

А. А. Синявский

## Учет эффекта упругого сплющивания рабочих валков в имитационной модели электроприводов клетей непрерывного тонколистового прокатного стана

*Разработана имитационная модель электроприводов клетей непрерывного тонколистового четырехклетьевого прокатного стана, учитывающая эффект упругого сплющивания рабочих валков, и с ее помощью выполнены расчет и анализ электромеханических процессов стана.*

Математическое моделирование представляет собой один из наиболее мощных и универсальных методов исследования сложных систем, поведение которых зависит от многих факторов. Применение метода математического моделирования для исследования электромеханических процессов непрерывного тонколистового прокатного стана позволяет оценить то, как конструктивные параметры оказывают влияние на электромеханические процессы и на качество продукции. Очень актуально и востребовано практикой создание имитационной модели такого стана. Для реализации этого в имитационной модели электроприводов клетей непрерывного тонколистового прокатного стана необходимо учесть физические явления, оказывающие наибольшее влияние на ход технологического процесса. А именно: растяжение полосы металла между клетями; влияние значительных межклетевых натяжений на давление металла на рабочие валки в зоне деформации полосы; сплющивание рабочих валков в зависимости от давления; влияние условий деформации на механические свойства металла; изменение относительных скоростей, вследствие изменения уровня обжатия (при условии постоянного объема металла, проходящего в единицу времени).

В научно-технической литературе предложены разные подходы к построению математической модели ЭП клетей прокатных станов. В общем случае эти модели представляют собой совокупность дифференциальных уравнений и нелинейных зависимостей, описывающую многомассовую электромеханическую систему с упругими связями и непостоянными параметрами [1–3]. Одни решения [1] позволяют получить статическую модель прокатного стана достаточно точно, но не позволяют оценить динамику переходных процессов. Другие решения [4, 5] позволяют получить динамическую модель прокатного стана, но при этом обычно учитываются не все, а лишь самые основные взаимосвязи координат объекта управления (и игнорируются другие, оказывающие порой весьма существенное влияние на технологический процесс). Это приводит к тому, что такие модели просты в реализации, но описывают технологический процесс приближенно. Их применение в случаях, когда необходима высокая точность исследований, оказывается неэффективным.

Статья посвящена разработке и исследованию имитационной модели электропривода клетей непре-

рывного тонколистового четырехклетьевого прокатного стана, учитывающей эффект упругого сплющивания рабочих валков.

Общая математическая модель прокатного стана может быть представлена в виде нескольких своих подсистем, отображающих: межклетевую промежуток, клеть, моталку, разматыватель и электроприводы исполнительных механизмов. Общая модель выполнялась при допущениях, что силы воздействия на полосу металла со стороны разматывателя и моталки равны нулю.

Математическую модель межклетьевого промежутка можно представить согласно [3, 4, 6] в виде системы уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{V_{2n}}{l} - \frac{V_{1n}}{l}(1 + \varepsilon), \\ F &= \begin{cases} 0, & \text{если } \varepsilon < 0 \\ ES\varepsilon, & \text{если } \varepsilon \geq 0 \end{cases}, \\ S &= h_p b, \\ h_p &= \frac{h_{in}}{1 + \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $l$  – длина промежутка,  $b$  – ширина полосы,  $h_{in}$  – толщина полосы металла при входе в промежуток.

Входными координатами модели являются линейные скорости движения полосы металла  $V_{1n}$  и  $V_{2n}$  соответственно на входе в промежуток и на его выходе. Выходными координатами модели служат натяжение металла  $F$  в промежутке и толщина листа металла  $h_p$ , изменяющаяся вследствие его растяжения. Первое дифференциальное уравнение системы (1) описывает зависимость между изменением относительного удлинения и разностью скоростей на входе и выходе из промежутка [4]. Второе уравнение описывает закон Гука [6]. Оставшиеся два уравнения характеризуют изменение геометрической формы полосы металла вследствие растяжения. Ввиду того, что рассматривается растяжение широкой тонкой полосы металла при холодной прокатке, изменение ширины полосы металла не учитывается [3] (т. к. ширина полосы металла намного больше ее толщины и изменением ширины на практике можно пренебречь).

Ввиду подобия происходящих процессов, рассмотренная модель межклетьевого промежутка также подходит для описания поведения металла в промежутках: разматыватель – первая клетка, последняя клетка – моталка [4].

Математическая модель клетки, согласно [3–5], представлена системой уравнений (2):

$$\left. \begin{aligned}
 M_d - M_p + F_2 R - F_1 R &= J \frac{d\omega}{dt}, \\
 M_p &= 2P_c \Psi b L_d, \\
 P_c &= 1,15 \sigma_T \frac{2h_2}{(h_1 - h_2)(\delta - 1)} \left[ \left( \frac{h_\gamma}{h_2} \right)^\delta - 1 \right] - \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left( \frac{F_1}{bh_1} + \frac{F_2}{bh_2} \right), \\
 \left( \frac{h_\gamma}{h_2} \right) &= \left( \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1)(h_1 / h_2)^\delta}}{\delta + 1} \right), \\
 \delta &= \frac{f_y}{\operatorname{tg}(\alpha / 2)}, \\
 L_d &= \sqrt{R_v (h_1 - h_2) + (cmRP_c)^2} + cmRP_c, \\
 \alpha &= \frac{L_d}{R_c}, \\
 R &= R_v - \Delta R, \\
 \Delta R &= 2R_v \frac{m^2}{4} P_c, \\
 h_2 &= h_2^* - 2 \cdot \Delta R, \\
 V_{2k} &= \omega R \frac{h_\gamma}{h_2}, \\
 V_{1k} &= V_{2k} \frac{h_2}{h_1}, \\
 m &= \frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где:  $m$  – промежуточный коэффициент,  $M_d$  – крутящий момент приводного двигателя,  $J$  – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции,  $R_v$  – радиус вала,  $h_\gamma$  – толщина металла в нейтральном сечении,  $f_y$  – коэффициент трения,  $L_d$  – длина зоны деформации,  $R$  – радиус рабочего вала с учетом сплющивания. Для моделирования технологического процесса выбраны следующие коэффициенты:  $\mu = 0,3$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^5$  Мпа;  $\Psi = 0,2$ ;  $c = 1,375$ . В сис-

теме уравнений (2) входными координатами являются: силы переднего и заднего натяжения металла  $F_1$  и  $F_2$ , раствор рабочих валков  $h_2^*$ , крутящий момент приводного двигателя  $M_d$  и толщина прокатываемого металла  $h_1$ .

Выходными координатами служат: линейные скорости движения металла при входе в зону деформации  $V_{1k}$  и при выходе из нее  $V_{2k}$ , угловая скорость вращения валков  $\omega$ , толщина металла при выходе из зоны деформации  $h_2$ . Первое дифференциальное уравнение системы (2) описывает динамику изменения угловой скорости приводных валков. Второе уравнение определяет момент прокатки  $M_p$  в зависимости среднего значения давления металла на валки, ширины прокатываемой полосы и длины зоны контакта [3]. Третье уравнение описывает зависимость среднего значения давления металла на рабочие валки [3]. Изменение радиуса рабочего вала вследствие его сплющивания описывается девятым уравнением системы (2).

Последние два уравнения определяют скорости движения металла при входе в зону деформации и при выходе из нее. Остальные уравнения позволяют рассчитать промежуточные коэффициенты, а также: отношение толщины металла в нейтральном сечении к толщине металла, выходящего из зоны деформации; длину зоны деформации с учетом упругого сплющивания рабочих валков; угол контакта; изменение радиуса рабочего вала вследствие сплющивания (зависит от давления металла на валки); значения линейных скоростей движения полосы металла до и после деформации в зависимости от отношений толщин, угловой скорости вращения рабочего вала и его радиуса.

С учетом первого уравнения системы (2) математическая модель электропривода клетки с двигателем постоянного тока независимого возбуждения представлена в виде [7]:

$$\left. \begin{aligned}
 M_d - M_p + F_2 R - F_1 R &= J \frac{d\omega}{dt}, \\
 M_d &= C\Phi I, \\
 U - \omega C\Phi &= L \frac{dI}{dt} + RI
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток двигателя;  $C$  – конструктивная постоянная двигателя;  $L, R$  – суммарные индуктивность и активное сопротивление якорной цепи двигателя;  $I$  и  $U$  – ток и напряжение якорной цепи двигателя.

На основании рассмотренных математических зависимостей (1) – (3) разработана имитационная модель прокатного стана, которая показана на рис. 1, она представляет собой совокупность функциональных блоков: POLOSA\_1-POLOSA\_5 (межклетьевые промежутки), CAGE\_1 – CAGE\_4 (клетки) и Motor1 – Motor4 (электроприводы). Блоки: S и Sig задают механические свойства прокатываемой стали. Блоки: k1 – k7 задают коэффициенты, учитывающие изменение

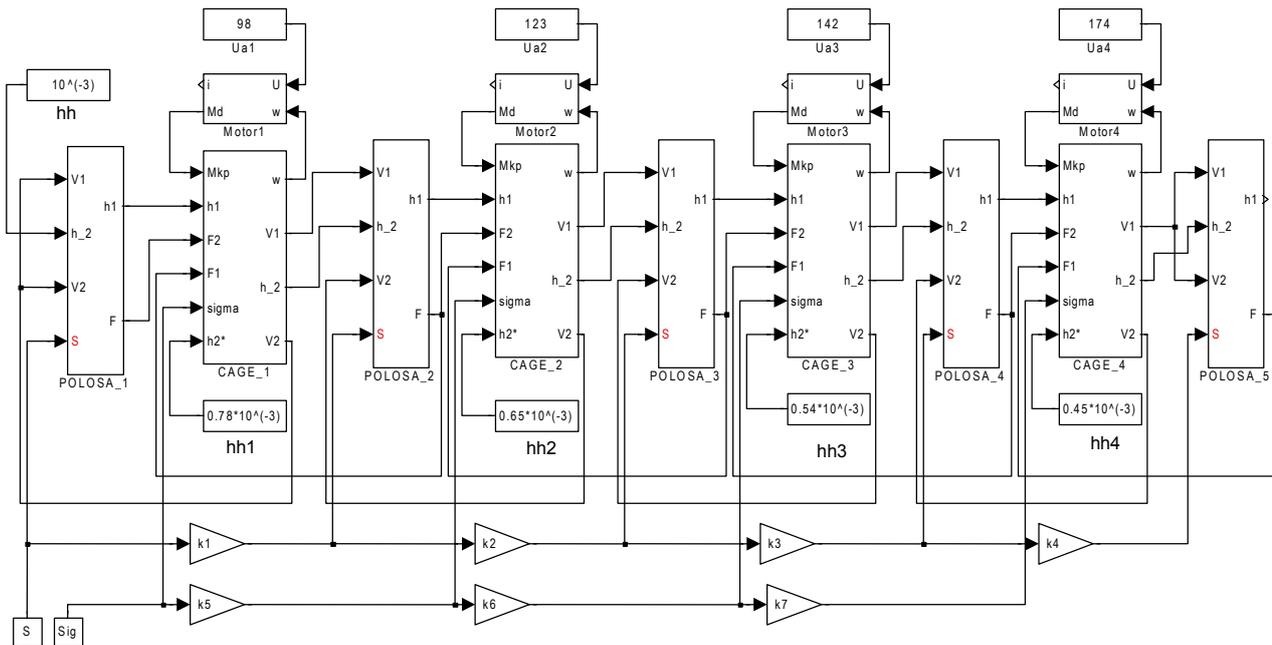


Рис. 1. Имитационная модель прокатного стана

механических свойств прокатываемой стали в зависимости от условий прокатки. Блок: hh задает толщину полосы металла до прокатки, а блоки: hh1 – hh4 задают растворы рабочих валков.

С использованием данной имитационной модели, выполненной в пакете Matlab, проведено моделирование электромеханических процессов в режиме постоянно заданных значений якорных напряжений приводных двигателей клетей (т. е. без использования систем автоматического управления данными приводами). Якорные напряжения приводных двигателей клетей подбирались расчетным путем из условия отработки требуемых значений межклетевых натяжений и в соответствии с технологическими условиями прокатки. В начальный момент пуска модели предполагалось, что металл заправлен во все клетки и заданы требуемые растворы рабочих валков блока: hh1 – hh4.

Результаты математического моделирования работы непрерывного прокатного стана приведены на рис. 2–рис. 5. Анализ данных результатов показывает, что частоты колебаний межклетевых натяжений металла, толщин металла, давлений металла на рабочие валки примерно одинаковы и составляют 9 Гц. Межклетевые натяжения меняются в тех же пределах, что и полученные на реальном прокатном стане, описанном в работе [8]. Исследования, проведенные на лабораторных станах в [9], также подтверждают наличие аналогичных колебаний. При этом выходные толщины металла колеблются со значениями, превышающими заданные растворы рабочих валков, что объясняется наличием эффекта сплющивания рабочих валков, происходящего в реальном процессе прокатки.

В установившемся режиме колебания толщины прокатываемой полосы металла после четвертой кле-

ти происходят в пределах 0,01 мм (по сравнению с максимальной толщиной металла, равной 0,49 мм, это составляет 2 %). Полученный результат находится в тех же пределах, что и снятые экспериментально данные в работе [8].

Результаты дополнительного математического моделирования, проведенного с целью определения влияния жесткости рабочих валков на переходные процессы при прокатке металла, приведены на рис. 3 и рис. 4, а также на рис. 5, б и рис. 5, в.

Как видно из рис. 5, а, в якорном токе наблюдаются незначительные колебания (с упомянутой частотой 9 Гц). Эти колебания тока (их амплитуда относительно невелика) вызваны колебаниями, происходящими в нагрузке привода. При этом для заданных параметров модели (жесткости прокатываемого металла, жесткости рабочих валков, растворов рабочих валков, напряжения на якорях приводных двигателей клетей) происходит обмен энергией между упругими валками и упругой полосой металла. С ростом натяжений уменьшаются давления на рабочие валки клетей, и уменьшается уровень сплющивания, что приводит к росту значения коэффициента:  $h_1 / h_2$ , используемого в системе (2), и изменению скоростей движения стальной полосы до и после клетки. Такие изменения скоростей могут приводить к изменению (увеличению) межклетевых натяжений. Исследования на модели при разных условиях прокатки показали, что подобные процессы могут проявлять себя по-разному в виде: незатухающих колебаний, нарастающих колебаний, затухающих колебаний либо как апериодический процесс.

Сравнивая между собой рис. 5, рис. 3 и рис. 4, можно сделать выводы, что при увеличении жесткости







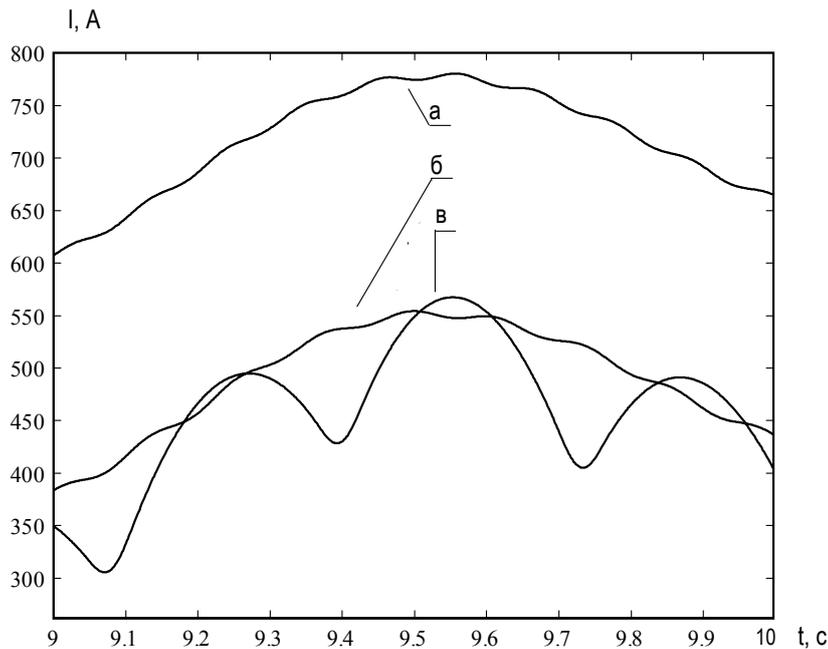


Рис. 5. Графики изменения якорного тока приводного двигателя четвертой клетки: а – при исходной жесткости рабочих валков; б – при двукратной жесткости рабочих валков; в – при трехкратной жесткости рабочих валков

рабочих валков прокатных клетей происходит: увеличение давления металла на валки, уменьшение уровня прогиба рабочих валков, а, соответственно, уменьшение амплитуды колебаний толщины прокатываемой стали и ее приближение к значениям растворов рабочих валков. Одновременно с увеличением жесткости рабочих валков происходит увеличение амплитуды колебаний токов приводных двигателей клетей, вызванных изменением межклетевых натяжений, что можно увидеть, сравнивая между собой рис. 5, а рис. 5, б и рис. 5, в. Уменьшение частоты колебаний связано с увеличением амплитуды колебаний межклетевых натяжений и с увеличением жесткости рабочих валков.

Исследования на полученной имитационной модели показали, что, во-первых, возможны режимы, при которых колебания межклетевых натяжений достигают нуля (это создает согласно рис. 4 условия для образования петель при движении полосы металла). Во-вторых, отсутствие систем автоматического управления, способных демпфировать колебания натяжений, может приводить к ухудшению качества продукции и даже к аварийным режимам. В-третьих, при вариациях параметров имитационной модели возможны режимы, когда колебания толщины металла не возникают, что позволяет предполагать возможность существования оптимального режима прокатки. В-четвертых, увеличение жесткости рабочих валков приводит к уменьшению неравномерности продольной толщины прокатываемой полосы металла, а также к увеличению амплитуды колебаний межклетевых натяжений и якорных токов приводных двигателей рабочих клетей.

### Выводы

1. Разработанная имитационная модель представляет собой дальнейшее развитие существующих имитационных моделей для исследования электро-механических процессов прокатных станов, в которой дополнительно осуществляется учет взаимовлияний натяжений, давлений металла на валки и изменений обжатий металла, возникающих вследствие сплющивания рабочих валков.

2. Полученная имитационная модель воспроизводит электро-механические процессы в четырехклетевом прокатном стане тонкого листа, близкие к реальным (результаты моделирования отличаются от экспериментальных данных менее, чем на 10 %).

3. Проведенные исследования с использованием полученной модели электроприводов клетей непрерывного тонколистового прокатного стана показали, что появление колебаний в межклетевых натяжениях прокатываемого металла во многом вызвано эффектом сплющивания рабочих валков и приводит к возникновению колебаний в толщине прокатываемой полосы металла.

4. Выбор рабочих валков с большей жесткостью позволяет уменьшить степень проявления эффекта сплющивания и увеличить степень влияния колебаний межклетевых натяжений на якорные токи приводных двигателей клетей.

### Перечень ссылок

1. В. Робертс. Холодная прокатка стали. – М: Металлургия, 1982. – 300 с.
2. Зеленов А. Б. Тертичник Н. В. Гулякин В. Г. Электропривод механизмов прокатных станов. – Харьков: Металлургуздат, 1963. – 340 с.

3. Грудев А. П. Теория прокатки. – М.: Интермет инжиниринг, 2001. – 280 с.
4. Пирожок А. В. Супрун А. А. Супрун Ю. А. Имитационные модели электромеханических процессов тонколистового стана холодной прокатки // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 34–42.
5. Мокрий Г. В. Борисов О. О. Моделювання динаміки листопрокатного стана і оптимізація управління процесом прокатки // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Вип. 74. – 2006. – С. 14–18.
6. Лукьянец В. А. Физические эффекты в машиностроении.: Справочник – М.: Машиностроение, 1993. – 224. с.
7. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 432 с.
8. Жуков С. Ф. Шамрай А. А. Синтез динамической линеаризованной модели клетки непрерывного стана холодного проката // Техн. електродинаміка. Тем. випуск: Електропривод. – 2006. – С. 48–53.
9. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1967. – 259 с.

Поступила в редакцию 20.12.07 г.

*Розроблена імітаційна модель електроприводів клітей безперервного тонколистового чотирикільцевого прокатного стана яка враховує ефект пружного стиснення робочих валків, з її допомогою виконані розрахунок та аналіз електромеханічних процесів стана.*

*Simulation model of uninterrupted thin sheet mill's electric drivers considering the worked rollers flattening effect was developed, and mathematical calculation and analysis of electromechanical mill processes were realized.*

УДК 621.313

А. В. Волков, С. М. Крикота

## Имитационная модель двухзвенного непосредственного преобразователя частоты, нагруженного на асинхронный двигатель

*Разработана имитационная модель двухзвенного непосредственного преобразователя частоты, нагруженного на асинхронный двигатель, предназначенная для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в преобразователе частоты и двигателе.*

В последние годы за рубежом и в Украине интенсивно проводятся работы по созданию частотно-регулируемых (ч-р) асинхронных электроприводов (ЭП) на основе новых типов статических преобразователей частоты (ПЧ) [1]. Среди них наиболее привлекательным является ч-р асинхронный ЭП с двухзвенным непосредственным преобразователем частоты (ДНПЧ) с широтно-импульсной модуляцией [2–6]. Данный ПЧ отличается хорошими энергетическими показателями и улучшенной электромагнитной совместимостью с питающей сетью, характеризуется уменьшенными массогабаритными и стоимостными показателями [2–5].

Для успешного промышленного внедрения асинхронного ЭП на основе ДНПЧ-ШИМ требуется предварительно всесторонне исследовать достигаемые посредством него электромеханические процессы и энергетические характеристики привода, определить наиболее эффективные алгоритмы управления этим электроприводом. При этом целесообразно основной объем данных исследований провести на имитационных моделях указанного ЭП, что позволит снизить трудоемкость этих исследований, расширить количество исследуемых возможных вариантов алгоритмов управления, ускорить во времени проведение данных исследований. Однако, в зарубежной и отечествен-

ной литературе до настоящего времени вопросу создания имитационных моделей асинхронного ЭП с ДНПЧ-ШИМ или его составных элементов (преобразователя частоты и двигателя) не уделено достаточного внимания, хотя это очень актуально и востребовано практикой.

Целью статьи является разработка имитационной модели двухзвенного непосредственного преобразователя частоты, нагруженного на асинхронный двигатель, предназначенной для исследования электромагнитных процессов в преобразователе частоты и электромеханических процессов в двигателе.

Силовая схема трехфазного ДНПЧ-ШИМ, нагруженного на асинхронный двигатель (АД), представлена на рис. 1 и содержит в своем составе: трехфазный активный выпрямитель (АВ), выполненный на управляемых силовых ключах VS1–VS6, VS1'–VS6' и трехфазный автономный инвертор напряжения (АИН), состоящий из управляемых силовых ключей VS7–VS12. В качестве указанных управляемых силовых ключей VS1–VS6, VS1'–VS6' и VS7–VS12 (шунтированных обратными диодами VD1–VD6, VD1'–VD6' и VD7–VD12 соответственно) могут применяться транзисторы IGBT или MOSFET и запираемые тиристоры GTO или IGCT.