резания; F_a – сила от крутящего момента на валу кривошипа a ; F_{ar} – сила реакции на валу кривошипа. Численное решение может быть выполнено в пакете Matlab. Значение момента реза определяется выражением $M_{рез} = F_a \cdot l_a$.

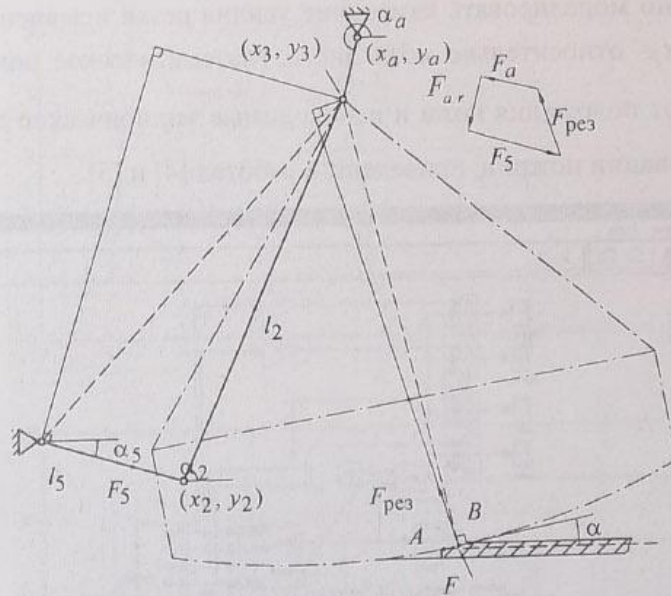


Рис. 4

Реакцию водила можно найти по формуле

$$F_5 = -F_{рез} \frac{m'_{рез}}{m'_5},$$

где $m'_{рез} = (-\sin \alpha, \cos \alpha) \times (x_F - x_3, y_F - y_3)$ – момент, создаваемый единичной силой резания относительно точки (x_3, y_3) ; $m'_5 = (\cos \alpha_5, \sin \alpha_5) \times (x_2 - x_3, y_2 - y_3)$ – момент, создаваемый единичной реакцией водила 5 относительно точки (x_3, y_3) .

Максимальное значение усилия реза можно определить по приведённой в [3] формуле

$$F_{max} = 1,2 K_{ЭП} \frac{h^2 \cdot \epsilon_{отр}}{\operatorname{tg} \alpha} \tau_{max} + z \sigma_B h^2,$$

где 1,2 – коэффициент, учитывающий притупление ножей; $K_{ЭП}$ – коэффициент, зависящий от угла наклона ножей; τ_{max} – максимальное удельное сопротивление резанию; z – коэффициент, зависящий от длины отрезаемой части листа, пластических свойств разрезаемого металла и угла наклона ножа, также определяется по графику; σ_B – предел прочности разрезаемого металла при растяжении.

Усилие реза [4] зависит от положения ножа относительно позиции ножа в момент начала реза. Вначале внедрения наклонных ножей в лист усилие резания пропорционально ходу ножа. По мере внедрения ножей в материале, с одной стороны, зарождается тре-

щина, способствующая быстрейшему разрушению, с другой стороны, материал упрочняется, что препятствует распространению трещины и разрушению листа. С ростом трещины интенсивность роста силы резания, возникающей в системе «нож-лист», падает. Сила резания изменяется по некоторой параболической кривой, возрастая до максимального значения, а затем падает до величины, которая в дальнейшем остаётся постоянной. Резание приобретает характер установившегося процесса. С момента выхода трещины из разрезаемого листа начинается быстрое падение силы резания. Точное моделирование процесса резки – достаточно сложная задача. Вместе с тем, для анализа работы системы управления достаточно моделировать изменение усилия резки в зависимости от положения точки резания x_F относительно края листа. Математическое описание изменения $F_{рез}$ в зависимости от положения ножа и необходимые эмпирические данные, использованные при моделировании ножниц, приведены в работах [4] и [5].

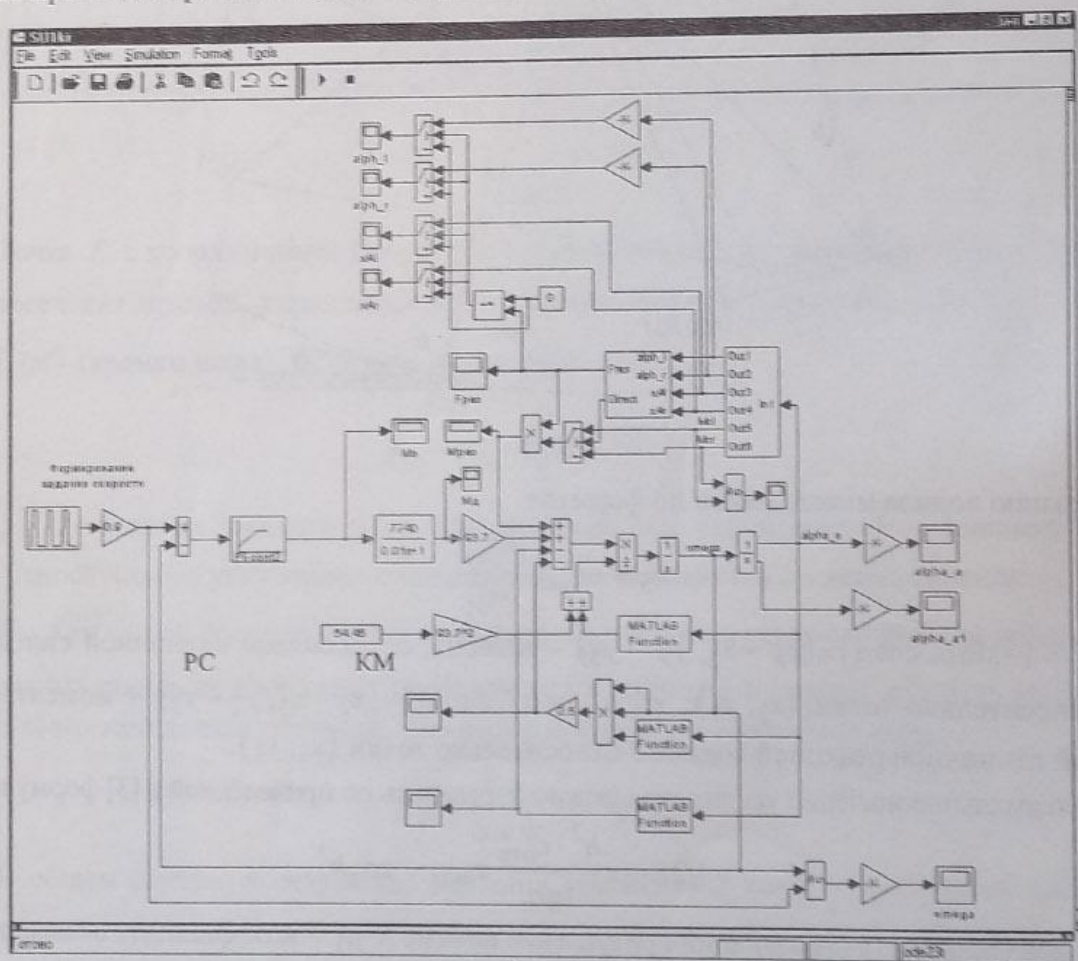


Рис. 5

По разработанному математическому описанию была составлена модель для пакета Matlab. Процесс моделирования состоит из трёх этапов: на первом этапе загружается скрипт, в котором описаны кинематические параметры механизма резания, а также данные о моментах инерции и массах отдельных элементов; на втором – осуществляется расчёт для разных положений кривошипа a приведённого момента инерции, момента от не-

уравновешенных масс, положения ножа, отношения $M_{рез}$ к $F_{рез}$ и пр.; на третьем – моделируется цикл резки на основе рассчитанных ранее данных.

Модель системы управления и механической части ножниц изображена на рис. 5, где обозначены: РС – регулятор скорости; КМ – замкнутый контур момента, на входе которого стоит ограничение максимальной перегрузки ($\pm 2,5$).

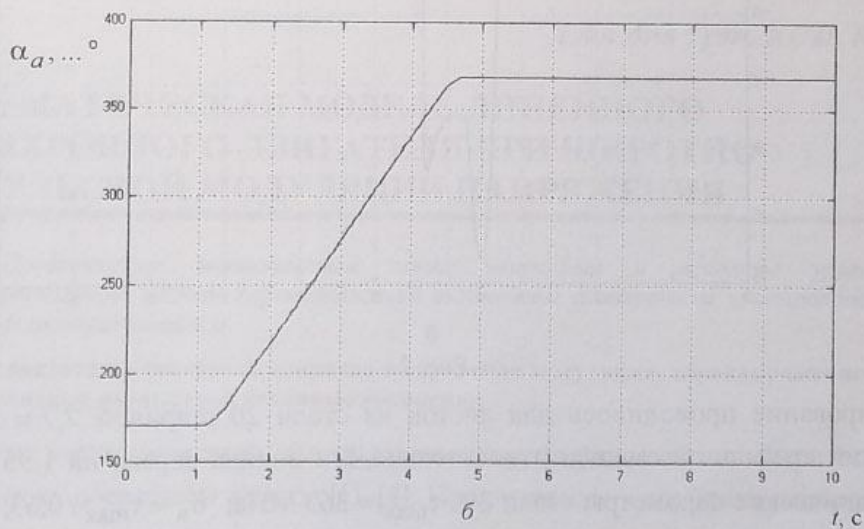
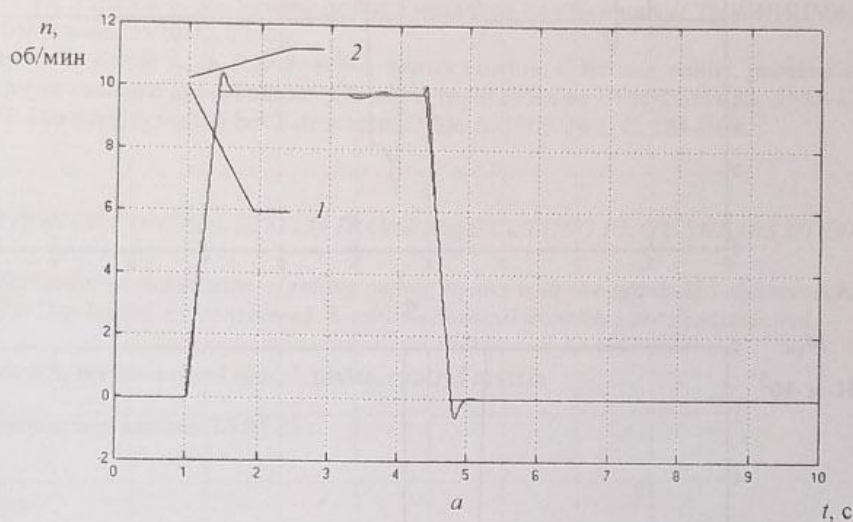


Рис. 6

Кинематические данные механизма: $l_a = 138,3$ мм; $l_2 = 2922$ мм; $l_5 = 1003$ мм; $x_a = 3,33$ м; $y_a = 1,655$ 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; $J_5 = 3454$ кг·м². Положения центров масс звеньев: $l'_{23} = 1,1$; $\alpha'_{23} = 20^\circ 30'$; $l'_5 = l_5 / 2$; $\alpha'_5 = 0^\circ$; $l'_a = l_a$; $\alpha'_a = 0^\circ$. Радиус ножа 48,59 м; система координат смещена относительно точки (x_2, y_2) на $\Delta x = -0,953$ м и угол $\varphi_0 = 36^\circ 26'$.

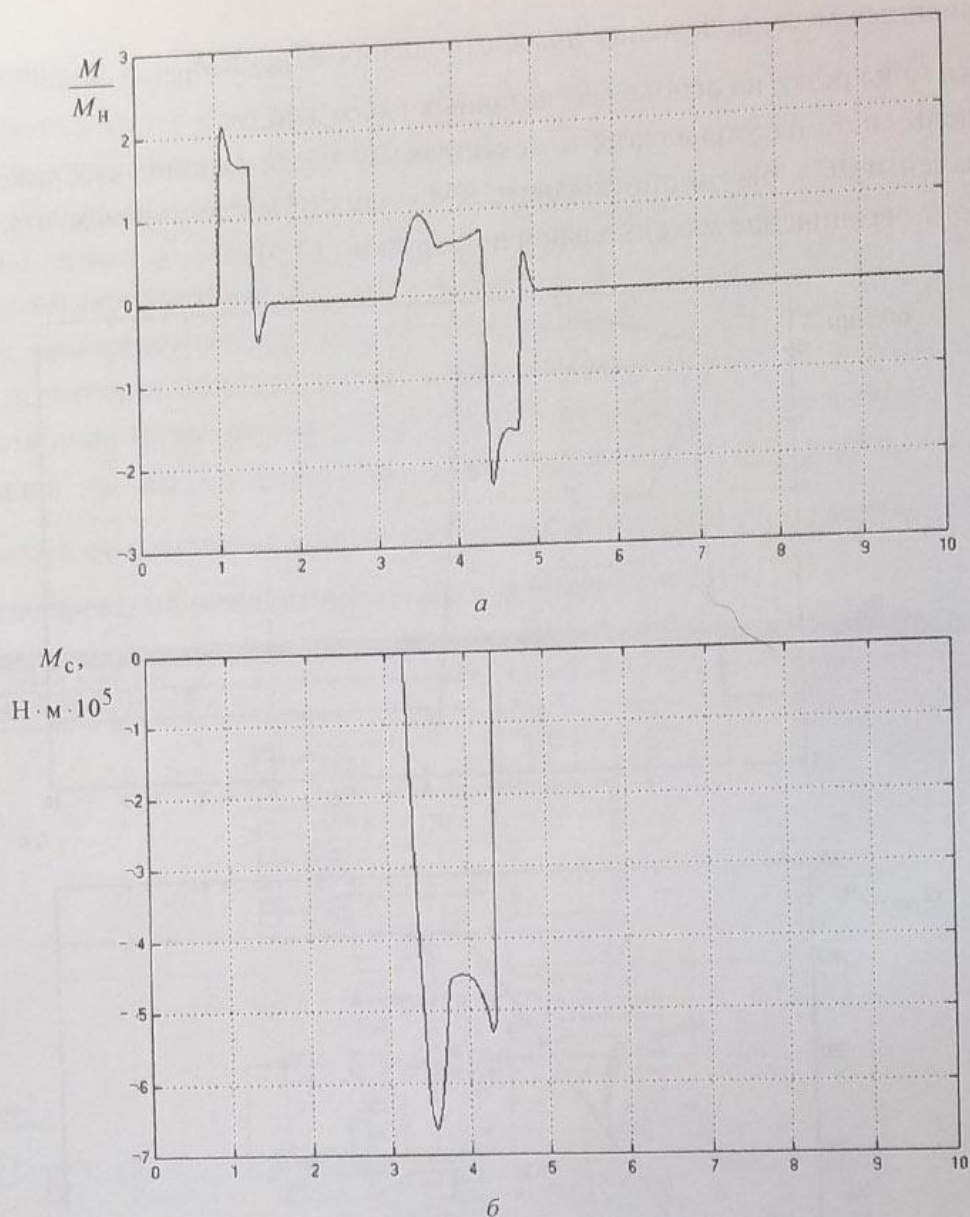


Рис. 7

Моделирование проводилось для листов из стали 20 шириной 2,7 м и толщиной 50 мм. Нижний край листа смещён относительно оси водила вправо на 1,95 м и вниз на 395 мм. Механические параметры стали 20: $\tau_{\max} = 363$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = \tau_{\max} / 0,63$; $\varepsilon_{\text{отр}} = 0,35$. Для длинных отрезаемых листов значение коэффициента $z = 0,95$. Коэффициент $K_{\text{ЭП}}$ определяется по формуле

$$K_{\text{ЭП}} = \begin{cases} 0,7 & \text{при } \alpha > 2^\circ; \\ 1 - 0,075\alpha^2 & \text{при } \alpha \leq 2^\circ, \end{cases}$$

где α – угол реза, выраженный в градусах.

Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7. Заданная скорость l кривошипного вала и отработка задания 2 приведены на рис. 6, а; угол поворота кривошипного вала α_a – на рис. 6, б; момент двигателя M в единицах номинального момента M_H – на рис. 7, а; момент сопротивления на кривошипном валу M_C – на рис. 7, б.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков И. Б., Зементов О. И. Математическое описание уравнений кинематики ножниц с катящимся резом в задачах энергосберегающего управления // Электромеханические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. С. И. Лукьянова, Д. В. Швидченко. Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. Вып. 8. С. 73–79.
2. Бойденко Н. Г., Капота В. П., Панюхно В. Я. Профилирование инструмента ножниц с катящимся резом // Прогрессивные технологии и машины для отделки прокатного производства: Сб. науч. тр. М.: Изд-во ВНИИМетмаш, 1986. С. 47–53.
3. Крылов Н. И., Тарасов Б. М. Усилия резания металлов на ножницах // Тр. ВНИИМетмаш. Сб. № 27. М.: Изд-во ВНИИМетмаш, 1970. С. 67–76.
4. Адамович Р. А., Калле А. Э. Расчёт гильотинных ножниц // Исследование, расчёты и конструирование машин металлургического производства: Сб. науч. тр. М.: Изд-во ВНИИМетмаш, 1980. С. 11–14.
5. Sperling H. Die Schnittgwalitat bei Tafelscheren // Blech. 1968. № 4. С. 164–169.

I. B. Zhukov

THE INVESTIGATION OF CONTROL SYSTEM TRANSVERSE CUTTING PLATE SHEARS DYNAMIC

Mathematical description of rolling cutting shears with one crank and electromechanical control system model are considered. Electromechanical transients are demonstrated.

Rolling cutting shears, mathematical model, plates, control system

Статья поступила в редакцию 25.05.05 г.

УДК 621.313.39

Доан Ань Туан, Ю. П. Коськин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены эквивалентная схема замещения и основные уравнения, обеспечивающие расчет перенапряжений в линейном асинхронном электроприводе с ШИМ-преобразователем.

Асинхронный двигатель, линейный, широтно-импульсная модуляция, перенапряжения, схема замещения, волновые параметры, основные уравнения

Вопросам математического моделирования перенапряжений в электрических машинах переменного тока посвящены работы [1]–[4]. Предлагаемые в опубликованных трудах модели основываются на использовании теории длинных линий или цепных схем с распределенными параметрами [2], [3]. Имеются указания о необходимости учета междуфазных взаимно индуктивных и емкостных связей [3]. Но фактически эти указания в известных публикациях не реализованы как для обычных, так и линейных асинхронных двигателей (ЛАД).

В данной статье разработка модели и учет взаимно индуктивных связей осуществляются при следующих основных допущениях:

- Считается, что преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией (ПЧ ШИМ) формирует на входе ЛАД трехфазную систему напряжений, образующуюся из трапецеидальных импульсов.
- Соединительный кабель между ПЧ ШИМ и ЛАД рассматривается как однородная длинная линия.