
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

*Посвящается 100-летию
со дня рождения ректора СМИ,
доктора технических наук,
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2021»**

***Труды
XXII Международной научно-практической конференции***

10 – 11 ноября 2021 г.

Часть 2

**Новокузнецк
2021**

кобойников, Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 224 с.

9. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии. Кемерово, Москва : Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 431 с.

10. Стерлигов В.В., Евтушенко В.Ф., Зайцев В.П. Применение планирования эксперимента при исследовании конвективного теплообмена. Сообщение 2, Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1974, № 2, С. 165-169.

11. Mramba, L.K., Gezan, S.A. Evaluating algorithm efficiency for optimizing experimental designs with correlated data/. (2018) Algorithms, 11 (12), статья № 212, DOI: 10.3390/a11120212.

УДК621.3.078

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА РЕЛЬСОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПО СИСТЕМЕ «ПЧ-СД» С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Зайцев Н.С.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, vladimir.kuznezoff@yandex.ru, kuzlana00@yandex.ru, gralb@list.ru*

Аннотация. Разработана модель электропривода вращения валков реверсивного прокатного стана рельсового цеха по системе «Преобразователь частоты – синхронный двигатель» с двухзонным регулированием скорости и векторным управлением. Приведены схемы и характеристики отдельных элементов модели. Выполнено осциллографирование основных параметров модели. Приведенные осциллограммы переходных процессов, полученные в результате моделирования, соответствуют параметрам электропривода BD1 рельсобалочного цеха, что доказывает адекватность модели.

Ключевые слова: электропривод, моделирование, прокатный стан, синхронный двигатель, преобразователь частоты, двухзонное регулирование, векторное управление, осциллограммы переходных процессов.

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE RAIL PRODUCTION ROLLING MILL ACCORDING TO THE FC-SM SYSTEM WITH TWO-ZONE SPEED CONTROL

Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S., Zaitsev N.S.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, vladimir.kuznezoff@yandex.ru, kuzlana00@yandex.ru, gralb@list.ru*

Abstract. A model of the electric drive of rotation of the rolls of a reversible rolling mill of a rail shop has been developed according to the system: frequency converter - synchronous motor with two-zone speed control and vector control. Schemes and characteristics of individual elements of the model are given. Oscillography of the main parameters of the model has been performed. The presented oscillograms of transient processes obtained as a result of the simulation correspond to the parameters of the BD1 electric drive of the rail and structural shop, which proves the adequacy of the model.

Keywords: electric drive, modeling, rolling mill, synchronous motor, frequency converter, two-zone regulation, vector control, oscillograms of transient processes.

Современные металлургические комбинаты с полным металлургическим циклом включают в себя ряд отдельных взаимосвязанных технологических стадий, оказывающих непосредственное влияние на качество получаемой конечной продукции. Основным и в то же вре-

мя завершающим этапом данного цикла является прокатка металла в конечное изделие.

Требования к электроприводу прокатной клетки формулируются в соответствии с особенностями его работы, к которым относятся большое число включений (до 1500 в час), ударный характер нагрузки, превышающей номинальную нагрузку двигателя, разгон и торможение двигателя с металлом в валках; кроме того, большую часть цикла привод работает в переходных режимах [1].

В настоящий момент при создании безредукторных тихоходных электроприводов металлургического оборудования, отличающихся повышенными требованиями к быстродействию, перегрузочной способности и качеству регулирования частоты вращения, а также в качестве приводов размольных агрегатов повышенной производительности в горнорудной, цементной и химической промышленности широкое распространение получили электроприводы, построенные по системе «Преобразователь частоты – синхронный двигатель» (ПЧ-СД).

Решающими преимуществами синхронных двигателей (СД) являются отсутствие ограничений, свойственных прокатным двигателям постоянного тока по мощности, перегрузочной способности и скорости нарастания тока, а также сложного в обслуживании щеточно-коллекторного устройства, и возможность существенного улучшения динамических показателей путём изменения конструкции машины [2].

Синхронные двигатели большой мощности в комплекте с преобразователями частоты применяются в главных приводах реверсивных прокатных станов. В настоящее время прокатные станы, как правило, являются мощными, глубоко электрифицированными и автоматизированными комплексами, включающими в себя значительное число электроприводных установок [3]. Среди последних главную роль играет электропривод вращения валков рабочей клетки (главный электропривод), работа которого оказывает прямое влияние на эффективность эксплуатации стана в целом. Электропривод реверсивных станов горячей прокатки, в соответствии с технологией его работы должен осуществлять работу как до, так и выше основной скорости. Таким образом, становится очевидным, что развитие прокатного производства неразрывно связано с усовершенствованием главного электропривода.

Модернизация электропривода вращения валков может осуществляться как за счет технического перевооружения его силовой и слаботочной частей, так и за счет новаторских решений, применяемых при построении систем автоматического управления.

Совершенствование силовой части электропривода, начиная с середины предыдущего столетия, практически полностью зависит от уровня развития промышленной полупроводниковой электроники [3]. Так появление в конце прошлого века силовых полностью управляемых вентилей, которые в настоящее время составляют основу подавляющего большинства частотных преобразователей, задавало направление на переход к энергоэффективному регулируемому электроприводу переменного тока, автоматизация которого до недавнего времени была крайне затруднена по техническим соображениям [4]. Не стал исключением и главный электропривод прокатных станов, в котором устаревшие по современным меркам системы «Тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д) и «Генератор-двигатель» (Г-Д) вытесняются более совершенной системой «ПЧ-СД». Примерами использования частотно-регулируемого синхронного электропривода в прокатном производстве в отечественной среде могут служить электроприводы, установленные на клетях прокатных станов АО «ЕВРАЗ ЗСМК», электропривод толстолистового стана горячей прокатки 5000 ОАО «ММК» и др. [4,5].

Развитие слаботочной части базируется на совершенствовании цифровых вычислительных технологий, внедрении более точных и качественных измерительных устройств для отслеживания требуемых координат [6]. Наблюдается повсеместный переход от аналоговых систем управления, элементной базой которых выступали операционные усилители, к более совершенным системам, управляющим звеном которых являются микроконтроллеры.

К сожалению, внедрение синхронного электропривода в прокатное производство в отечественной практике сопряжено с возникновением ряда проблем, которые зачастую не позволяют использовать его возможности в полной мере [7, 8]. Данные проблемы имеют комплексный характер, поскольку их возникновение связано как с особенностями самого

синхронного двигателя, так и с вопросами построения САУ ЭП.

Типовые системы автоматического управления синхронным электроприводом также имеют ряд проблем, которые ограничивают его предельные возможности, что соответствующим образом сказывается на производительности прокатного стана. Двухзонное регулирование скорости в устаревших типовых схемах осуществляется, как правило, за счет ограничения потокосцепления от магнитного потока статора или рассеяния во второй зоне, что приводит к ограничению перегрузочной способности электропривода [8].

Необходимо отметить, что такие упрощения, как линеаризация нелинейных элементов синхронного двигателя, неучет несинусоидальности, гармонических составляющих и колебаний мощности питающих высоковольтных сетей, применения для вычисления важнейших параметров электропривода, используемых для обратных связей, моделей, которые в силу вышесказанного не в полной мере соответствуют реальным параметрам электропривода, а также закрытые для изучения отдельные части импортных схем («Noy-hay») приводят к необходимости постоянного и системного исследования динамических и статических режимов синхронного электропривода с целью повышения его качества и надежности [4, 8].

Таким образом, создание и анализ модели электропривода по системе «ПЧ-СД» с векторным управлением и двухзонным регулированием скорости его вращения для использования в современных прокатных станах, актуальны и имеют практическую ценность. Настройка систем ПЧ-СД достаточно сложна по сравнению с системами «ТП-Д», поэтому использование методов синтеза и анализа вновь созданных моделей электроприводов позволяет, используя эмпирические и типовые способы настройки модели электропривода, решать проблемные вопросы.

Основной задачей настоящей работы является моделирование элементов и систем управления электроприводом вращения валков черновой клетки рельсобалочного стана. За основу взят электропривод BD1 рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ-ЗСМК».

Электрооборудование, применяемое в силовой части аналогично тому, что используется в электроприводе вращения валков реверсивной прокатной клетки стана BD1 РБЦ [8]. В качестве прокатного применяется синхронный двигатель типа AMZ900L TO8L SB / DH51 3867-20V фирмы ABB Switzerland Ltd. Статорная обмотка двигателя получает питание от трехуровневого преобразователя частоты типа ASC 6000. Преобразователь частоты является инвертором напряжения, состоящим из трех частей: источника постоянного напряжения (ARU), звена постоянного тока (СВУ) и собственно инвертора (INU). Для сглаживания выпрямленного напряжения и исключения бросков тока после выпрямителя устанавливается батарея конденсаторов, предварительная зарядка которой осуществляется за счет трансформатора для заряда и подмагничивания. Обмотка возбуждения СД получает питание от тиристорного возбудителя.

Ниже приведены паспортные данные синхронного двигателя типа AMZ900L TO8L SB / DH51 3867-20V:

- рабочий цикл – S1;
- число полюсов – 8;
- выходная мощность – 4000 кВт;
- номинальное напряжение статора – 3165 В;
- номинальный ток статора – 744 А;
- коэффициент мощности – 1;
- частота при скорости вращения 310 об/мин– 20,67 Гц;
- частота при скорости вращения 982 об/мин– 65,47 Гц;
- номинальная скорость вращения – 310 об/мин;
- максимальная скорость вращения – 982 об/мин;
- номинальный крутящий момент – 132 кНм;
- перегрузочная способность – 2,5;
- тип возбуждения – щеточный;
- номинальный ток возбуждения – 190 А;
- минимальный ток возбуждения – 154 А;

- номинальное напряжение возбуждения – 168 В
- потери на возбуждение – 31 кВт;
- потери на вентиляцию – 32 кВт.

Математическое описание СД производится на основе системы уравнений Парка-Горева в операторной форме [9].

$$\begin{cases} u_{sd} = i_{sd}R_s + p\psi_{sd} - \omega_{\Sigma}\psi_{sq}; \\ u_{sq} = i_{sq}R_s + p\psi_{sq} + \omega_{\Sigma}\psi_{sd}; \\ u_f = R_f i_f + p\psi_f; \\ \psi_{sd} = i_{sd}L_{sd} + i_f M_{df}; \\ \psi_{sq} = i_{sq}L_{sq}; \\ \psi_f = \frac{3}{2}i_{sd}M_{df} + i_f L_f; \\ M = \frac{3}{2}Z_p(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}); \\ M - M_c = Jp\omega. \end{cases}, \quad (1)$$

где u_{sd}, u_{sq}, u_f – проекции пространственного вектора напряжения статора по осям d, q соответственно и напряжение обмотки возбуждения;

i_{sd}, i_{sq}, i_f – проекции пространственного вектора тока в статорной обмотке по осям d, q соответственно и ток в обмотке возбуждения;

ω_{Σ} – скорость вращения ротора в электрическом пространстве: $\omega_{\Sigma} = \omega Z_p$;

$\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_f$ – проекции потокосцепления от магнитного поля статора по осям d, q соответственно и потокосцепление обмотки возбуждения;

M_{df} – коэффициент взаимной индуктивности между ОБ и обмоткой статора по оси d.

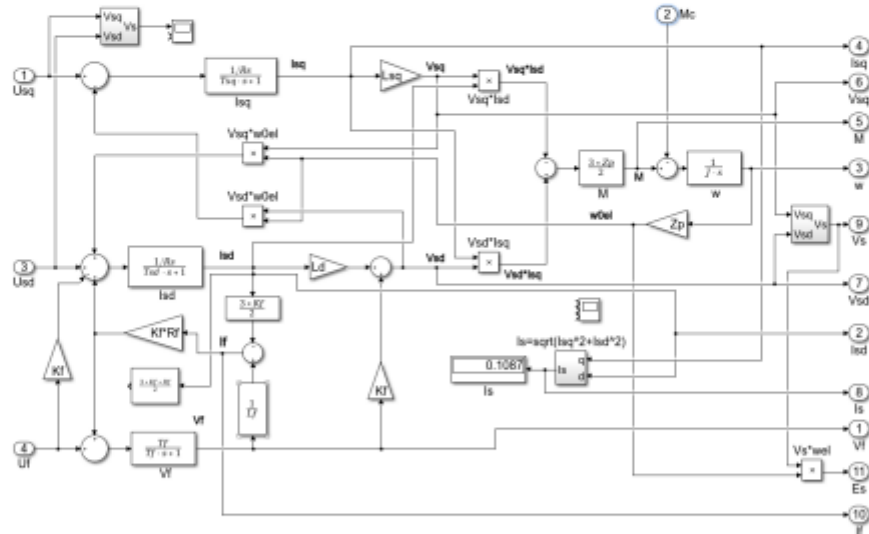


Рисунок 1 – Модель синхронного двигателя

Имитационная модель синхронного двигателя с явно выраженными полюсами представлена на рисунке 1.

Входными координатами синхронного двигателя являются напряжения статора по осям d и q и напряжение на обмотке возбуждения: u_{sd}, u_{sq} и u_f соответственно.

Выходными координатами электропривода будут являться проекции по осям d и q тока, протекающего в обмотке статора; проекции потокосцепления по осям d и q от магнитного потока статора; потокосцепление от магнитного потока ОБ; момент на валу электродвигателя; угловая скорость ротора и ЭДС вращения: $i_{sd}, i_{sq}, \psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_f, M, \omega$.

Математическое описание синхронного двигателя выполнено в системе координат $d-q$, вращающейся вместе с ротором с синхронной скоростью ω . Параметры синхронной машины вычисляются из приведенных паспортных данных, а также Протоколов измерений и испытаний, представленных заводом-изготовителем. Построение модели синхронной машины в имитационной среде MATLAB Simulink производится на основе системы уравнений (1).

На рисунке 2 показана разработанная модель системы регулирования параметров синхронного электродвигателя. Система подчиненного регулирования содержит два внутренних контура тока по осям $d-q$, включающих ПИ-регуляторы тока PT_d , PT_q , датчики тока DT_d , DT_q , и преобразователь частоты ПЧ с коэффициентом усиления $K_p=445$ и малой постоянной времени $0,005$ сек. Для компенсации перекрестных связей в двигателе $V_{sq} \cdot \omega_{0el}$, $V_{sd} \cdot \omega_{0el}$ реализован блок компенсации на базе трех датчиков $ДС1$, $ДН1$, $ДН2$ с коэффициентами усиления соответственно K_w, K_{sq} , K_{sd} и двух блоков $БК1$, $БК2$, передаточные функции которых указаны на схемах блоков. Внешним контуром регулирования является контур скорости, имеющий в своем составе П-регулятор скорости $РС$ и датчик скорости $ДС$. Ограничение максимального момента электропривода осуществляется в блоке ограничения максимального момента БТО, который ограничивает сигнал регулятора скорости, пропорциональный максимальному моменту электродвигателя в соответствии с документацией завода-изготовителя. В БТО реализована следующая зависимость: вплоть до номинальной скорости 310 об/мин величина ограничения максимальная, что соответствует максимальному моменту на валу двигателя – $2,5 \cdot 132 \text{ кН} \cdot \text{м} = 330 \text{ кН} \cdot \text{м}$, а при максимальной скорости 982 об/мин напряжение ограничения снижается в 4 раза. Аппаратная реализация этой зависимости реализована в блоке БФЗО. Регулирование потокосцепления Ψ_f во второй зоне осуществляется двухконтурной системой управления, состоящей из внутреннего контура потокосцепления обмотки возбуждения (далее потока), содержащего ПИ-регулятор потока $РПВ$, датчика потока $ДПВ$, а также тиристорного возбудителя $ТПВ$ с коэффициентом усиления 52 и малой (некомпенсированной) постоянной времени $T_\mu=0.05$ сек, а также внешнего контура ЭДС (рисунок 3) в составе И-регулятора ЭДС и датчика ЭДС. Для получения положительной полярности ЭДС в реверсивных режимах работы электропривода в схему введен блок выпрямления. Сигнал ограничения БО $U_{зпв}$ определяет величину номинального тока возбуждения, а напряжение $U_{ес}$ – значение ЭДС, при которой начинается регулирование скорости во второй зоне. Все контуры регулирования настроены на модульный оптимум.

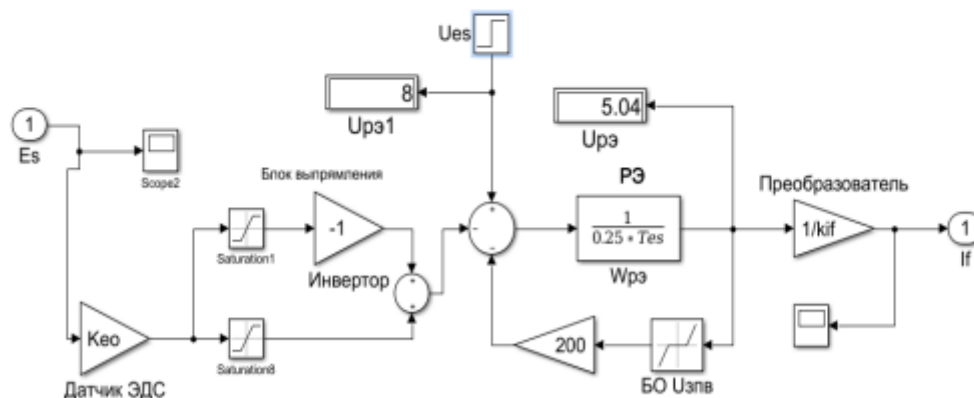


Рисунок 3 – Контур ЭДС электродвигателя

Блоки «БН1», «БН2» и «БН3» реализуют нелинейные зависимости. Форма выходных сигналов блоков нелинейностей приводится на рисунке 4 (а, б, в). С помощью входного сигнала «Uзс» формируется напряжение задания на скорость, темп изменения которого регулируется с помощью задатчика интенсивности «ЗИ». Второй вход САУ «UзVб» служит для предварительного создания потокосцепления от магнитного потока ОВ. Входной сигнал «Мс» имитирует статическую нагрузку, прикладываемую к электродвигателю в процессе прокатки заготовки.

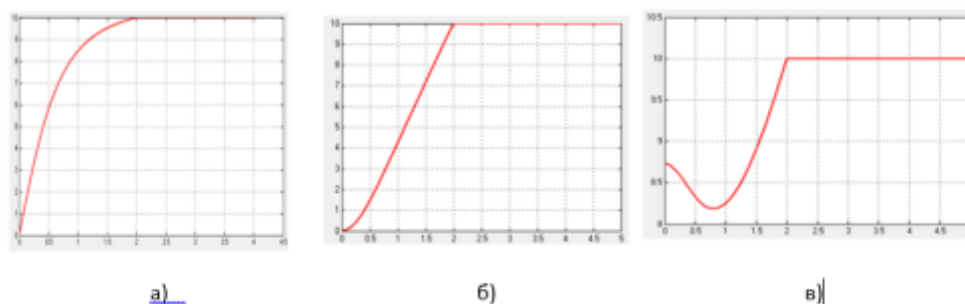


Рисунок 4 - Характеристики блоков нелинейностей БН1 (а), БН2 (б), БН3 (в)

По результатам моделирования получены осциллограммы, представленные на рисунках 5-7.

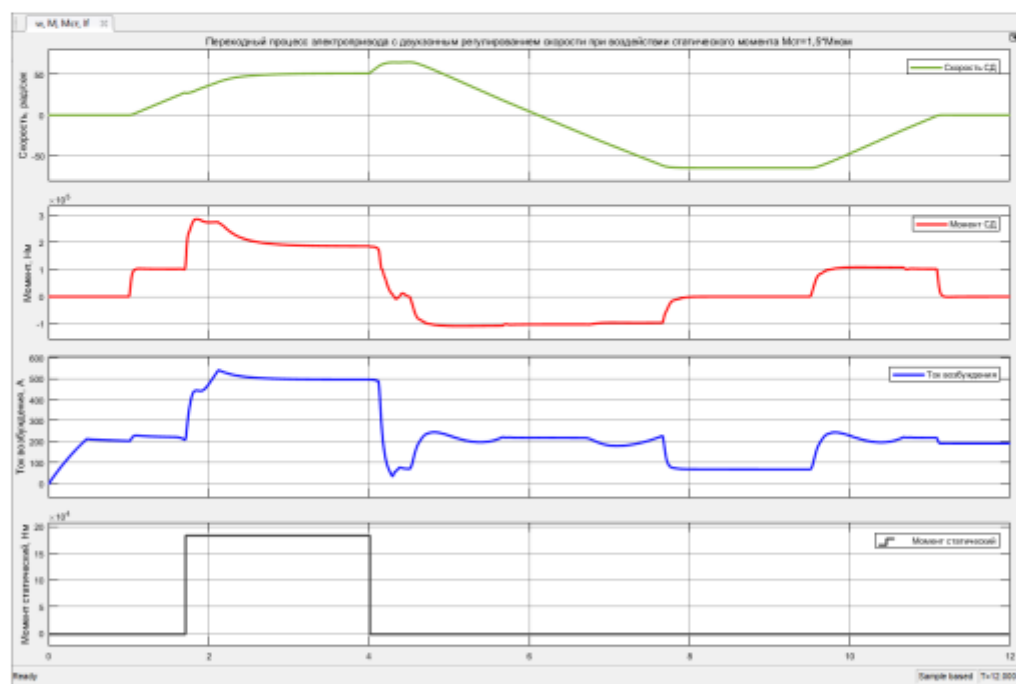


Рисунок 5 - Осциллограммы переходных процессов электропривода с двухзонным регулированием скорости при воздействии статического момента $M_{ст}=1,5$ Мном

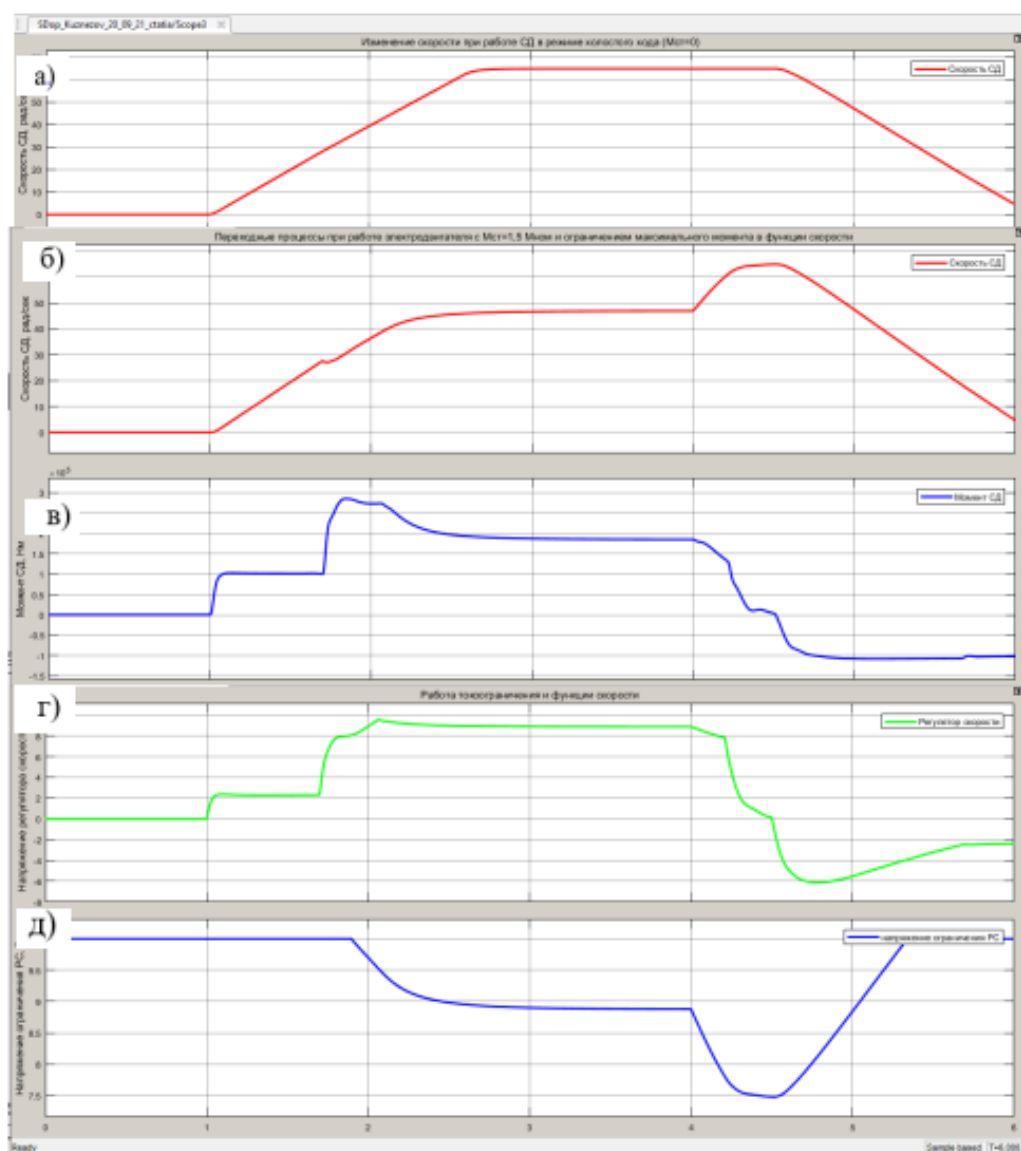


Рисунок 6 - Осциллограммы переходных процессов электропривода с двухзонным регулированием скорости при приложении статического момента $M_{ст}=1,5$ Мном и токоограничении

На риунке 6 приведены для сравнения осциллограммы изменения скорости электродвигателя в режиме холостого хода (рисунок 6, а) и под нагрузкой (рисунок 6, б), момента электродвигателя (рисунок 6, в), а также напряжения регулятора скорости (рисунок 6, г) и токоограничения (рисунок 6, д). Процессы соответствуют описанию работы токоограничения в функции скорости, представленной выше.

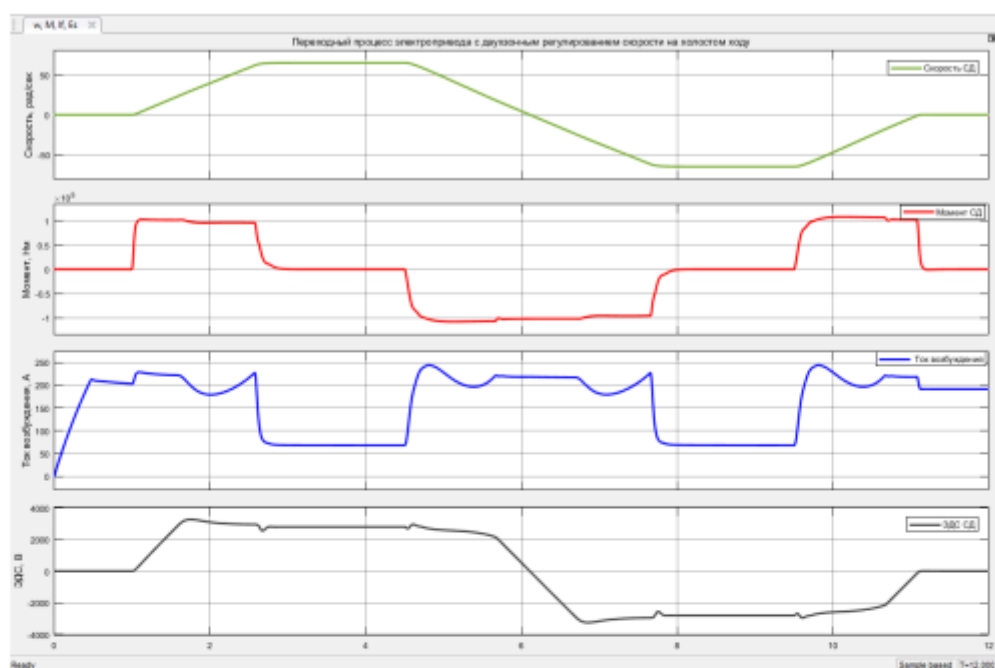


Рисунок 7 – Осциллограммы переходных процессов электропривода с двухзонным регулированием скорости при работе в режиме холостого хода

Выводы:

1. Приведенные осциллограммы переходных процессов, полученные в результате моделирования, в основном соответствуют параметрам реального электропривода BD1 вращения валков черновой клетки рельсобалочного цеха, что позволяет сделать вывод, что позволяет сделать вывод об адекватности модели.
2. Модель может быть использована для исследования, настройки и диагностики электроприводов с мощными синхронными двигателями, в частности, электродвигателей прокатных цехов.
3. Совершенствование полученной модели может происходить путем реализации имеющихся в реальной схеме нелинейностей и учетом изменяющихся от воздействия внешней среды (например температуры) параметров, введением в модель демпфирующей обмотки СД, а также изменения структуры САУ электропривода с зависимым от ЭДС ослаблением поля обмотки возбуждения, которая имеет известные недостатки, на систему с независимым от ЭДС изменением потока.

Библиографический список

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов [и др.] ; под ред. Г. Б. Онищенко. – Москва : РАСХН, 2001. – 520 с. : ил.
2. Математическое описание главного привода толстолистового стана 5000 горячей прокатки / В. Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 62-66.
3. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 3-е изд., испр. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
4. Имитационное моделирование системы автоматического управления главным электроприводом прокатного толстолистового стана по системе «частотный преобразователь – синхрон-

ный двигатель» / Н. С. Зайцев, В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, 25-26 ноября 2020 г. – Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2020 г. – С. 32 – 40

5. Математическое описание главного электропривода толстолистного стана 5000 горячей прокатки / В. Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 62-66.

6. Островляничик О. В. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства : учебное пособие / О. В. Островляничик. – Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2004. – 383 с.

7. Файнштейн В.Г. Цифровые системы управления электроприводов : монография / В. Г. Файнштейн, О. С. Воробейчик ; под ред. А. Д. Учителя. – Кривой Рог : Издательство ГБУЗ «КНУ», 2014. – 159 с.

8. Кузнецов В.А. Увеличение производительности прокатного стана путем оптимизации синхронного привода ACS 6000 / В. А. Кузнецов, А. С. Чураков, Д. А. Маршев // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды седьмой всероссийской научно-практической конференции, 23-24 ноября 2016 г. – Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2016. – С. 94-100.

9. Слежановский, О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с. : ил.

УДК 519.876.5

ПРИМЕНЕНИЕ НАТУРНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Свинцов М.М.¹, Мышляев Л.П.², Макаров Г.В.², Скударнова Н.В.¹

¹*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия*

²*ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»,
Новокузнецк, Россия, svintzovmax@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается метод натурно-математического моделирования применительно к системам автоматического управления. Приводится общее описание метода, представлен пример использования метода для получения модели технологического контура на действующем производстве.

Ключевые слова: моделирование, автоматизация, натурно-математический подход, информационные системы, производство.

USING THE NATURAL-MATHEMATICAL METHOD IN MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Svintsov M.M.¹, Myshlyayev L.P.², Makarov G.V.², Skudarnova N.V.¹

¹*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia*

²*ООО "Scientific-Research Center of Control Systems",
Novokuznetsk, Russia, svintzovmax@yandex.ru*

Abstract. The article describes the method of natural-mathematical modeling applied to automatic control systems. A general description of the method is presented, an example of using the method for obtaining a model of technological contour at existing production is given.

Keywords: modeling, automation, natural-mathematical method, information systems, production.