

Перечень ссылок

1. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 616 с.
2. Глазенко Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с., ил.
3. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2002. – 304 с., ил.
4. Герман-Галкин С. Г., Г. А. Кардонов Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2003. – 256 с., ил.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2001. – 319 с., ил.
6. Перльмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с., ил.
7. Пегов Д. В., Бурцев П. В., Андреев В. Е. Руководство по устройству электропоездов ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М.– М.: Центр коммерческих разработок, 2003. – 184 с.,табл.,ил.

Поступила в редакцию 14.03.07 г.

После доработки 04.04.07

Розроблена вдосконалена схема імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження. Для запропонованої і існуючої схем імпульсного регулювання розроблені моделі, за допомогою яких досліджені електромеханічні процеси тягового електроприводу в цих схемах і виконано їх порівняльний аналіз.

The improved scheme of impulsive regulation of series excitation direct current motor was developed. The impulsive regulation models for offered and existent schemes were developed, the electro-mechanical processes of electric drive were probed and comparative analysis was presented.

УДК 621.313.2.001.57

Е. С Назарова , А. В Пирожок, Ю. А. Супрун

Имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки

Разработана имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки, предназначенная для исследования электромеханических процессов стана.

Улучшение качества прокатываемого металла и повышение производительности станов холодной прокатки требует глубокого исследования электромеханических процессов станов. Это, в свою очередь, вызывает практическую необходимость и актуальность создания имитационных моделей станов, воспроизводящих реальные электромеханические процессы в них. Имитационные модели позволяют без нарушения существующего производственного цикла прокатного стана исследовать его электромеханические процессы, заметно снизить трудоемкость и затраты на проведение этих исследований по сравнению с экспериментом.

Исследованию процесса механического движения металла в различных прокатных станах посвящено достаточно много работ, например, [1–4]. В книге [1] приведены математические описания законов, определяющих связь электромеханических параметров стана с параметрами технологических процессов. В работе [2] изложены основы теории прокатки и автоматизации непрерывного стана холодной прокатки, где этот стан и его автоматизированный многодвигательный электропривод рассматривается как единый электрифицированный агрегат. В статье [3] разработана и описана имитационная модель механического движения металла для непрерывного стана «Тандем». В монографии [4] рассмотрены общие принципы рабо-

ты различных реверсивных станов холодной прокатки. Анализ известных работ показывает, что большинство из них [1–3] посвящены исследованию процесса механического движения металла в непрерывных станах холодной прокатки, в которых указанное движение в значительной степени отличается от реверсивных станов (в частности, особенностями, связанными с реверсированием металла в последних). В известных немногочисленных работах [4], посвященных реверсивным станам холодной прокатки, остались без внимания вопросы: углубленного рассмотрения динамических процессов указанных станов, связанных с реверсированием проката; исследования электромеханических процессов указанных станов; создания имитационных моделей для исследования процесса механического движения металла в этих станах.

Целью работы является создание имитационной модели механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки, предназначенной для исследования электромеханических процессов.

Кинематическая схема данного стана показана на рис. 1. Процесс прокатки в одноклетевом стане осуществляется при натяжении полосы как со стороны входа в клеть, так и на выходе из стана. Причем, натяжение металла на выходе стана, возникающее между

клетью и наматывающим устройством, в несколько раз превышает натяжение металла на входе стана. В результате этого снижается давление металла на валки прокатного стана, уменьшается коробоватость полосы, происходит правильное и плотное наматывание металла на барабан моталки [1].

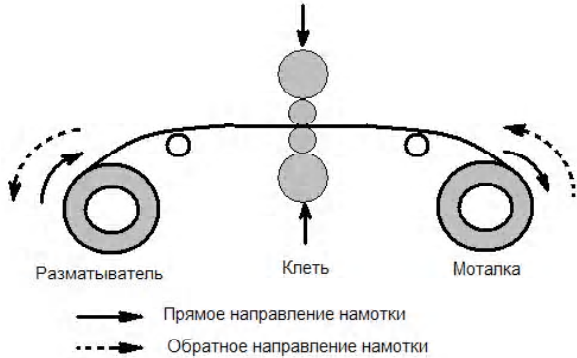


Рис. 1. Кинематическая схема прокатного стана

Натяжение полосы создается при помощи электроприводов намоточных устройств: моталки и разматывателя. На реверсивных одноклетевых станах холодной прокатки моталка и разматыватель установлены

по разные стороны рабочей клетки, и после реверса направления прокатки металла моталка и разматыватель меняются между собой местами [4]. Электропривод наматывающей моталки работает в двигательном режиме, обеспечивая выходное натяжение полосы. Двигатель разматывающей моталки (разматывателя) работает в генераторном режиме. Тянущим двигателем для разматывающей моталки в этом случае является прокатный двигатель клетки. В рассматриваемом стане обрабатываемый материал (металл) является упругим звеном [5].

Для исследования движения металла в одноклетевом прокатном стане разработана в пакете прикладных программ MatLab имитационная модель, показанная на рис. 2, где: SAY-1, SAY-2, SAY-3 – блоки, обеспечивающие задания якорных напряжений трапециидальной формы для двигателей моталки, клетки и разматывателя (DPT_jakor1, DPT_jakor2, DPT_jakor3) соответственно. Разматывающее устройство представлено блоком Razmativatel. Металл, выходящий из разматывателя и входящий в клетку (при прямой прокатке), имитируется блоком Prokat1. Рабочая клетка реверсивного одноклетевого стана в модели отображена блоком Kletka. Металл, выходящий из клетки и наматываемый на моталку, представлен блоком Prokat2. Имитацию наматывающего устройства обеспечивает блок Motalka.

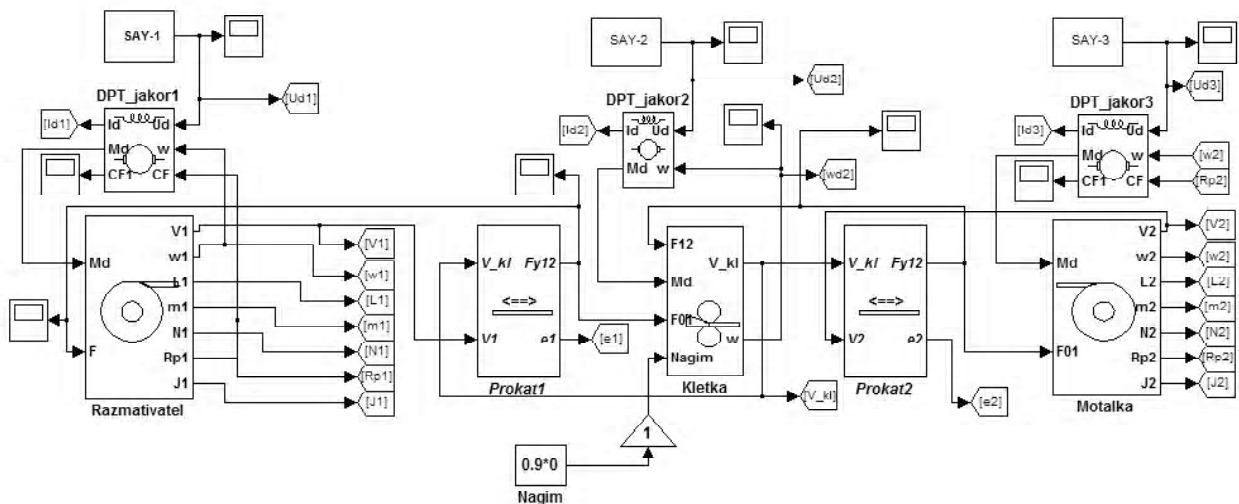


Рис. 2. Общий вид модели одноклетевого реверсивного прокатного стана

Схема имитационной модели составлена при использовании следующих допущений:

- а) материал однороден и имеет по всей длине одинаковую толщину и ширину;
- б) влиянием массы материала на его деформацию можно пренебречь;
- в) деформация имеет только упругий характер и равномерно распределяется по поперечному сечению;
- г) волновые процессы, связанные с распределением деформации по длине, не учитываются.

В процессе прокатки полоса разматывается с одной моталки и наматывается на другую, при этом диаметры рулонов непрерывно изменяются. Чтобы поддерживать постоянной линейную скорость прокатки, необходимо скорость двигателя разматывающего механизма (рис. 3) уменьшать или увеличивать в зависи-

мости от режима работы стана. Изменение диаметров рулонов в течение всего цикла прокатки должно учитываться при поддержания постоянства натяжения полосы прокатываемого металла. При функционировании реверсивных прокатных станов требуется вычисление текущего значения массы, момента инерции рулона, длины полосы прокатываемого металла.

В математической модели разматывателя осуществляется вычисление начального значения длины L полосы из зависимости:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot (R_p \cdot N - h \cdot N + h), \quad (1)$$

где R_p – радиус смотанного рулона, N – количество витков в рулоне, h – толщина прокатываемой полосы.

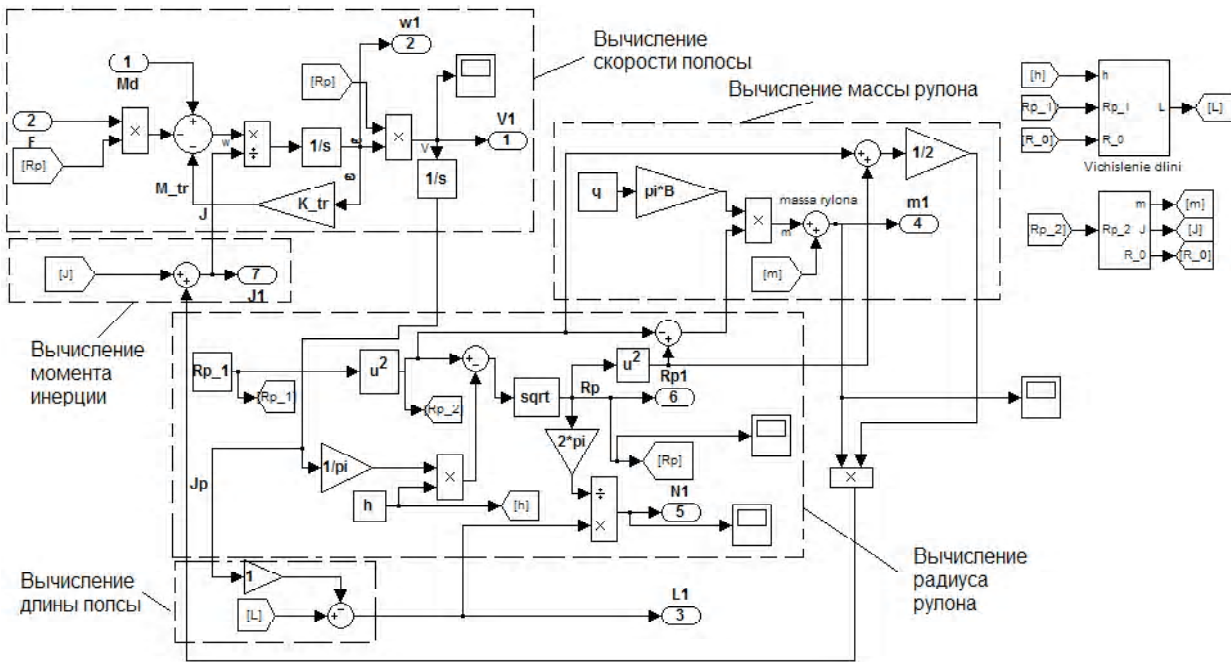


Рис. 3. Модель разматывающего механизма

Вычисление текущего значения массы рулона выполняется из соотношения [1]:

$$m = q \cdot \pi (R_p^2 - R_0^2) \cdot B, \quad (2)$$

где q – удельный вес металла, R_0 – радиуса барабана, B – ширина прокатываемой полосы. Момент инерции металла в рулоне на разматывателе определяется из зависимости [5]:

$$J_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R_p^2 - R_0^2), \quad (3)$$

В модели вращающий момент M_d создается двигателем постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением [3], который приводит в движение наматывающий (разматывающий) механизм и клеть. В модели на рис. 2 данный момент поступает в подсистему ДПТ через порт Md. В этой подсистеме для регулирования напряжения якоря и потока возбуждения двигателя предназначены порты Ud и CF соответственно. Для учета внутреннего влияния ЭДС двигателя предусмотрен входной порт w (на который поступает угловая скорость ω двигателя).

Угловая скорость двигателя определяется с учетом линейной скорости движения полосы V и текущего значения радиуса рулона R_p из соотношения:

$$\omega = V_i / R_p, \quad (4)$$

где i – передаточный коэффициент редуктора.

Момент на валу разматывающего устройства (определяемый в модели на рис. 3) находится через его следующие составляющие [1]:

$$M = M_{\text{пол}} + M_{\text{пот}} + M_{\text{деф}} + M_{\text{дин}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{пол}}$ – полезный момент, необходимый для создания заданного натяжения F ; $M_{\text{пот}}$ – момент, требуемый для преодоления механических потерь в системе «двигатель – механизм»; $M_{\text{деф}}$ – момент, затрачиваемый на деформацию изгиба полосы при намотке рулона; $M_{\text{дин}}$ – динамический момент (обеспечивающий ускорение намоточного устройства при разгоне и торможении, а также при изменении радиуса рулона).

В зависимости от режима работы стана (прокатка в прямом или в обратном направлении) соотношение между упомянутыми составляющими моментов может быть различно. Полезный момент определяется значением усилия и в ряде случаев значительно превышает значение момента потерь, что позволяет пренебречь влиянием последнего на работу стана. Значение момента тем меньше, чем тоньше перематываемая полоса металла (он практически равен нулю для материалов, имеющих малую жесткость).

В процессе намотки с постоянным усилием натяжения полезный момент прямо пропорционален радиусу рулона [3]:

$$M_{\text{пол}} = FR_p. \quad (6)$$

При постоянном натяжении полосы (независимо от радиуса) полезная мощность пропорциональна скорости полосы и находится из соотношения:

$$P_{\text{пол}} = FV. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) могут служить для построения системы автоматического управления с косвенным

измерением натяжения. Если пренебречь разницей между моментом на валу двигателя и полезным моментом (считая, что влияние трех последних слагаемых в выражении (5) мало, либо – будет скомпенсировано), а также пренебречь механическими потерями электродвигателя, то можно полагать, что электромагнитный момент двигателя следует изменять по следующему закону:

$$M_{эм} = FR_p / i. \quad (8)$$

С другой стороны, момент двигателя постоянного тока равен [3]:

$$M_{эм} = c_D \Phi I_я, \quad (9)$$

где Φ и $I_я$ – магнитный поток и якорный ток двигателя соответственно; c_D – конструктивная постоянная.

В результате сравнения двух последних выражений может быть сформулирован наиболее распространенный закон косвенного регулирования натяжения полосы: при заданном постоянном натяжении F необходимо поддерживать постоянным якорный ток $I_я$, меняя поток возбуждения Φ двигателя пропорционально радиусу R_p рулона [1].

Динамический момент на валу двигателя равен [3]:

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (10)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции вращающихся частей наматывающего устройства вместе с рулоном, приведенный к валу двигателя.

Исходя из (4), определим производную угловой скорости:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i}{R_p} \frac{dV}{dt} - \frac{Vi}{R_p^2} \frac{dR_p}{dt}. \quad (11)$$

При этом динамический момент $M_{дин}$ двигателя находится в виде двух составляющих:

$$M_{дин} = M_{дин1} + M_{дин2}. \quad (12)$$

Составляющая $M_{дин1}$ требуется для создания ускорения dV/dt при данном радиусе рулона R_p и равна [3]:

$$M_{дин1} = \frac{J_{\Sigma} i}{R_p} \frac{dV}{dt}. \quad (13)$$

Составляющая $M_{дин2}$ учитывает изменение радиуса рулона R_p и рассчитывается в виде [3]:

$$M_{дин2} = -\frac{J_{\Sigma} Vi}{R_p^2} \frac{dR_p}{dt}. \quad (14)$$

Момент инерции J_{Σ} , в свою очередь, состоит из двух составляющих: неизменного момента инерции J_0 (вращающихся частей механизма и собственного момента двигателя) и меняющегося с изменением радиуса рулона момента инерции J_p наматываемого (разматываемого) рулона.

Упомянутые составляющие динамического момента согласно (13), (14) и с учетом (2) и (3) могут быть определены из выражений:

$$\left. \begin{aligned} M_{дин1} &= \left(\frac{q \cdot \pi B}{2i} R_p^3 + \frac{J_0 i}{R_p} \right) \frac{dV}{dt}; \\ M_{дин2} &= \left(\frac{q \cdot \pi B}{2i} R_p^2 V + \frac{J_0 Vi}{R_p^2} \right) \frac{dR_p}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Деформация материала на участке растяжения длины l описывается дифференциальным уравнением [5]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_1}{l} - (1 + \varepsilon) \frac{V_2}{l}, \quad (16)$$

где ε – относительное удлинение; V_1 и V_2 – линейные скорости материала в начале и конце растяжения l .

Натяжение, возникающее в материале, связано с абсолютным значением растяжения Δl соотношением [5]:

$$F_y = c_p \Delta l = c_p l \varepsilon, \quad (17)$$

где c_p – упругость прокатываемого металла.

На основании зависимостей (16) и (17) была разработана модель механического движения металла между клетью и разматывающим (наматывающим) механизмом, которая показана на рис. 1 блоками Prokat1, Prokat2. Данная модель является самостоятельной подсистемой с векторами входных и выходных координат.

При рассмотрении механических процессов для клетки прокатного стана будем полагать, что момент сопротивления состоит из двух составляющих: момента трения M_T и момента прокатки M_{II} , – которые пропорциональны скорости вращения клетки (а последний – еще и зависит от силы нажима (Nagim) со стороны нажимных винтов) [3].

При принятых допущениях для данных моментов справедливы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} M_T &= K_T \omega; \\ M_{II} &= K_{II} \omega \times Nagim \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где K_T – коэффициент вязкого трения, K_{II} – коэффициент прокатки, учитывающий нагрузку на клеть в зависимости от величины обжатия металла в клетке (в модели указанные коэффициенты обозначены соответственно K_{af0} и K_{af-a}).

В моделі кліти (показанної на рис. 1 блоком Kletka) учені не тільки вращающиеся массы и баланс моментов, но и предусмотрена возможность нагружения кліти от канала нажима (нажимные винты).

На рис. 4 представлены результаты моделирования линейной скорости: моталки (кривая 1), кліти (кривая 2) и разматывателя (кривая 3). Линейная скорость моталки в первый период времени, когда прокатка происходит в прямом направлении, превышает скорость разматывателя и кліти. Поэтому на практике требуется компенсировать удлинение прокатываемого металла. Линейные скорости кліти и моталки соотносятся между собой в зависимости от удлинения полосы.

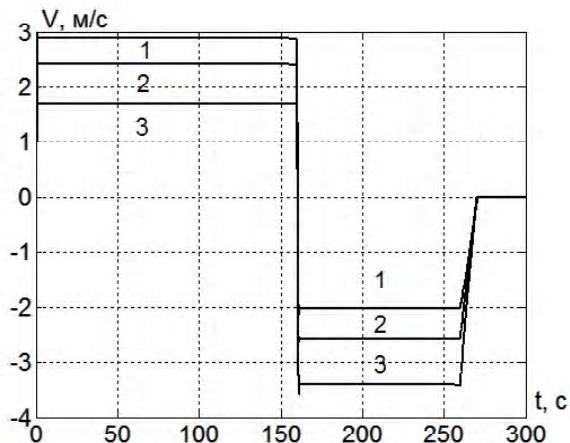


Рис. 4. Линейные скорости полосы металла: 1 – на моталке; 2 – в кліти; 3 – на разматывателе

Изменение угловых частот вращения разматывателя и моталки (рис. 5) происходит во времени не по линейному закону, так как эти изменения зависят от варьирования текущего радиуса рулона. Чем больше радиус рулона, тем меньше угловая частота вращения барабана (и – наоборот).

В имитационной модели стана на рис. 2 задавалось линейное изменение напряжений (рис. 6) на обмотки якорей двигателей, а напряжения в обмотках возбуждения изменялись исходя из поддержания постоянства линейных скоростей и натяжения прокатываемого металла при намотке и смотке (с учетом варьирования текущего радиуса рулона). На рис.6 – рис. 9 показаны

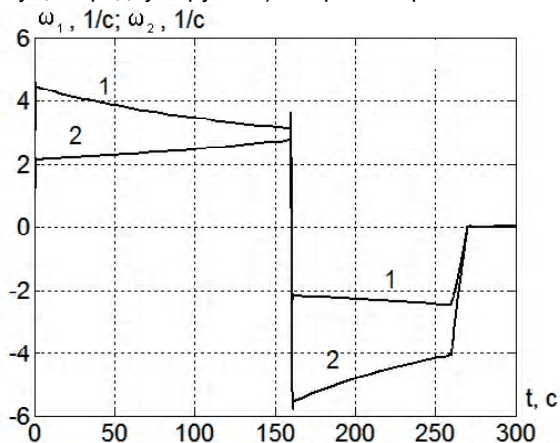


Рис. 5. Изменение угловых скоростей: 1 – моталки; 2 – разматывателя

рассчитанные электромеханические процессы в следующих режимах работы стана: разгон, прокатка в прямом направлении с постоянной линейной скоростью, реверс, прокатка в обратном направлении, торможение. Показанные кривые на этих рисунках соответствуют следующим механизмам: 1 – моталка, 2 – кліти, 3 – разматыватель. На рис. 7 – рис. 9 приведены для этих режимов значения якорных токов, электромагнитных моментов и угловых частот вращения двигателей соответственно.

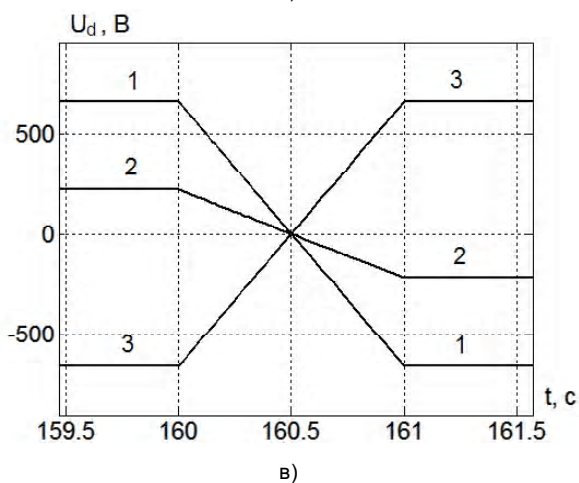
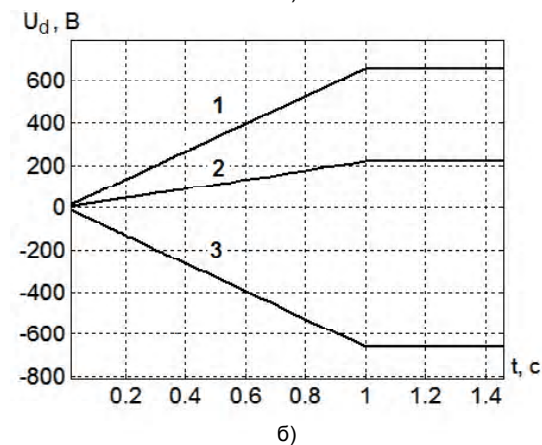
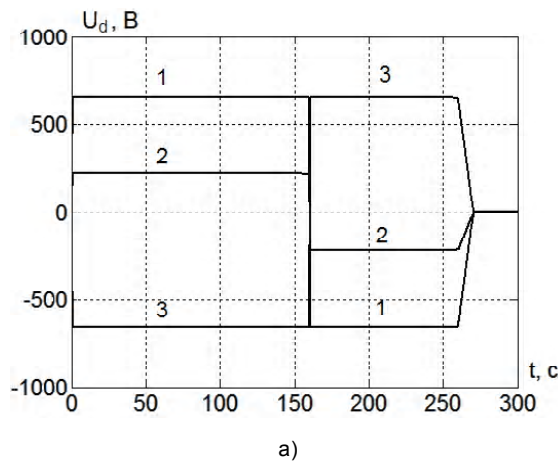


Рис. 6. Изменение якорных напряжений двигателей: а) при прокатке в прямом и обратном направлении; б) укрупненный фрагмент разгона; в) укрупненный фрагмент реверсирования

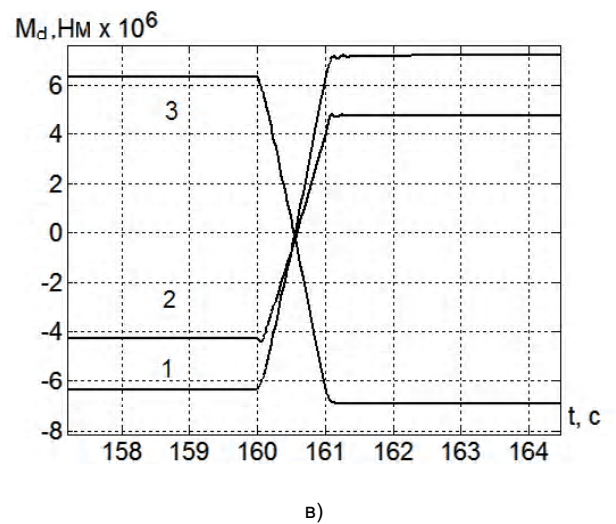
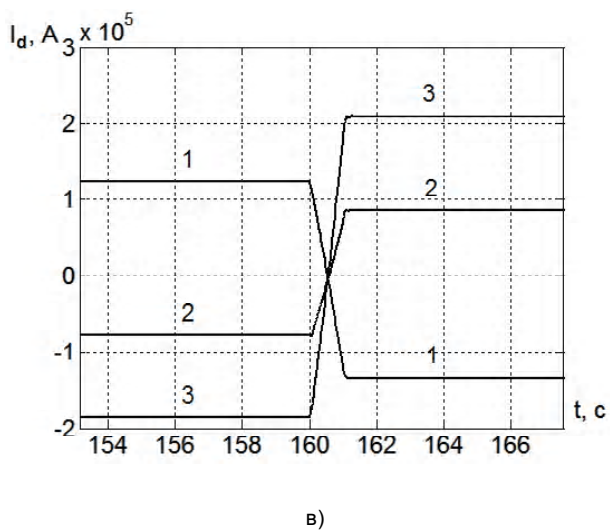
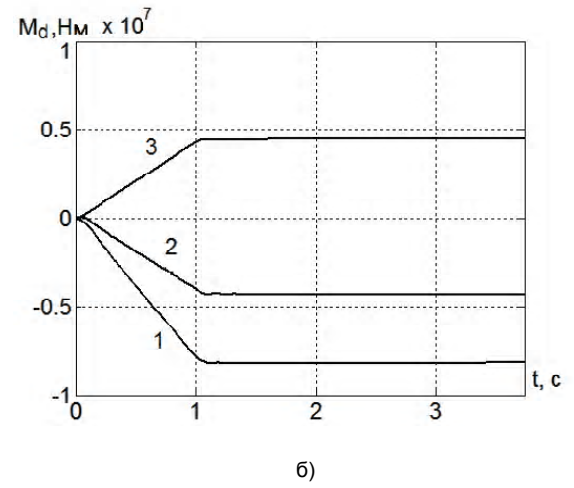
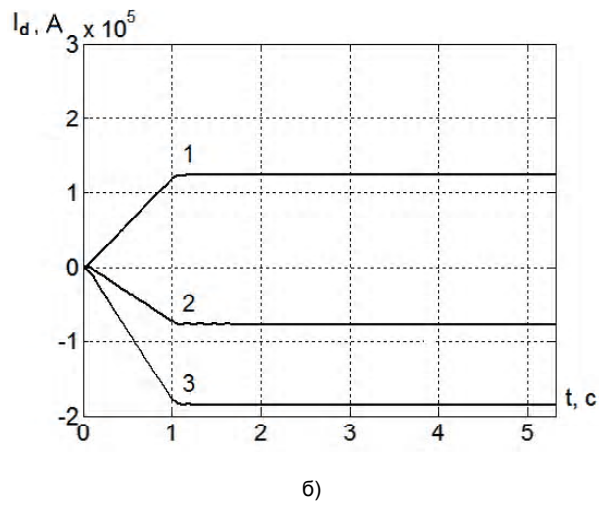
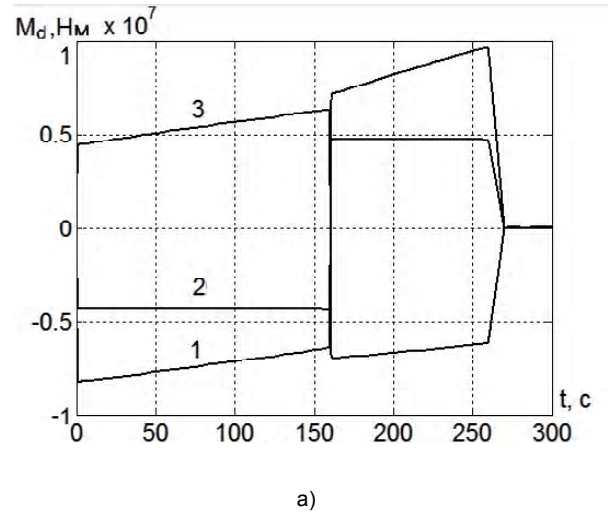
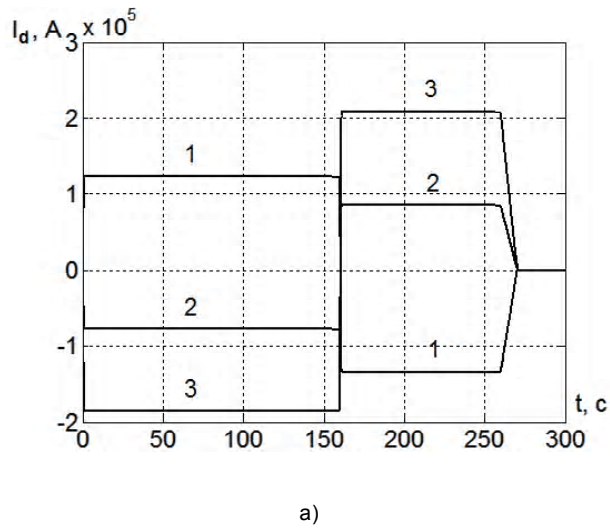


Рис. 7. Токи двигателей: а) прокатка в прямом и обратном направлении; б) укрупненный фрагмент разгона; в) укрупненный фрагмент реверсирования

Рис. 8. Моменты двигателей: а) прокатка в прямом и обратном направлении; б) укрупненный фрагмент разгона; в) укрупненный фрагмент реверсирования

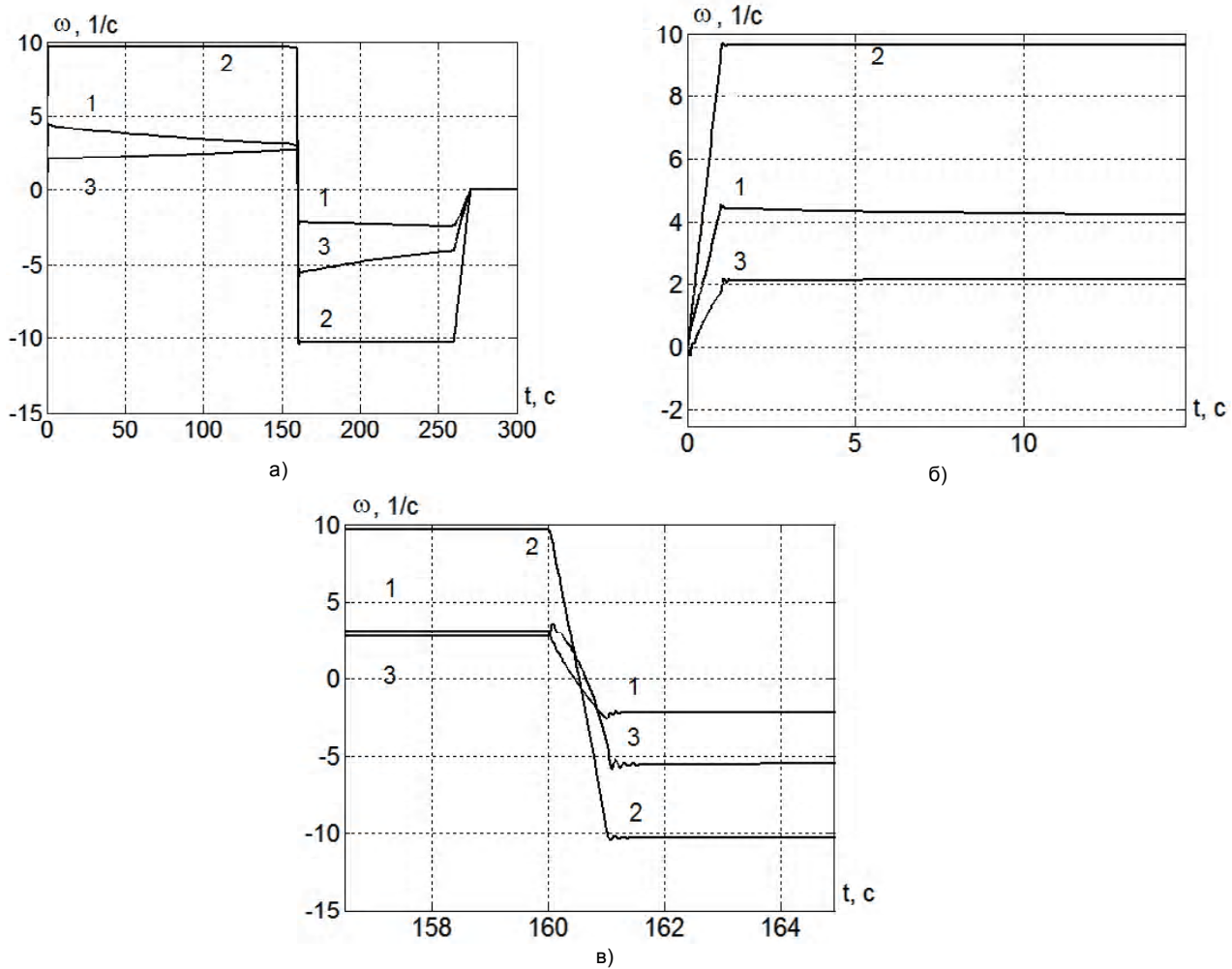


Рис. 9. Угловые частоты вращения двигателей: а) при прокатке в прямом и обратном направлении; б) укрупненный фрагмент разгона; в) укрупненный фрагмент реверсирования

Анализ результатов моделирования механического движения металла для одноклетевого прокатного стана и их сравнение с экспериментально полученными данными на существующем одноклетевом реверсивном стане 1680 цеха ЦХП-1 ОАО «Запорожсталь» свидетельствует о достоверности разработанной имитационной модели (с отклонением между собой не более 5–8 % для электромеханических процессов).

Перечень ссылок

1. Зеленов А. Б., Тертичников В. Н., Гулякин В. Г. Электропривод механизмов прокатных станов. – Харьков: Metallurgizdat, 1963. – 340 с.
2. Дружинин Ю. Д. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Metallurgiya, 1975. – 336 с.

3. Пирожок А. В., Супрун А. А., Супрун А. Ю. Имитационные модели электромеханических процессов тонколистового стана холодной прокатки // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 34–42.
4. Филатов А. С. Электропривод и автоматизация реверсивных станов холодной прокатки. – М.: Metallurgiya, 1973. – 370 с.
5. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 156 с.

Поступила в редакцию 30.03.07 г.

Розроблено імітаційну модель механічного руху металу для реверсивного одноклітьового стана холодної прокатки, призначеного для дослідження електромеханічних процесів стана.

The simulation model of the metal mechanical motion for the reverse single-mill of the cool rolling for analysis of mil electromechanical processes was developed.