

Переходные процессы в обмотке возбуждения двигателей постоянного тока при форсировке напряжения

¹**ЗАВЬЯЛОВ Валерий Михайлович**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой, VMZavyalov@sevsu.ru,

²**СИВЯКОВА Галина Александровна**, к.т.н., доцент, проректор по учебной работе, galina-siv@mail.ru,

^{2*}**ДРУЖИНИН Валерий Михайлович**, м.т.н., старший преподаватель, druzhinin_vm@mail.ru,

¹Севастопольский государственный университет, Россия, 299053, Севастополь,

ул. Университетская, 33,

²Карагандинский индустриальный университет, Казахстан, 101400, Темиртау, пр. Республики, 30,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Проанализированы возможности применения форсированного напряжения по цепи обмотки возбуждения. Рассмотрено применение данного способа управления для клеток чистовой группы стана горячей прокатки ЛПЦ-1 АО «АрселорМиттал Темиртау». Создана имитационная модель электропривода клетки чистовой группы стана горячей прокатки. Имитационная модель построена на основе стандартных блоков библиотеки Simulink (SimPowerSystems) из пакета прикладных программ Matlab. Построены графики тока в цепи обмотки возбуждения при номинальном и форсированном напряжении. Проведена оценка параметров моделирования и адекватности построенной модели. Результаты проверены и подтверждены в процессе имитационного моделирования. Целью статьи является разработка имитационной модели электропривода клетки чистовой группы стана горячей прокатки и оценка адекватности ее работы при форсировке напряжения в обмотке возбуждения.

Ключевые слова: прокатное производство, электропривод, машина постоянного тока независимого возбуждения, имитационное моделирование, оценка адекватности модели, форсировка напряжения.

Введение

Прокатное производство металлургической промышленности представляет собой комплекс большого числа электроприемников, взаимосвязанных в едином технологическом процессе. Программа индустриализации современного Казахстана и развитие автоматизации различных сфер производства предъявляют повышенные требования к производительности технологических агрегатов. Технологические механизмы прокатного производства, в соответствии с требованиями технологического процесса, относятся к высокоскоростным, высокопроизводительным и энергоемким агрегатам.

Особое внимание заслуживают электроприводы клеток чистовой группы станов горячей прокатки. Современные требования интенсификации производственного процесса требуют развития автоматических систем управления. Существующие в настоящее время системы автоматического управления электроприводами клеток чистовой группы требуют модернизации с целью поддержания требуемых показателей скоростных режимов прокатки и обеспечения высокого качества выпускаемой продукции.

Одним из основных недостатков существующих

способов регулирования скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением является большая величина постоянной времени его разгона. Это ограничивает возможности увеличения производительности двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, а вследствие этого, электроприводов клеток чистовой группы станов горячей прокатки [1].

В условиях непрерывного производства особую сложность представляют собой задачи исследования режимов работы электропривода клеток чистовой группы прокатного стана горячей прокатки непосредственно на производстве. Это определило цели и задачи данной работы.

Целью работы являются разработка имитационной модели электропривода клетки чистовой группы стана горячей прокатки и оценка адекватности ее работы при форсировке напряжения в обмотке возбуждения.

Теория вопроса

В условиях резкопеременной нагрузки, а именно в этих условиях работают электроприводы чистовой группы прокатных станов, повышаются требования к системам регулирования, так как параметры электропривода быстро меняют

свои значения, поэтому привод должен отличаться своим высоким быстродействием [2]. Это обеспечивается повышением кратности форсировки возбуждения и снижением постоянной времени системы возбуждения привода посредством использования тиристорных преобразователей, что приводит к увеличению скорости и качества процессов регулирования [3].

Для того чтобы при переходном процессе быстрее обеспечить изменение тока в обмотке возбуждения, максимальное напряжение возбуждения должно составлять 1-5 номинального значения, обычно применяют двукратную, а иногда пятикратную и даже большую форсировку напряжения возбуждения [4].

Описание материалов и методов анализа

Управление электроприводов клетей чистой группы станов горячей прокатки осуществляется от электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением с питанием от тиристорных преобразователей.

Математическое описание работы электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением по цепи якоря имеет вид [5]:

$$\begin{cases} U = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + c\Phi\omega + i_a R_T + L_T \frac{di_a}{dt}, \\ U - i_a R_T - L_T \frac{di_a}{dt} = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + c\Phi\omega, \\ M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \\ M = c\Phi i_a, \end{cases} \quad (1)$$

где U – напряжение питающей сети, В;

R_T – активное сопротивление силового трансформатора, Ом;

R_a – активное сопротивление якорной цепи двигателя, Ом;

L_T – индуктивное сопротивление силового трансформатора, Гн;

L_a – индуктивное сопротивление якорной цепи двигателя, Гн;

ω – угловая скорость двигателя, рад/с;

$c\Phi$ – коэффициент ЭДС при $\Phi = \text{const}$;

$c\Phi\omega$ – ЭДС двигателя, В;

i_a – ток якорной цепи, А;

M – электромагнитный момент, развиваемый двигателем, Н*м;

M_c – момент нагрузки электропривода, Н*м;

J_Σ – момент инерции механизма, кг*м².

Математическое описание работы электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, по цепи обмотки возбуждения имеет вид [6]:

$$\begin{cases} U = i_b R_b + L_b \frac{di_b}{dt}, \\ U_b = i_b R_b + 2p_{\Pi} \xi W_b p\Phi, \\ 0 = i_{bT} R_{bT} + 2p_{\Pi} \xi W_{bT} p\Phi, \\ F = i_b W_b + i_{bT} W_{bT}, \\ \Phi = f(F), \end{cases} \quad (2)$$

где U_b – напряжение обмотки возбуждения, В;

i_b – ток в обмотке возбуждения электродвигателя, А;

R_b – полное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

p_{Π} – число пар полюсов;

ξ – коэффициент, учитывающий, что часть потока рассеяния сцеплена не со всеми витками обмотки возбуждения;

W_b – число витков обмотки возбуждения;

W_{bT} – число витков фиктивной короткозамкнутой обмотки вихревых токов на полюс;

Φ – полезный магнитный поток одного полюса, Вб;

i_{bT} – ток в фиктивной короткозамкнутой обмотке, А;

R_{bT} – полное сопротивление фиктивной короткозамкнутой обмотки вихревых токов на полюс, Ом;

F – намагничивающая сила, Ампер-виток.

На основании уравнений (1) и (2) разработана имитационная модель с помощью пакета прикладных программ Matlab (версия Matlab 9.7.0.11 (R2019b)) из библиотеки SimPowerSystems интегрированного в него продукта Simulink [7]. В модели использованы параметры электропривода клетки №6 чистой группы стана горячей прокатки 1700 ЛПЦ-1 АО «АрселорМиттал Темиртау» [8]. Имитационная модель отличается от традиционной модели, собираемой в виде структурной схемы с подчиненным регулированием, построенной на основе последовательно собираемых элементов, реализующих передаточные функции соответствующих объектов регулирования.

Из раздела Machines библиотеки SimPowerSystems выбираем стандартный блок модели машины постоянного тока DC Machine [9, 10].

Выводы F+ и F– служат для подключения напряжения возбуждения для создания магнитного потока в машине. Выводы A+ и A– используются для подключения обмотки якоря на силовой источник питания. Выходные параметры двигателя: частота вращения, ток обмотки якоря I_a , ток возбуждения I_f и электромагнитный момент T_e формируются на мультиплексорной шине m . Чтобы получить доступ к выходным параметрам, необходимо использовать демультимплексор на четыре выхода и соединить его вход с выходом m . Тогда на первом (верхнем) выходе действует частота вращения, на втором – ток обмотки якоря, на третьем – ток возбуждения и на четвертом – электромагнитный момент двигателя [11].

Разработанная имитационная модель представлена на рисунке 2.

В качестве силового источника питания обмотки якоря используется источник постоянного напряжения DC Voltage Source.

Питание обмотки возбуждения осуществляется от тиристорного преобразователя Universal Bridge.

Блок Synchronized 6-Pulse Generator позволяет

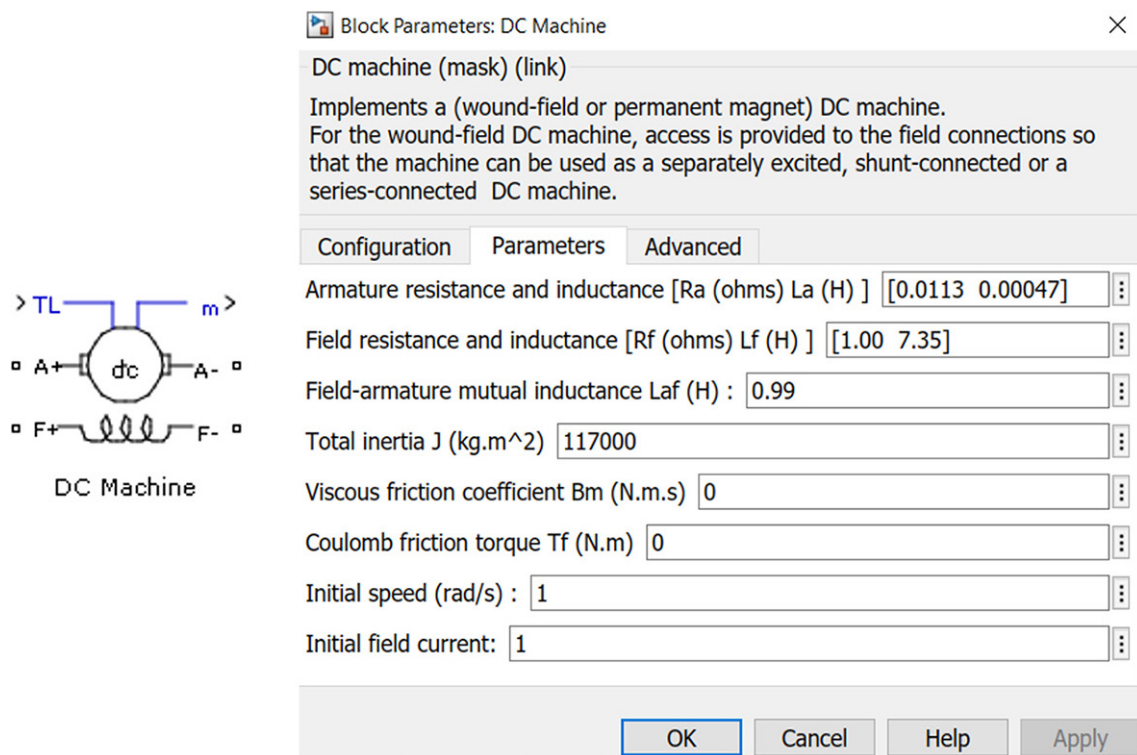


Рисунок 1 – Условное изображение машины постоянного тока и ее параметры в библиотеке SimPowerSystems

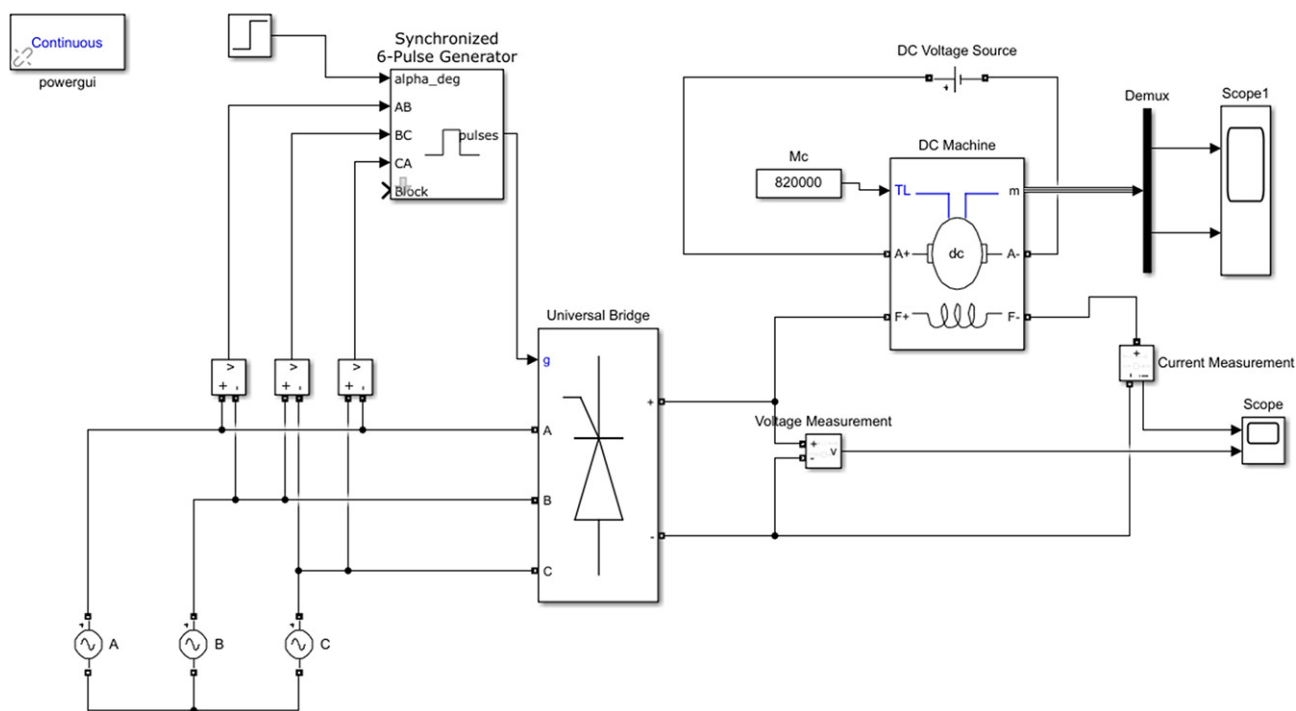


Рисунок 2 – Имитационная модель электропривода

реализовать генератор синхронизированных импульсов для запуска тириستоров шестипульсного преобразователя.

312 Блок Voltage Measurement и блок Current Measurement позволяют проводить измерения

напряжения и тока в соответствующих цепях.

На выходах демультиплексора m действуют сигналы частоты вращения, тока двигателя, тока обмотки возбуждения и электромагнитного момента.

Осциллограф Scope фиксирует изменение подаваемых на его входы сигналов скорости и тока в якорной цепи двигателя постоянного тока с независимым возбуждением во времени, с отражением изменения фиксируемых величин в виде осциллограмм графиков переходных процессов.

Осциллограф Scope фиксирует изменение подаваемых на его входы сигналов тока и напряже-

ния в цепи обмотки возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением во времени, с отражением изменения фиксируемых величин в виде осциллограмм графиков переходных процессов.

На рисунке 3 и 4 представлены диаграммы тока в цепи обмотки возбуждения, полученные в результате моделирования, при номинальных

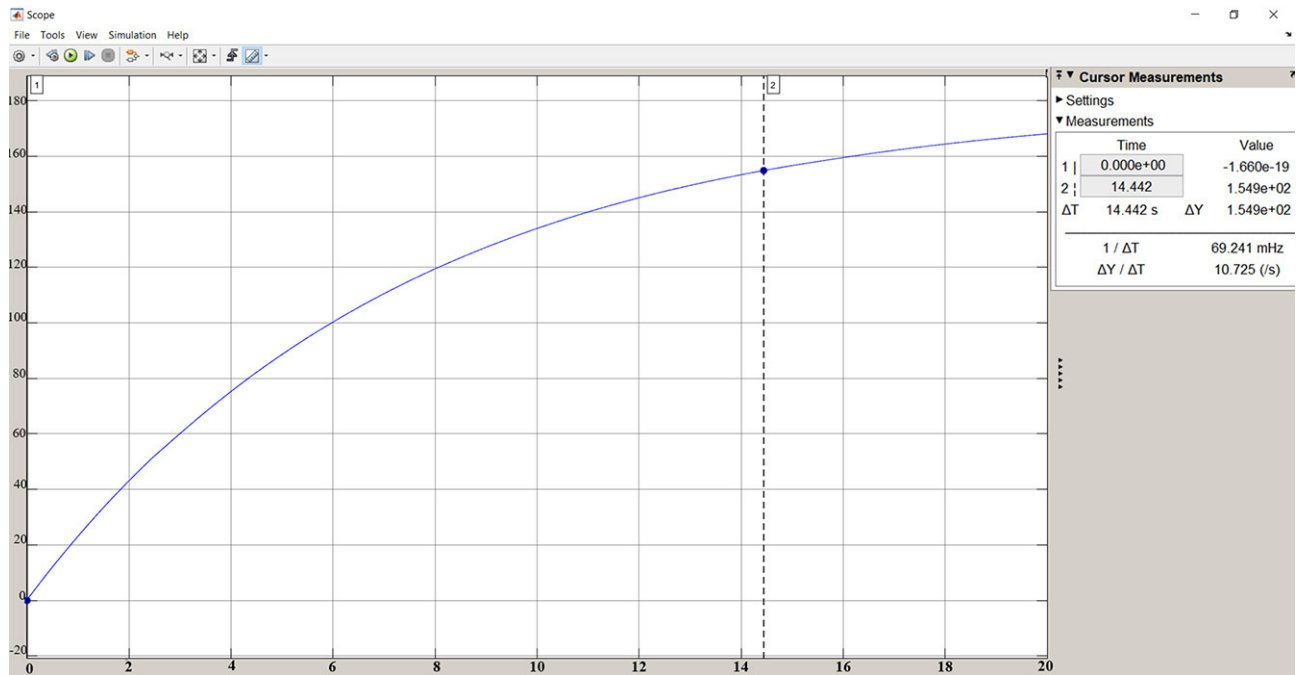


Рисунок 3 – График изменения тока в обмотке возбуждения при номинальном напряжении возбуждения электродвигателя

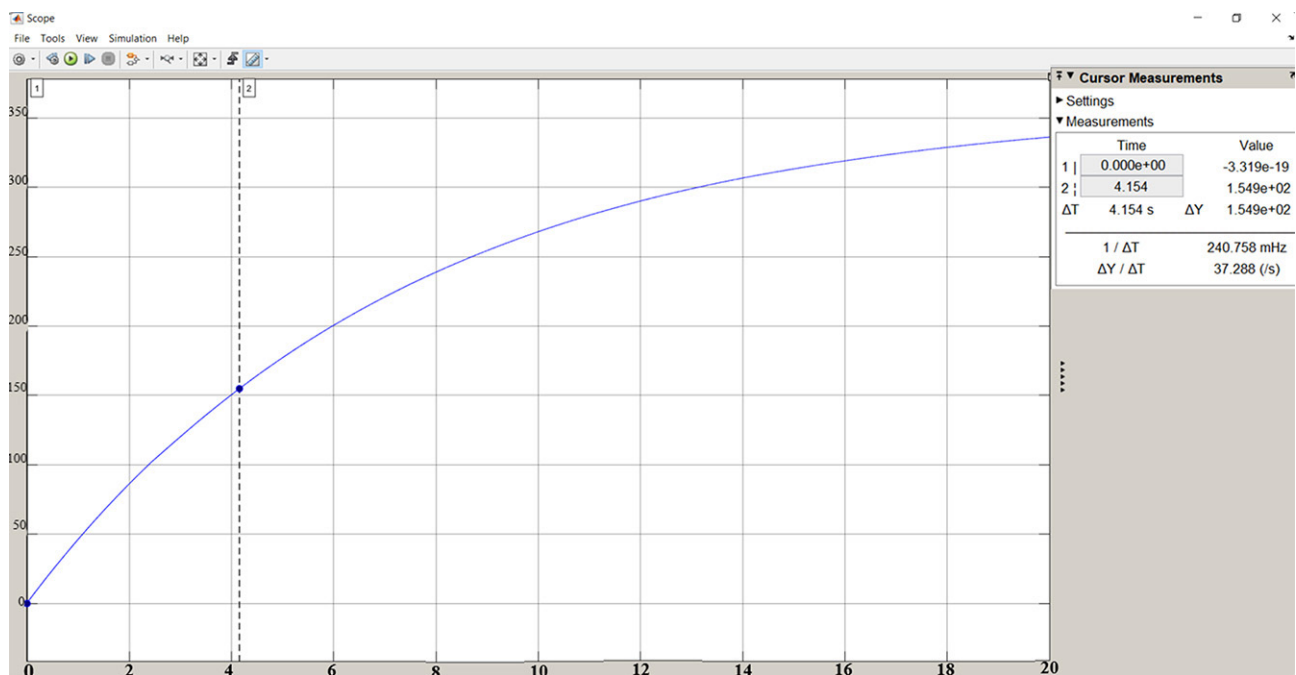


Рисунок 4 – График изменения тока в обмотке возбуждения при форсированном напряжении возбуждения электродвигателя

значениях (рисунок 3) и форсированном значении напряжения возбуждения (рисунок 4).

В таблице представлены результаты имитационного моделирования, а именно:

1) номинальные параметры электродвигателя, определяемые технологией производства [12]: номинальный ток якорной цепи I_a , А; номинальная скорость электродвигателя, w , рад/с; номинальный ток в обмотке возбуждения, I_b , А;

2) результаты имитационного моделирования;

3) допустимые отклонения результатов имитационного моделирования от действительных параметров электропривода.

В ходе проведения моделирования для оценки каждого параметра электропривода проводилось 50-60 экспериментов с относительной погрешностью, не превышающей 10% при доверительной вероятности 90%. Доверительную вероятность выбирают равной 0,90; 0,95 или 0,99, чтобы получить интервал, который с большой вероятностью накроет истинное значение оцениваемого параметра [13].

Таким образом, сравнительные показатели номинальных параметров электропривода и параметры, полученные при имитационном моделировании, не превышают 10%, т.е. находятся в допустимом пределе отклонений допускаемых для подобных расчетов. Это свидетельствует об адекватности построенной имитационной модели и возможности использования ее при дальнейших исследованиях.

Обсуждение результатов

Из диаграммы тока в цепи обмотки возбужде-

ния при номинальном значении напряжения возбуждения, представленной на рисунке 3, видно, что время достижения номинального требуемого значения тока возбуждения составляет 14,442 сек, а при форсированном (двухкратном) напряжении возбуждения (рисунок 4) составляет – 4,154 сек. Таким образом, время достижения требуемого значения при форсировке напряжения возбуждения сокращается в 3,5 раза. Результаты моделирования показывают, что форсировка напряжения цепи возбуждения позволяет повысить быстродействие рассматриваемой системы управления электроприводом клетки чистовой группы прокатного стана горячей прокатки.

Выводы

Результаты проведенной работы позволяют сделать следующие выводы:

1) Сравнительный анализ показателей координат электропривода, полученных при имитационном моделировании, не превышает 10% номинальных. Это свидетельствует об адекватности построенной имитационной модели и возможности использования ее при дальнейших исследованиях.

2) Результаты моделирования показывают, что форсировка напряжения цепи возбуждения позволяет повысить быстродействие рассматриваемой системы управления электроприводом клетки чистовой группы прокатного стана горячей прокатки.

3) Предложенная модель может быть использована для исследования режимов работы электроприводов станов горячей прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: учебное пособие / Л.С. Удуг, Н.В. Кояин, О.П. Мальцева. – 2-е изд. перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 152 с.
2. Сивякова Г.А., Дружинин В.М. Разработка модели для исследования системы «питающая сеть – тиристорный преобразователь – нагрузка» чистовых клеток НШПС – 1700 // Республиканский журнал «Труды Университета». Караганда: Издательство КарГТУ. 2011. № 4. – 90 с.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. 6-е изд., доп. и перераб. – Москва: Энергоиздат. 1981. – 576 с.
4. Лабунцов В.А. Энергетическая электроника: Справочное пособие / Под редакцией Лабунцова В.А. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. 464 с.
5. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф. пед. ун-т», 2008. – 279 с.
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. Ленинград: Энергоиздат, 1982. – 392 с.: ил.
7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – Москва: ДМК Пресс. 2014 – 288 с.: ил.
8. Breido I.V., Druzhinin V.M. Analysis of the influence of the parameters of the power supply network on the operating modes of the electric drives of the stands of the hot rolling mill 1700 of ArcelorMittal Temirtau JSC / I.V. Breido, V.M. Druzhinin. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012056 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. – 12056.
9. Терехин В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 307 с.
10. Shokhin V.V., Andreev A.I. and Morkovina P.S. 2017. Simulation of a Rolling Mill Using Physical and Mathematical Models. Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]. no. 2 (35), pp. 13-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18).
11. Терехин В.Б. Разработка моделей элементов и систем автоматизированного электропривода в среде Matlab: Учебное пособие. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – 511 с.

12. ТИ ПГ-01-2018 Технологическая инструкция «Горячая прокатка полос в листопрокатном цехе №1» АО «АрселорМиттал Темиртау». Темиртау, 2018. – 79 с.
13. Ерещенко Т.В., Михайлова Н.А. Планирование эксперимента: учебно-практическое пособие / Министерство образования и науки Российской Федерации, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. – Волгоград: Издательство ВолгГАСУ, 2014. – 78 с.

Кернеуді мәжбүрлеу кезінде тұрақты ток қозғалтқыштарының қоздыру орамасындағы өтпелі процестер

¹**ЗАВЬЯЛОВ Валерий Михайлович**, т.ғ.д., доцент, кафедра меңгерушісі, VMZavyalov@sevsu.ru,

²**СИВЯКОВА Галина Александровна**, т.ғ.к., доцент, оқу ісі жөніндегі проректоры, galina-siv@mail.ru,

^{2*}**ДРУЖИНИН Валерий Михайлович**, т.ғ.м., аға оқытушы, druzhinin_vm@mail.ru,

¹Севастополь мемлекеттік университеті, Ресей, 299053, Севастополь, Университетская көшесі, 33,

²Қарағанды индустриалды университеті, Қазақстан, 101400, Темиртау, Республика даңғылы, 30,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қоздыру орамасының тізбегі бойымен мәжбүрлі кернеуді қолдану мүмкіндіктері талданады. Басқарудың осы тәсілін «АрселорМиттал Темиртау» АҚ ЛПЦ-1 ыстық илектену орнағының таза тобындағы клеттер үшін қолдануы қарастырылады. Ыстық илектену станциясының соңғы тобының электр жетегінің имитациялық моделі жасалды. Имитациялық моделі Matlab қолданбалы бағдарламалар пакетінен Simulink (SimPowerSystems) кітапханасының стандартты блоктары негізінде жасалған. Номиналды және мәжбүрлі кернеу кезінде қоздыру орамасының тізбегіндегі ток графиктері салынды. Модельдеу параметрлері мен құрастырылған модельдің жеткіліктілігі бағаланады. Нәтижелер имитациялық модельдеу процесінде тексерілді және расталды. Мақаланың мақсаты ыстық илектену станциясының соңғы тобының клетінің электр жетегінің модельдеу моделін жасау және қоздыру орамасындағы кернеуді күшейту кезінде оның жұмысының сәйкестігін бағалау болып табылады.

Кілт сөздер: прокат өндірісі, электр жетегі, тәуелсіз қоздырушы тұрақты ток машинасы, имитациялық модельдеу, модельдің жеткіліктілігін бағалау, кернеуді мәжбүрлеу.

Transition Processes in the Rotation of the DC Motor Excitation During Voltage Booming

¹**ZAVYALOV Valeriy**, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Head of Department, VMZavyalov@sevsu.ru,

²**SIVYAKOVA Galina**, Cand. Tech. Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, galina-siv@mail.ru,

^{2*}**DRUZHININ Valeriy**, Mast. Tech. Sci., Senior Lecturer, druzhinin_vm@mail.ru,

¹Sevastopol State University, Russia, 299053, Sevastopol, Universitetskaya Street, 33,

²Karaganda Industrial University, Kazakhstan, 101400, Temirtau, Republic Avenue, 30,

*corresponding author.

Abstract. Analyzed the possibility of using the forced voltage over the excitation winding chain. The use of this method of controls for the crates of the finishing group of hot rolling mill LPC-1 «ArselorMittal Temirtau» JSC is considered. A simulation model of the electric drive of the crate group of the milling rolling mill is created. The simulation model is built on the basis of standard blocks of the Simulink library (SimPowerSystems) from the MATLAB application package. Current graphs are constructed in the excitation winding circuit at nominal and forced voltage. An assessment of the modeling parameters and the adequacy of the constructed model. The results are verified and confirmed in the process of simulation. The purpose of the article is to develop a simulation model of the electric drive of the crate of the finishing group of the hot rolling mill and to assess the adequacy of its operation when forcing the voltage in the excitation winding.

Keywords: rolling production, electric drive, independent excitation direct current machine, simulation modeling, model adequacy assessment, voltage forcing.

REFERENCES

1. Proektirovanie i issledovanie avtomatizirovannykh elektroprivodov. Ch. 3. Elektricheskie mashiny postoyannogo toka v sistemah avtomatizirovannogo elektroprivoda: uchebnoe posobie / L.S. Udut, N.V. Koyain, O.P. Mal'ceva. – 2-e izd. pererab. i dop. – Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2007. – 152 p.
2. Sivyakova G.A., Druzhinin V.M. Razrabotka modeli dlya issledovaniya sistemy «pitayushchaya set' – tiristornyy preobrazovatel' – nagruzka» chistovykh kletej NShPS – 1700 // Respublikanskij zhurnal «Trudy Universiteta». Karaganda: Publ. KarGTU. 2011. No. 4. – 90 p.
3. Chilikin M.G., Sandler A.S. Obshchij kurs elektroprivoda. 6-e izd., dop. i pererab. – Moscow: Energoizdat. 1981. – 576 p.
4. Labuncov V.A. Energeticheskaya elektronika: Spravochnoe posobie / Pod redakciej Labuncova V.A. – Moscow: Energoatomizdat, 1987. 464 p.
5. Shrejner R.T. Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov: Uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Publ. GOU VPO «Ros. gos. prof. ped. un-t», 2008. – 279 p.
6. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskij G.G. Upravlenie elektroprivodami: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Leningrad: Energoizdat, 1982. – 392 p.: il.
7. Chernyh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. – Moscow: DMK Press. 2014. – 288 p.: il.
8. Breido I.V., Druzhinin V.M. Analysis of the influence of the parameters of the power supply network on the operating modes of the electric drives of the stands of the hot rolling mill 1700 of ArcelorMittal Temirtau JSC / I.V. Breido, V.M. Druzhinin. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012056 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 966. – 12056.
9. Terekhin V.B., Dement'ev Yu.N. Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink: Uchebnoe posobie. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2015. – 307 p.
10. Shokhin V.V., Andreev A.I. and Morkovina P.S. 2017. Simulation of a Rolling Mill Using Physical and Mathematical Models. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]. no. 2 (35), pp. 13-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18).
11. Teryohin V.B. Razrabotka modelej elementov i sistem avtomatizirovannogo elektroprivoda v srede Matlab: Uchebnoe posobie. – Seversk: STI NIYaU MIFI, 2017. – 511 p.
12. TI PG-01-2018 Tekhnologicheskaya instrukciya «Goryachaya prokatka polos v listoprokatnom cekhe №1» AO «ArcelorMittal Temirtau». Temirtau, 2018. – 79 p.
13. Ereshchenko T.V., Mihajlova N.A. Planirovanie eksperimenta: uchebno-prakticheskoe posobie / Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, Volgogradskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. – Volgograd: Izdatel'stvo VolgGASU, 2014. – 78 p.