

*Петров П.А.,
к.т.н. Полилов Е.В., к.т.н. Морозов Д.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ДИНАМИКА УСИЛИЙ И МОМЕНТОВ РЕЗАНИЯ СОРТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА В ГОРЯЧЕМ СТОЯНИИ

Представлені експериментальні дослідження динаміки приводів дискової пили; отриманий момент і зусилля різання, використані для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі.

Ключові слова: *момент електромагнітний, момент різання, опір різанню, пила дискова, швидкість деформації.*

Представлены экспериментальные исследования динамики приводов дисковой пилы; получены момент и усилие резания, использованные для подтверждения адекватности разработанной математической модели.

Ключевые слова: *момент электромагнитный, момент резания, сопротивление резанию, пила дисковая, скорость деформации.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Традиционно усилия и мощность резания дисковыми пилами определялись через удельную работу резания, величина которой, главным образом, зависит от механических свойств разрезаемого металла и требует определения на основании опытных данных [1]. Согласно рекомендаций ряда исследователей окружное усилие резания предлагается определять по методике [2,3], зависящей от эмпирических коэффициентов и геометрических параметров процесса резания, в которой основным критерием, является удельное сопротивление резанию q , представляемое эмпирическими зависимостями толщины стружки, приходящейся на один зуб, и ширины фаски затупления задней грани зубьев диска, что позволяет упростить проведение инженерных расчетов, однако исключает возможность учета механических свойств разрезаемого материала.

Анализ последних достижений и публикаций.

Экспериментальное измерение силовых параметров резания большинство исследователей проводили с помощью динамометрической установки, закрепленной перед стационарной салазковой [4] (роторной [5]) пилой, по нормали к траектории движения диска, позволяющей регистрировать составляющие усилия резания, действующие по

трем ортогональным плоскостям. Процесс резания четырехзвенной дисковой пилой характеризуется отличными от указанных типов пилы: траекторией движения режущего инструмента; скоростью резания (по отношению к роторным пилам); невозможностью закрепления заготовки перпендикулярно вектору скорости подачи. Попытки установки силоизмерительного динамометра на цилиндрической, шарнирной опоре предпринятые в [6] не получили дальнейшего распространения. Поэтому исследование динамики электропривода [7], является наиболее рациональным методом экспериментального определения силовых параметров резания при оценке адекватности математического моделирования пилы как простой, так и сложной кинематики.

Постановка задачи. Целью представленной работы является экспериментальное исследование динамики привода механизма вращения диска и механизма подачи четырехзвенной дисковой пилы горячей резки (ПГР) стана 600 ОАО “Алчевский металлургический комбинат”; определение момента сопротивления и усилия резания фланцевого профиля и квадрата.

Изложение материала и его результаты. Для достижения указанной цели использовалась система регистрации электрических процессов и событий электроприводов линии стана [8], способная фиксировать текущие параметры электропривода в реальном масштабе времени.

В эксперименте получены реальные процессы в электроприводах вращения диска и механизма подачи пилы на рез. Измеряемыми параметрами являлись: токи и напряжения в статорных обмотках асинхронной машины привода вращения диска, якорные ток и напряжение электродвигателя постоянного тока механизма подачи. Эксперимент проводился на ПГР №1, расположенной в здании пил стана 600, геометрические параметры диска $\varnothing 1800$ мм и его режущей части указаны в [9], окружная скорость $v=92,36$ м/с, скорость подачи $v_{\text{п}}$ изменялась в зависимости от разрезаемого типа профиля, материал – сталь 3пс, температура – $760 \div 800^{\circ}\text{C}$ (квадрат 125×125 мм), $460 \div 580^{\circ}\text{C}$ (швеллер №16), температура измерялась пирометром Термоскоп 100-НТ-ВР, с рабочим диапазоном от -20°C до $+800^{\circ}\text{C}$.

В машзале непосредственно у релейно–контакторных панелей управления (главного щита) ПГР №1 была собрана измерительная часть установки. Токи статора асинхронного двигателя измерялись трансформаторами тока ТК–20 600А/5А с шунтами 5А/75мВ, а напряжения – измерительными трансформаторами напряжения 220В/5В. Сигналы с шунтов и трансформаторов напряжения подавались на датчики напряжения ($k_{\text{ш}}=100$ и $k_{\text{т}}=1$ соответственно) с целью гальванической изоляции силовых цепей от низковольтных, а также нормирования сигналов к уровню ± 10 В, и далее на плату АЦП. В приводе механизма подачи ком-

мутация производилась от комплектного тиристорного преобразователя, питающего приводной электродвигатель; в преобразователе, собственно, и установлены соответствующие датчики напряжения и тока якорной цепи, сигналы с которых, также подавались на плату АЦП. В ходе эксперимента все сигналы оцифровывались с частотой 7,5 кГц (шаг дискретизации 0,13мс) и в виде массивов данных сохранялись на жёстком диске ПК отдельными файлами.

Известно, что для машины постоянного тока момент электромагнитный пропорционален току в якорной цепи, а скорость – электродвижущей силе (рисунок 1,а, 3,а). Для расчета электромагнитного момента асинхронных двигателей необходимо рассматривать активную составляющую потребляемого тока. Активная составляющая тока определялась векторным способом – как проекция обобщенного вектора тока статора на обобщенный вектор питающего напряжения.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя обуславливается только *активной* составляющей тока и по экспериментальным данным вычислялся по формуле:

$$M_e = \frac{U_s}{\omega_0} I_s \cos \varphi, \quad (1)$$

где U_s , I_s – модули обобщенных векторов напряжения и тока статора;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током фаз статора;

ω_0 – скорость холостого хода двигателя.

Графики изменения электромагнитного момента M_e привода вращения диска за время резания квадрата 125x125мм и швеллера №16 представлены соответственно на рисунках 2,а и 4,а.

С точки зрения механики, интерес представляют окружное F_t и радиальное F_r усилия в очаге резания, и момент сопротивления резанию M_c , который возможно определить исходя из электромагнитного момента двигателя вращения пилы. Механическую систему привода вращения пилы представим односоставной, полагая механические связи абсолютно жесткими с эквивалентной массой и моментом инерции J_Σ , что можно сделать, учитывая наличие в трансмиссии жесткой муфты, и расположенность масс вдоль оси ротора двигателя.

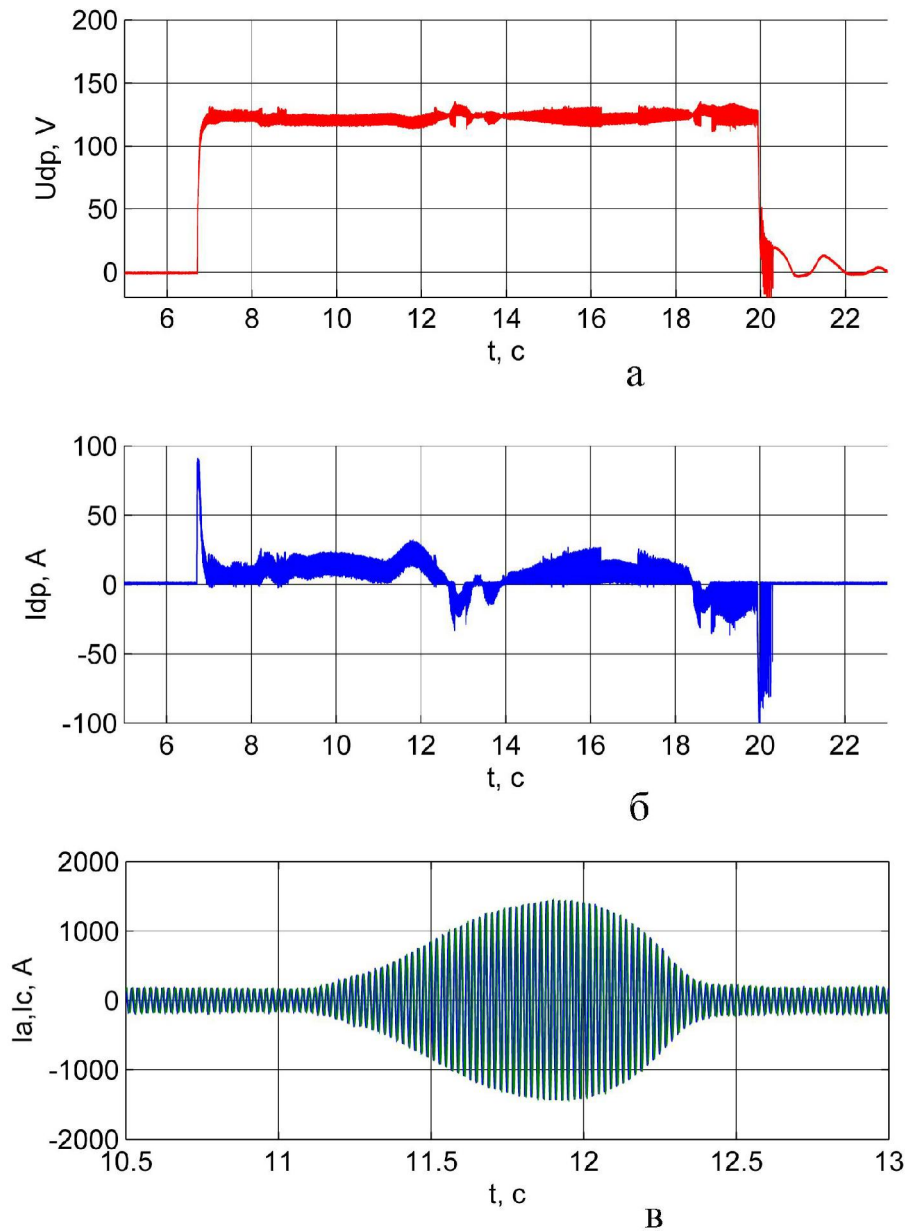


Рисунок 1 – Диаграмма напряжения (а), тока (б) привода подачи, диаграмма фазных токов (в) привода вращения диска при резании квадрата 125x125мм

Математическое описание асинхронного двигателя на рабочем участке механической характеристики без учета электромагнитных процессов характеризуется следующими уравнениями [10]:

$$M_e = (\omega_0 - \omega)\beta \quad (2)$$

$$J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c, \quad (3)$$

где β – коэффициент жесткости рабочего участка механической характеристики двигателя;

ω_0 , ω – скорость холостого хода и реальная скорость вращения ротора.

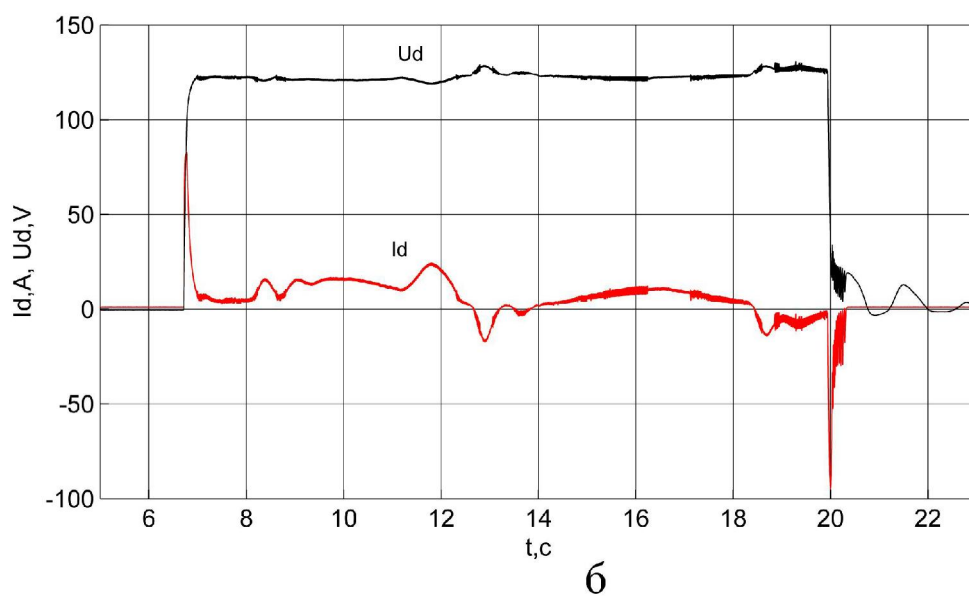
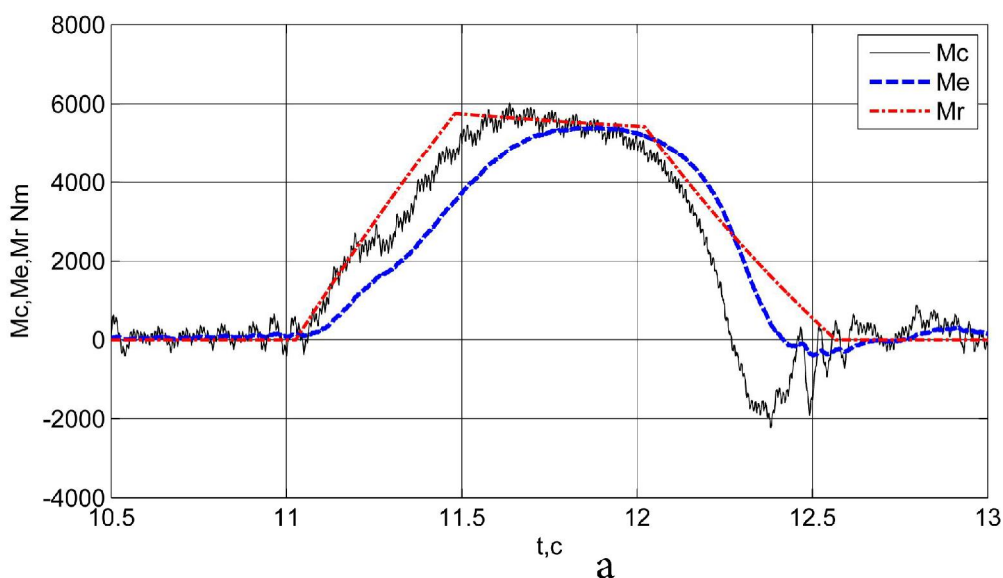


Рисунок 2 – Диаграмма изменения моментов M_e , M_c , M_r привода вращения диска (а); и отфильтрованный ток и напряжение привода подачи (б) при резании квадрата 125x125мм

Для определения M_c необходимо совместно решить уравнение механической характеристики двигателя (2) и уравнение движения (3).

Выражая ω из (2) и подставляя в (3) с учетом того, что $\frac{J_\Sigma}{\beta} = T_M$ (T_M –

электромеханическая постоянная времени) получаем выражение для момента сопротивления:

$$M_c = T_M \frac{dM_e}{dt} + M_e. \quad (4)$$

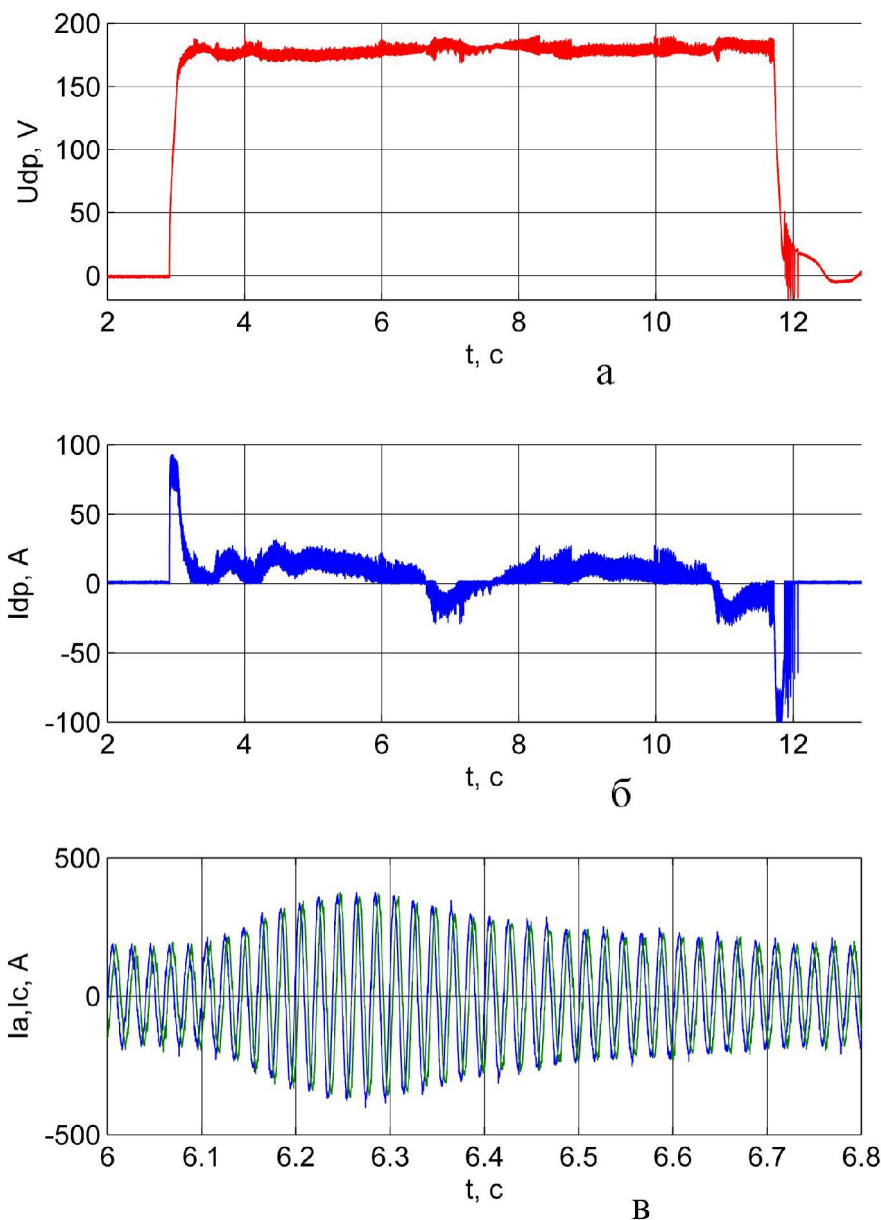


Рисунок 3 – Диаграмма напряжения (а), тока (б) привода подачи, диаграмма фазных токов (в) привода вращения диска при резании швеллера №16

В соответствии с уравнением (4) был разработан алгоритм преобразования массива данных средствами пакета визуального блочного имитационного моделирования Simulink матричной системы MATLAB

[11]. Для двигателя привода вращения диска пилы типа ВА02–3I5L–6, мощностью $N=200\text{кВт}$, с частотой вращения $n = 980\text{ мин}^{-1}$, коэффициент жесткости механической характеристики $\beta = 984,28\text{Нмс}$. В нашем случае механическая постоянная времени равна $T_M = 0,1318\text{с}$, суммарный момент инерции электропривода вращения диска пилы равен $J_\Sigma = 129,73\text{кгм}^2$.

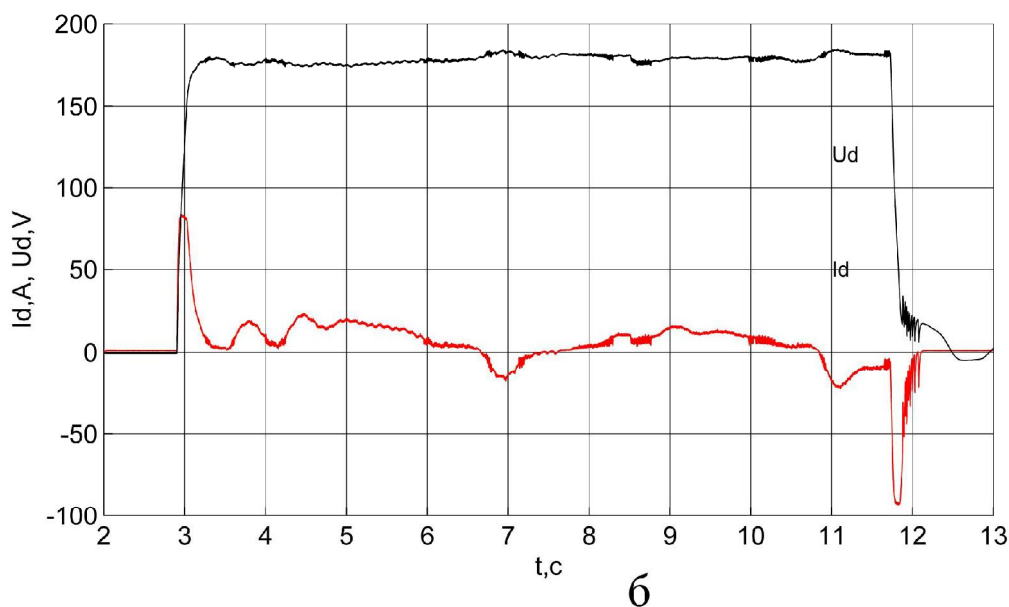
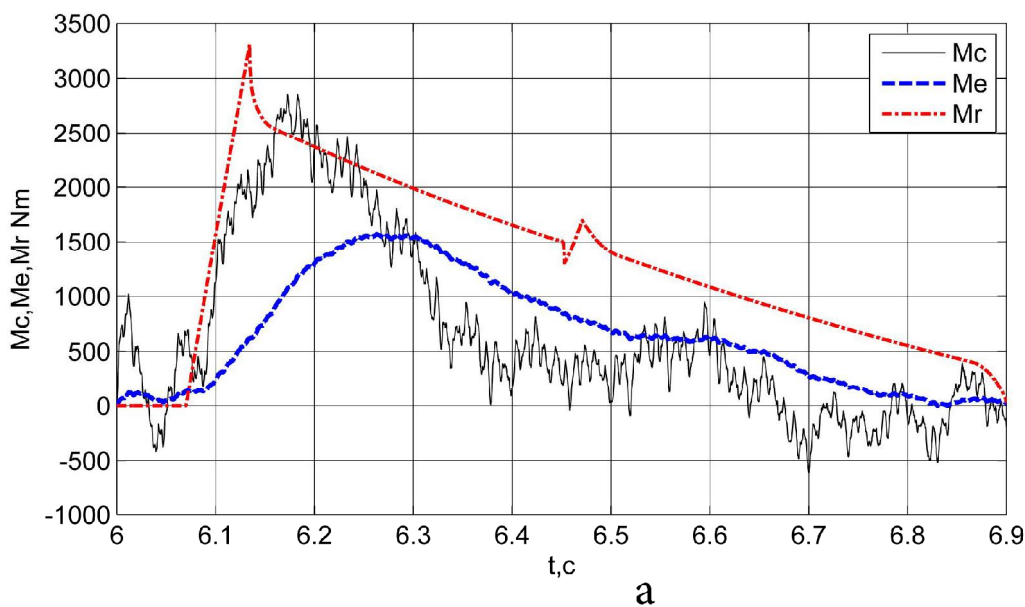


Рисунок 4 – Диаграмма изменения моментов M_e , M_c , M_r привода вращения диска (а); и отфильтрованный ток и напряжение привода подачи (б) при резании швеллера №16

Результаты вычисленного момента сопротивления привода вращения диска, представлены на рисунках 2,а и 4,а, где M_e – момент электромагнитный, вычисленный по формуле (1); M_c – момент сопротивления вращению диска пилы, вычисленный по формуле (4) (отставание по времени момента M_e относительно момента M_c , связано с запаздыванием реакции электропривода на механическое воздействие); M_r – момент резания, реализованный на базе математической модели [12,13].

Статический момент резания M_r и пропорциональное ему окружное усилие резания $F_t = M_r / r$ (где r – радиус диска пилы), в модели определялись по известным зависимостям [2,3]. Удельное сопротивление резанию q определялось на базе методики Л.В. Андreyюка [14] для истинного сопротивления деформации, экстраполированием на диапазон высоких скоростей и степеней деформации. Скорость деформации вычислялась по формуле предложенной В.П. Литвиненко [4]. Для вычисления значения степени деформации ε использовалась зависимость установленная Л.Д. Соколовым, В.М. Гребеником, М.А. Тылкиным, учитывающая связь между осадкой образцов при сжатии и усадкой стружки при резании пилами:

$$\ln\left(\frac{h_0}{h}\right) = 3 \cdot \ln\left(\frac{L_0}{L}\right) = 3 \cdot \ln \xi, \quad (5)$$

где h_0 , h – соответственно начальная и конечная высота образца при сжатии;

ξ – усадка стружки; опытами установлено, что характерная величина усадки стружки равна $\xi=4$ [4].

Выразив $\frac{h_0}{h}$ из (5) и подставив в выражение для $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = \frac{h_0 - h}{h}$, получаем $\varepsilon = 1 - \frac{1}{\xi^3} = 1 - \frac{1}{4^3} = 0,984$, при $\xi=4$ $\varepsilon = 0,984$.

В механизме подачи используется электродвигатель типа ДП–32, мощностью $N=12$ кВт, с частотой вращения $n = 790$ мин⁻¹, привод осуществляется через цилиндрический редуктор, на выходном валу которого установлен кривошип, взаимодействующий с приводным рычагом четырехзвенника. Очевидно, что при постоянной скорости вращения приводного кривошипа скорость диска будет изменяться нелинейно. Однако на диаграммах изменения скорости или электродвижущей силы – U_d (рисунок 1,а и 3,а) скорость резания за исключением переходных периодов постоянна. Это объясняется применением в приводе подачи

систем регулирования скорости, задача которых, состоит в поддержании постоянной оптимальной для данного профиля скорости резания. Паспортные данные ПГР предусматривают изменение скорости подачи в пределах 14,2...210 мм/с [15]. Фактическое значение средней скорости подачи при резании швеллера №16 составило 190мм/с, а при резании квадрата 125x125мм – 130мм/с, что является завышенным для данного типа профиля.

На диаграммах тока, пропорциональных моменту привода подачи при порезке квадрата (рисунок 2,б) и швеллера (рисунок 4,б) можно выделить характерные участки пуска и торможения привода. На основном участке ток изменяется незначительно, исключение составляет порезка квадрата (рисунок 2, б) в промежутке времени 11...12,5с. Ток I_d вначале растет, а затем уменьшается, что обусловлено указанной выше высокой скоростью подачи пилы на рез; при порезке швеллера (рисунок 4,б) рост тока не наблюдается.

Характер и форма представленных графиков M_c и M_r (рисунок 2,а и 4,а) свидетельствуют о достаточной сходимости результатов математического моделирования [12,13] и экспериментальных данных; коэффициент корреляции значений моментов M_c и M_r для квадрата составил 0,934, для швеллера №16 – 0,833. Максимальные значения окружной силы резания F_t для квадрата составило – 6401 Н, для швеллера – 3676 Н.

Меньшее значение коэффициента корреляции, полученное при обработке результатов для швеллера №16, может быть связано с дополнительными пульсациями момента M_c , характерными для второй половины фазы резания фланцевого профиля (рисунок 4,а), когда зубья диска пилы одновременно снимают слой металла на участке реза стенки и полки фасонного проката (что приводит к ударам и дополнительному износу режущего инструмента), в то время как у квадрата, участок резания всегда один, и момент M_c изменяется более плавно (рисунок 2,а). В свою очередь, при резании квадрата, на графике момента сопротивления ближе к окончанию процесса резания, имеется участок, когда момент M_c – отрицателен, аналогичный участок, имеет место и на графике момента сопротивления швеллера, однако его значимость и по времени действия и по амплитуде меньше. Отрицательное значение момента сопротивления (момента резания) объясняется перераспределением энергии между приводами подачи и вращения диска.

Выводы

1. Использованный способ экспериментального определения основных параметров резания, благодаря системе регистрации, фиксирующей текущие параметры электропривода в реальном масштабе вре-

мени, можно считать универсальным и применимым на любых типах пил (любой кинематики).

2. Методика определения удельного сопротивления резанию q , используемая в математической модели [13], приведена в соответствие с полученными экспериментальными данными, что позволит моделировать резание широкого диапазона сортовых профилей, различных по химическому составу сталей, при различных режимах резания и положениях профиля на стеллаже.

3. Повышенные значения скорости подачи (130мм/с) при резании квадрата, с одной стороны, способствуют увеличению производительности пилы, но с другой, приводят к повышенным нагрузкам на звенья механизма и дополнительному износу узлов пилы.

4. Практический интерес представляют методики определения максимальной величины момента и усилия резания, разработанные многими авторами, сопоставление методик, их область применения и обобщение результатов требуют более детального анализа, выходящего за рамки представленной статьи.

Авторы выражают благодарность всем, кто принимал участие при проведении экспериментальных исследований, а именно, вед. инженерам ЦРНЭиА Романчишину В.Б. и Пахарю Н.К., инженерам Шульгину В.А. и Калиниченко С.В., а также эксплуатационному персоналу электрослужбы СПЦ.

Библиографический список

1. *Режущие машины прокатных цехов. ЧII / Е.А. Жукевич–Стоша, А.З. Слоним, П.И. Сидоров и др. НИИинформтяжмаш 1971 – 167с.*

2. *Иванченко Ф.К. та інші. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів: Навч. посібник. / Ф.К. Иванченко, В.М. Гребеник, В.М. Ширяев. – К.:Вища шк., 1995. – 454с.*

3. *Ищенко А.А., Шпак В.И., Послушник А.В., Капорович С.В., Шевцов С.А., Левит А.В. Математическое моделирование энергосиловых параметров при разделении металлопроката дисковыми пилами // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Темат. зб. наук. праць. – Краматорськ–Слов'янськ: ДДМА, 2000. – С. 103–106.*

4. *Литвиненко В.П. Исследование и совершенствование работы пил горячей резки сортового проката. Автореф. диссертации на соискание ученой степени кан. техн. наук / Литвиненко Владимир Петрович. – Днепропетровск, 1973. – 20с.*

5. Татарников В.В., Гришко В.П. О влиянии режимов резания дисковой пилы и других факторов на энергосиловые параметры // Известия ВУЗов. Черная металлургия №11, 2000г. – С.38-41.

6. Отчет о научно-исследовательской работе №362/181 // Исследование влияния материала и конфигурации режущей части дисков пил холодной резки стана 600 на производительность и качество реза – Выполнена по договору с предприятием п/я 4774 Коммунарск, декабрь 1969.

7. Крылов Н.И., Голубенко Н.И., Лекай А.К. Исследование энергетического баланса электропривода пил горячей резки // Автоматизация и электропривод металлургических машин и агрегатов. Труды ВИИМЕТМАШ. Сборник научных трудов №47. Москва. – 1977. – С. 56–69.

8. Полилов Е.В., Зеленев А.Б. Опыт разработки и внедрения систем регистрации электрических процессов и событий электроприводов линии стана // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2005.– Вып. 4/2005 (33). – С. 9 – 11.

9 Петров П.А. Оценка основных причин замены дисков пил горячей резки // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета Вып.22 – Алчевск: ДонГТУ, 2006.– 301с. С.173 – 179.

10. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов / Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

11. Лазарев Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512с.

12. Шпаков В.А., Петров П.А. Математическая модель дисковой пилы горячей резки // Сборник научных трудов ДГМИ №17 – Алчевск: ДГМИ, 2003. – С. 292–298.

13. Шпаков В.А., Петров П.А. Исследование траектории движения диска пилы горячей резки с помощью математической модели // Сб. наук. пр. ДДМА. Краматорськ 2004. – С. 638–642.

14. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. М. Металлургия, 1986. – 430с.

15. Иценко А.А. Участки резки проката дисковыми пилами: Учеб. пособие. – К.: Выща шк., 1989. – 61с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.