

ISSN 2220-3699

**СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

***ТРУДЫ ДЕВЯТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ***

*ПОСВЯЩАЕТСЯ 90-ЛЕТИЮ
СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА*

**НОВОКУЗНЕЦК
25-26 НОЯБРЯ 2020 г.**

УДК 621.34.001.2 (0758)

А 18

Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Девятой научно-практической конференции / Под общей редакцией В.Ю. Островляничика, В.А.Кубарева. — Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2020 г. — 216 с., ил.

ISSN 2220-3699

Сборник содержит труды IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию СибГИУ. В докладах представлены результаты научных исследований и практических приложений по проектированию, созданию математических моделей, теоретических основ энергосберегающего автоматизированного электропривода с традиционным и микропроцессорным управлением, решению проблем электроснабжения электрических установок и учета электрической энергии. Рассматриваются решения, ориентированные на применение в производстве и учебном процессе.

Сборник предназначен для научных работников, инженерно-технических работников предприятий, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Под общей редакцией: д.т.н., проф. Островляничика В.Ю.
к.т.н., доц. Кубарева В.А.

ISSN 2220-3699

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2020

параметрами технологического процесса, и разработка интерфейса для панели.

Необходимо отметить, что оборудование фирмы Овен, активно применяется различными фирмами при разработке проектов автоматизации различных систем, и заслужило большое количество положительных отзывов, а более чем 20-летнее применение показало его достаточно высокую надёжность [2].

Литература

1. Устройство управляющее многофункциональное ПР200. Руководство по эксплуатации. — М.: Овен. — 2020 г. — 74 с. (версия 1.52)
2. Каталог проектов и решений на базе оборудования ОВЕН: содержит сведения о проектах выполненных на основе приборов ОВЕН. URL: <https://owen.ru/project>. — Загл. с экрана (дата обращения 10.11.2020 г.).

УДК 621.3.078

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОКАТНОГО ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА ПО СИСТЕМЕ «ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

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

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк*

В работе осуществляется построение имитационной модели системы автоматического управления (САУ) синхронным двигателем (СД) главного электропривода толстолистного стана на основе её математического описания. Приводятся полученные динамические характеристики.

Ключевые слова: главный электропривод толстолистного стана, система автоматического управления, имитационное моделирование,

синхронный электропривод, динамические характеристики, качественные показатели.

Общезвестно, что электропривод постоянного тока в прокатном производстве отечественных промышленных предприятий до недавнего времени был доминирующим [1, 5]. Однако за последние два десятилетия благодаря интенсивному развитию силовой электроники появилась возможность применения наиболее оптимальных по своим характеристикам частотно-регулируемых электроприводов (ЭП) переменного тока сверхбольшой мощности. Начиная с 2012 г. в России были введены в эксплуатацию три мощных листопрокатных стана с использованием для вращения валков прокатных клеток синхронного электропривода [1-4]. Одним из примеров может послужить главный ЭП толстолистового прокатного стана 5000, установленного на предприятии ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» [2, 3]. В качестве источника питания синхронного двигателя используется преобразователь частоты типа MV7000 (3-уровневый NPC-преобразователь (Neutral Point Clamped - с фиксированной нейтральной точкой) с промежуточным звеном постоянного тока, который посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) генерирует выходное напряжение. В предложенной схеме реализовано векторное управление СД. Система управления электроприводом представляет собой многоконтурную систему подчиненного регулирования скорости вращения двигателя с локальными обратными связями в контурах.

Несмотря на общезвестные преимущества как самого СД, так и частотно-регулируемого ЭП перед приводом постоянного тока: больший КПД, меньший момент инерции, сокращение требуемой площади для установки оборудования, отсутствие щеточно-коллекторного узла и т.д., синхронный электропривод имеет недостатки, которые требуют серьезного изучения с использованием современной базы (например, математического и имитационного моделирования). Проблемы синхронного электропривода и способы их решения в отечественной литературе в краткой форме отражены в работах [2, 3], а также в наиболее ёмком виде в труде [6].

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

В предложенной работе выполнено математическое описание синхронного электропривода, построены имитационные модели электродвигателя и САУ, выполнен анализ полученных осциллограмм.

Для моделирования используется СД импортного производства, параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Заводские и расчетные данные оборудования

Наименование параметра	Обозначение в среде MATLAB	Значение
<i>Синхронный двигатель VEM DMMYZ 3867-20V</i>		
Номинальная мощность	P	12 МВт
Максимальный ток	Im	5650 А
Номинальный ток	In	2460 А
Номинальная угловая скорость	wn	6,283 рад/с
Максимальная угловая скорость	wm	12,04 рад/с
Номинальный момент на валу	Mn	1910 МН · м
Максимальный момент на валу	Mm	4297 МН · м
Момент инерции	J	145 т · м ²
Число пар полюсов	Zp	10
Номинальный ток возбуждения	Ifn	898,1 А
Максимальный ток возбуждения	Ifm	1680 А
Сопротивление фазы статора	Rs	0,00957 Ом
Сопротивление фазы ротора	Rf	0,19097 Ом
Пост. времени статора по оси d	Tsd	1,44 с
Пост. времени статора по оси q	Tsq	1,26 с
<i>Преобразователь частоты MV7000</i>		
Напряжение на выходе	Uxx	3300 В
<i>Тиристорный возбудитель</i>		
Напряжение холостого хода	Uxxv	520 В
Номинальное напряжение	Unv	220 В
<i>Датчики</i>		
Управляющий сигнал	Uy	10 В
Коэффициент ОС по скорости	Kw	0,8304 В · с
Коэффициент ОС по току	Kt	0,0018 В/А
Коэффициент ОС по моменту	km	2,33 · 10 ⁻⁶ В/(Н · м)
Коэффициент ОС по потокосцеплению цепи ОВ	Kvf	0,0086 В/Вб

Для составления структурной схемы синхронного двигателя можно воспользоваться системой уравнений Парка-Горева в операторной форме, приведенной в работе [6]:

$$\begin{cases} u_{sd} = i_{sd}R_s + p\psi_{sd} - \omega_0\psi_{sq}; \\ u_{sq} = i_{sq}R_s + p\psi_{sq} + \omega_0\psi_{sd}; \\ u_f = R_f i_f + p\psi_f; \\ \psi_{sd} = i_{sd}L_{sd} + i_f M_f; \\ \psi_{sq} = i_{sq}L_{sq}; \\ \psi_f = \frac{3}{2}i_{sd}M_f + i_f L_f; \\ M = \frac{3}{2}Z_p(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}); \\ M - M_c = Jp\omega, \end{cases} \quad (1)$$

где u_{sd}, u_{sq}, u_f – напряжения статора по осям d, q соответственно и напряжение обмотки возбуждения; i_{sd}, i_{sq}, i_f – токи статора по осям d, q соответственно и ток обмотки возбуждения; $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_f$ – потокосцепления статора по осям d, q соответственно и потокосцепление обмотки возбуждения; L_{sd}, L_{sq}, L_f – индуктивности статора по осям d, q соответственно и индуктивность обмотки возбуждения; M_f – взаимная индуктивность ОВ и обмотки статора по оси d; M и M_c – момент на валу двигателя и статический соответственно.

Структурная схема синхронной машины может быть получена путем разрешения системы уравнений (1) относительно выходных координат $i_{sd}, i_{sq}, i_f, \psi_f, \psi_{sq}, \psi_{sd}, M$ и ω :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1/R_s}{1+pT_{sd}} \cdot (u_{sd} + K_f R_f i_f - u_f K_f + \omega_{0,ss} \psi_{sq}); \\ i_{sq} = \frac{1/R_s}{1+pT_{sq}} \cdot (u_{sq} - \omega_{0,ss} \psi_{sd}); \\ i_f = \frac{\psi_f}{L_f} - \frac{3}{2} i_{sd} K_f; \\ \psi_{sd} = i_{sd} L'_{sd} + K_f \psi_f; \\ \psi_{sq} = i_{sq} L_{sq}; \\ \psi_f = \frac{2+pT_f}{T_f} \cdot \left(u_f + \frac{3}{2} R_f K_f i_{sd} \right); \\ M = \frac{3}{2} Z_p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}); \\ \omega = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c); \\ \omega_{0,ss} = \omega_{ss} Z_p. \end{cases} \quad (2)$$

где K_f – коэффициент отношения: $K_f = \frac{M_f'}{L_f}$; T_{sq} – постоянная времени статора по оси q: $T_{sq} = \frac{L_{sq}}{R_s}$; L'_{sd} – индуктивность обмотки статора по оси d: $L'_{sd} = L_{sd} - \frac{3}{2} \frac{M_f^2}{L_f}$; T'_{sd} – постоянная времени статора по оси d: $T'_{sd} = \frac{L'_{sd}}{R_s}$.

Построенная в программе MATLAB Simulink на основании системы уравнений (2) модель приводится на рисунке 1.

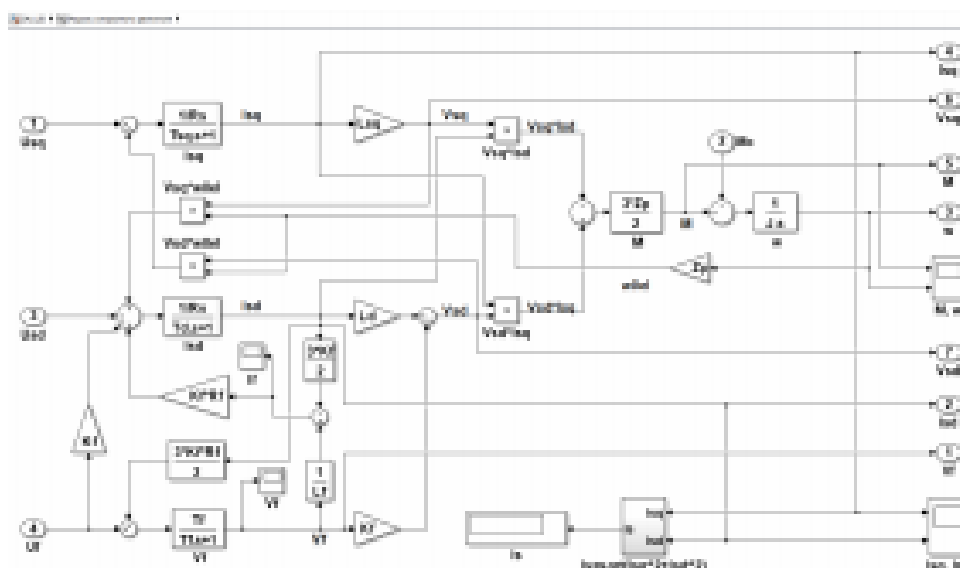


Рисунок 1 – Имитационная модель синхронной машины

В данной работе рассматривается построение двухконтурной САУ с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости. Для создания сигнала задания на контура токов и потокосцепления ОВ в разомкнутом контуре момента используются блоки нелинейности БН1-БН3 (представлены на рисунке 2).

Для удобства в таблицу 2 сведены основные данные о настройке контуров.

Таблица 2 – Сведения о настройке контуров САУ

Контур		Регулятор	Настройка
Тока	I_{sq}	Пропорционально-интегральный	Модульный оптимум
	I_{sd}	Пропорционально-интегральный	Модульный оптимум
Потокосцепления ОВ Ψ_f		Пропорционально-интегральный	Модульный оптимум
Момента M	Блок нелинейности №1 (БН1) $i_{sq} = f(M)$		Разомкнутый контур
	БН2 $i_{sd} = f(M)$		
	БН3 $\psi_f = f(M)$		
Скорости ω		Пропорционально-интегральный	Симметричный оптимум

Математические выражения для регуляторов тока $W_{pt,q}(p)$ и $W_{pt,d}(p)$, потокосцепления $W_{p\psi f}(p)$, скорости $W_{pe}(p)$ и блоков нелинейности БН1-БН3 сведены в систему уравнений (3). САУ синхронным двигателем представлена на рисунке 2.

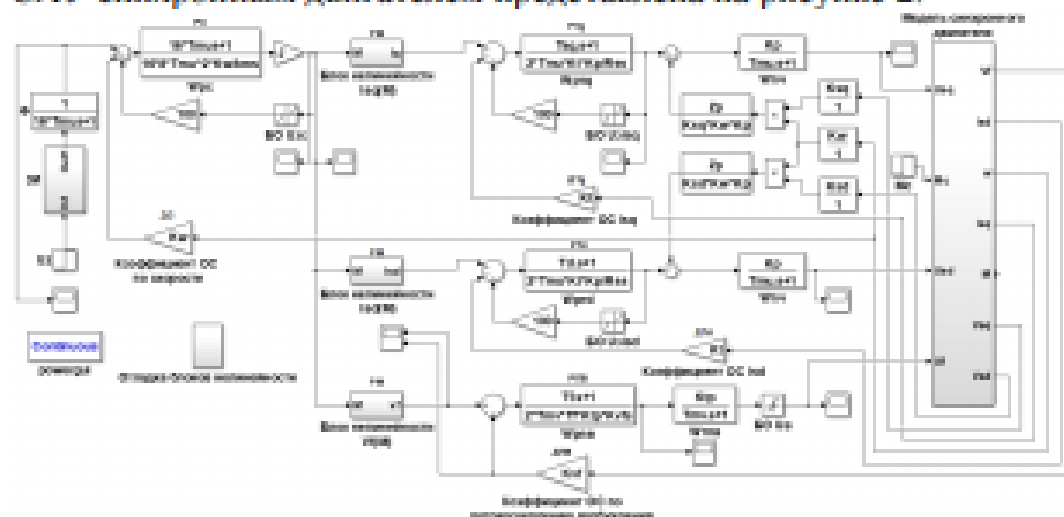


Рисунок 2 – Имитационная модель САУ синхронным электроприводом валков толстолистового стана

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{pT,q}(p) = \frac{T_{eq}p+1}{2T_{\mu\mu}K_TK_a}p; \\ W_{pT,q}(p) = \frac{T_{eq}^*p+1}{2T_{\mu\mu}K_TK_a}p; \\ W_{p\mu\mu}(p) = \frac{T_f p+1}{2T_{\mu\mu}T_f K_{\mu\mu}K_a f p}; \\ W_{pc}(p) = \frac{16T_{\mu\mu}p+1}{16\sigma T_{\mu\mu}^2 \frac{K_{\mu\mu}}{K_M}}; \\ i_{sq} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{M^2}{\left(\frac{1}{2}z_p\psi_s\right)^2} \frac{i_{sq}^2}{v_s^2}}} \frac{M}{\left(\frac{1}{2}z_p\psi_s\right)}; \\ i_{sd} = \frac{L_{sq}}{\psi_s} \sqrt{1+\frac{M^2}{\left(\frac{1}{2}z_p\psi_s\right)^2} \frac{i_{sq}^2}{v_s^2}} \frac{M^2}{\left(\frac{1}{2}z_p\psi_s\right)^2}; \\ \psi_f = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{M^2}{\left(\frac{1}{2}z_p\psi_s\right)^2} \frac{i_{sq}^2}{v_s^2}}} \left[L_f I_{fn} + \frac{L_{sq}^* L_{sq}}{K_f \psi_s} \frac{M^2}{\left(\frac{1}{2}z_p\psi_s\right)^2} \right]. \end{array} \right. , \quad (3)$$

где $\psi_s = \psi_{ном} = \frac{2M_n}{3Z_p I_{fn}}$ – номинальное потокоцепление статорной обмотки; I_{fn} – номинальный ток возбуждения.

На рисунке 3 представлен переходный процесс при холостом ходе двигателя, на рисунках 4.а и 4.б – разгон синхронного ЭП при приложении номинального M_n и максимального M_m момента – процесс захвата металла в валки.

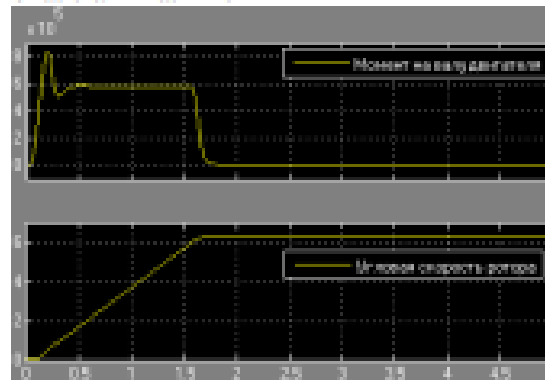
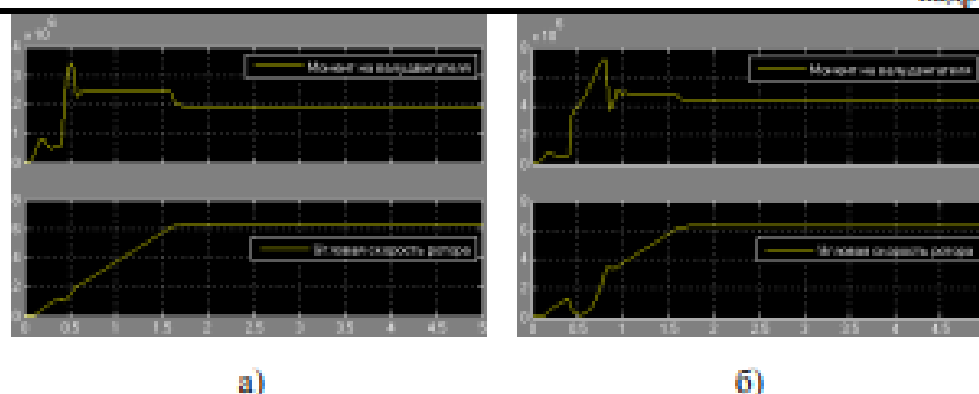


Рисунок 3 – Сигналы момента и скорости ротора при отсутствии на валу нагрузки и $\omega = \omega_n$



- а) – подача номинального момента $M_n = 1910 \text{ Н} \cdot \text{м}$
 б) – подача максимального момента $M_m = 4297 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Рисунок 4 – Сигналы момента и скорости вала при подаче нагрузки в процессе пуска электропривода

Выводы. При рассмотрении рисунков 3 и 4.а-б отмечаются следующие качественные показатели: отсутствие перерегулирования и колебательности по скорости в системе. Перерегулирование по моменту составляет $\sigma_M^{\%} = 42,5\%$, что соответствует типовой настройке [6]. Полученные характеристики системы сохраняются во всем диапазоне момента $M = 0 \div M_m$.

Таким образом, можно сделать вывод о правильности полученных в работе зависимостей (2) и (3) и целесообразности их использования для построения типовых систем синхронного электропривода.

Анализ осциллограмм показывает недостатки синхронного электропривода, для устранения которых требуются дальнейшие исследования аппаратной и программной части САУ.

Библиографический список

- 1.Фединцев В.Е. Электрооборудование цехов ОМД. Ч. 2. Электропривод прокатных станов и вспомогательных механизмов цехов ОМД : учебное пособие / В.Е. Федницев. – М. : МИСиС, 2005. – 119 с.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

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

3. Маклаков, А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистого стана 5000 / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. - №1. – с. 43-50.

4. Основные проблемы двухдвигательного электропривода прокатных станов / В.А. Кузнецов, Е.С. Кузнецова, Д.А. Лузин, Н.С. Зайцев // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции, 27 июня 2020 г. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2020 г. – С. 81-86

5. Фотиев М.М. Электрооборудование прокатных и трубных цехов : учебник для техникумов / М.М. Фотиев. – М. : Металлургия, 1995. – 256 с.

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

УДК 681.51:62-83

**МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ АДКЗ С ШИП
ГЕНЕРАЦИЕЙ СИНУСОИД ПО ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ**

П. Н. Кунинин, М. М. Кучик, А. И. Рыбаков

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

Решена задача подавления высших гармоник при управлении асинхронным электродвигателем изменением напряжения. Созданы математические функции первых гармоник с функцией управления