

Научная статья

УДК 681.51

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-46-58

Островляничик Виктор Юрьевич, Кубарев Василий Анатольевич*, Зайцев Никита Сергеевич,
Модзелевский Дмитрий Евгеньевич, Кузнецова Елена Степановна,
Маршев Дмитрий Александрович

Сибирский государственный индустриальный университет

*E-mail: kubarev.sibsiu@list.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЗОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКОЙ



Информация о статье

Поступила:

20 апреля 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

04 октября 2022 г.

Ключевые слова:

система автоматического управления, синхронный двигатель с демпферной обмоткой, векторное управление, потокоцепление обмотки статора, математическое и имитационное моделирование, динамические характеристики, качественные показатели, уравнения Парка-Горева

Аннотация.

В статье предлагается построение математической и имитационной моделей системы автоматического управления явнополюсного синхронного двигателя с демпферной обмоткой. Предполагается, что полученные в работе модели и подход к их построению смогут быть в дальнейшем полезны для проектирования реальных электроприводов независимо от области их применения.

Актуальность работы. Частотно-регулируемый электропривод на основе синхронного двигателя получает все большее распространение в качестве приводного механизма особо крупных агрегатов и установок. Синхронная машина с электромагнитным возбуждением является сложным многомерным нелинейным объектом управления, что соответствующим образом сказывается на трудоемкости построения ее системы автоматического управления. Зачастую дополнительной сложностью в построении систем автоуправления служит усложнение конструкции машины за счет использования демпферной обмотки. В связи с указанными обстоятельствами довольно актуальным становится вопрос о разработке единого подхода к построению систем автоуправления синхронного двигателя с успокоительной обмоткой.

Цель работы: создание универсального математического аппарата для успешного синтеза системы автоуправления синхронной машины с демпферной обмоткой и имитация данной системы для оценки ее качественных показателей.

Методы исследования: математическое моделирование, основанное на операторном методе расчета электромеханических систем; имитационное моделирование в графической среде программирования MATLAB Simulink.

Результаты: Математическая и имитационная модель системы автоматического управления частотно-регулируемого синхронного двигателя с демпферной обмоткой, динамические характеристики модели электропривода и сравнительный анализ ее переходных процессов с теми, которые наблюдаются в модели без использования успокоительной обмотки.

Для цитирования: Островляничик В.Ю., Кубарев В.А., Зайцев Н.С., Модзелевский Д.Е., Кузнецова Е.С., Маршев Д.А. Моделирование двухзонной системы автоматического управления частотно-регулируемого синхронного электродвигателя с демпферной обмоткой // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5 (163). С. 46-58. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-46-58

Введение. Частотно-регулируемый синхронный электродвигатель (СД) с электромагнитным возбуждением на протяжении XXI века активно вы-

тесняет электромеханические системы постоянного тока, которые традиционно применялись в качестве приводов особо крупных механизмов. Широкое

распространение получила система «Преобразователь частоты – Синхронный двигатель» (ПЧ-СД), которая зачастую используется в качестве электропривода (ЭП) валков крупных реверсивных и нереверсивных прокатных станов [1-8], судовых насосов и гребных механизмов [4, 9], шахтных подъемных установок [10, 11], размольных мельниц [5], в механизмах цементной промышленности и т.д.

Несмотря на широкое распространение, система «ПЧ-СД» на текущий момент является менее изученной как в теоретическом, так и в эксплуатационном плане (по сравнению с асинхронным электроприводом и приводом постоянного тока), что особенно характерно для отечественной среды [12]. В русской технической литературе можно выделить некоторый ряд работ, посвященных математическому и имитационному моделированию систем автоматического управления (САУ) синхронного электродвигателя [1, 2, 5-7, 12-14]. Указанные источники литературы посвящены широкому кругу вопросов, касающихся синтеза, построения и анализа САУ частотно-регулируемого СД, имеющего, как правило, наиболее простую, типовую конструкцию (отсутствие демпферной обмотки (ДО), поперечной компенсирующей обмотки, пренебрежение нелинейностью некоторых элементов СД и др.). В свою очередь, успокоительная обмотка довольно часто используется в конструкции современных регулируемых синхронных двигателей. В зарубежной технической литературе в области синхронного электропривода куда большее внимание уделяется вопросам управления синхронной машиной с постоянными магнитами, конструкция ротора которой не имеет как индукторной, так и успокоительной обмоток [4, 15-18].

Применение ДО в конструкции современного частотно-регулируемого СД имеет перед собой единственную цель: поглощение энергии (сглаживание) колебаний скорости при изменении возмущающих воздействий на валу машины [19]. С другой стороны, как указывают некоторые авторы [5], применение ДО может оказывать значительное негативное влияние на поведение машины в динамике из-за сложности форсирования переходных процессов. Наличие данной обмотки может отрицательно сказываться на таких качественных показателях регулирования, как время переходного процесса, перерегулирование и колебательность по регулируемым координатам.

В соответствии с вышесказанным встает актуальный вопрос о целесообразности использования успокоительной обмотки в конструкции синхронной машины, который может быть решен лишь исходя из особенностей параметров самой машины, области ее применения и требований к технологи-

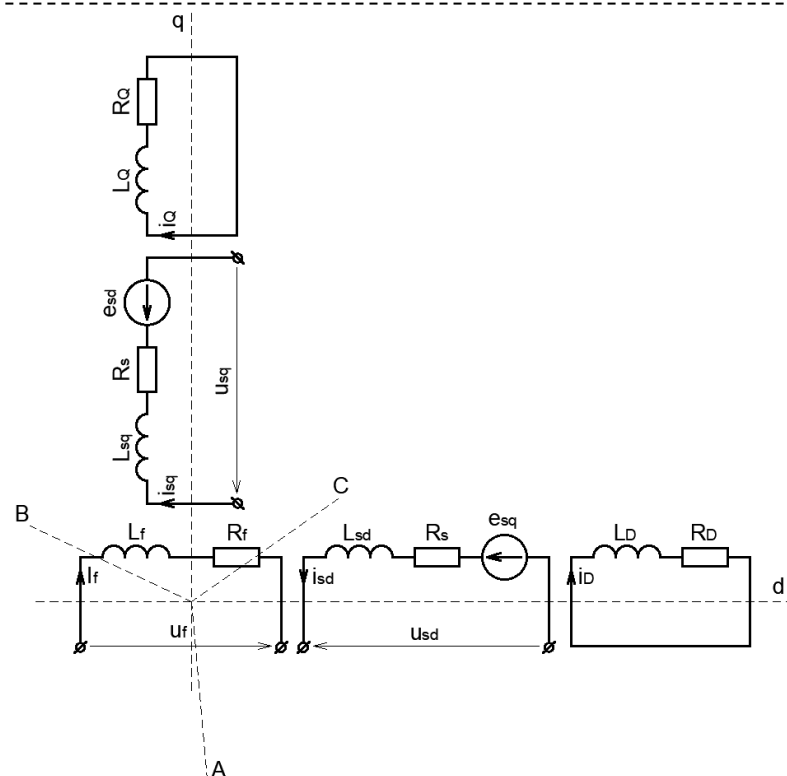


Рис. 1. Схема замещения трехфазной синхронной машины
Fig. 1. Equivalent circuit of synchronous machine

ческому процессу. Таким образом, предварительное имитационное моделирование САУ конкретного синхронного электропривода может способствовать разрешению проблемы выбора конструкции синхронной машины (наличие или отсутствие ДО).

Математическое моделирование. Синхронная машина с успокоительной обмоткой. Построение математической модели СД с ДО осуществляется за счет преобразования уравнений Парка-Горева в операторной форме. При описании динамических процессов принимается система координат, связанная с роторной обмоткой двигателя и вращающаяся неподвижно относительно последней (так называемая система d-q). В данном случае трехфазная статорная обмотка рассматривается как эквивалентная двухфазная обмотка, катушки которой расположены на прямой (d) и квадратурной (q) оси соответственно [20]. Для математического описания демпферной обмотки, обладающей осевой симметрией (продольной и поперечной), также применяется ее эквивалентное разложение на два дискретных замкнутых контура по осям d и q. Демпферная обмотка не имеет автономного источника питания. Ток в ней протекает лишь в динамических режимах работы вследствие явления самоиндукции. Очевидно, что магнитная связь между ортогонально расположенными контурами отсутствует. Явление взаимной индукции возникает только между контурами, расположенными вдоль одной оси. Добавление демпферной обмотки не влияет на форму уравнений напряжений и ЭДС статорных и роторного контуров, однако увеличивает число магнитных связей, что усложняет вывод

конечной математической модели. В данном случае синхронная машина при ее рассмотрении в двух-фазной ортогональной системе координат будет состоять из четырех магнитно связанных контуров. Магнитная связь возникает между статорной и демпферной обмоткой по оси q, а также между обмоткой возбуждения (ОВ), статорной обмоткой по оси d и успокоительной обмоткой по оси d. На рис. 1 приводится схема замещения СД с ДО.

В соответствии со схемой замещения, представленной на рис. 1, можно получить следующую систему уравнений, описывающую динамический режим работы СД с демпферной обмоткой:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{sd}(p) = R_s i_{sd}(p) + p\psi_{sd}(p) - \omega_{эл} \psi_{sq}(p); \\ u_{sq}(p) = R_s i_{sq}(p) + p\psi_{sq}(p) + \omega_{эл} \psi_{sd}(p); \\ u_f(p) = R_f i_f(p) + p\psi_f(p); \\ \psi_{sd}(p) = L_{sd} i_{sd}(p) + M_{df} i_f(p) + M_{ad} i_D(p); \\ \psi_{sq}(p) = L_{sq} i_{sq}(p) + M_{dq} i_Q(p); \\ \psi_f(p) = L_f i_f(p) + \frac{3}{2} M_{df} i_{sd}(p) + M_{ad} i_D(p); \\ 0 = R_D i_D(p) + p\psi_D(p); \\ 0 = R_Q i_Q(p) + p\psi_Q(p); \\ \psi_D(p) = L_D i_D(p) + \frac{3}{2} M_{dD} i_{sd}(p) + M_{fD} i_f(p); \\ \psi_Q(p) = L_Q i_Q(p) + \frac{3}{2} M_{qQ} i_{sq}(p); \\ M(p) = \frac{3}{2} Z_p (\psi_{sd}(p) i_{sq}(p) - \psi_{sq}(p) i_{sd}(p)), \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_{sd}, u_{sq} и u_f – проекции пространственного вектора фазного напряжения на обмотке статора по осям d и q соответственно, а также напряжение на ОВ, В; p – оператор Лапласа: $p = \frac{d}{dt} = j\omega$; j – мнимая единица: $j = \sqrt{-1}$; R_s и R_f – активное сопротивление фазы статора и активное сопротивление ОВ соответственно, Ом; i_{sd}, i_{sq} и i_f – проекции

пространственного вектора тока статора по осям d и q соответственно, а также ток, протекающий в ОВ, А; $\omega_{эл}$ – скорость вращения ротора в электрическом пространстве: $\omega_{эл} = Z_p \omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; Z_p – число пар полюсов; ω – скорость вращения ротора машины в физическом пространстве, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; ψ_f – потокосцепление ОВ, Вб; L_{sd}, L_{sq} и L_f – индуктивности статорных обмоток по осям d и q соответственно, а также индуктивность ОВ, Гн; M_{df} – взаимная индуктивность между обмоткой статора по оси d и обмоткой возбуждения, Гн; M_{ad} – взаимная индуктивность между обмоткой статора по оси d и демпферной обмоткой по оси d, Гн; M_{dq} – взаимная индуктивность между обмоткой статора по оси q и демпферной обмоткой по оси q, Гн; R_D и R_Q – активное сопротивление демпферной обмотки по осям d и q соответственно, Ом; ψ_D и ψ_Q – потокосцепление демпферной обмотки по осям d и q соответственно, Вб; L_D и L_Q – индуктивности ДО по оси d и q соответственно, Гн; M_{fD} – взаимная индуктивность между ОВ и демпферной обмоткой по оси d, Гн; M – электромагнитный момент, Н · м.

Основными регулируемыми координатами выступают проекции тока статора по осям d и q $i_{sd}(p)$ и $i_{sq}(p)$ соответственно, а также потокосцепление ОВ $\psi_f(p)$. Наиболее удобными входными координатами синхронной машины как объекта управления являются проекции пространственного вектора фазного напряжения $u_{sq}(p)$ и $u_{sd}(p)$, а также напряжение на обмотке возбуждения $u_f(p)$. Конечная математическая модель, описывающая динамический режим СД, может быть получена за счет преобразования системы уравнений (1) к следующему виду:

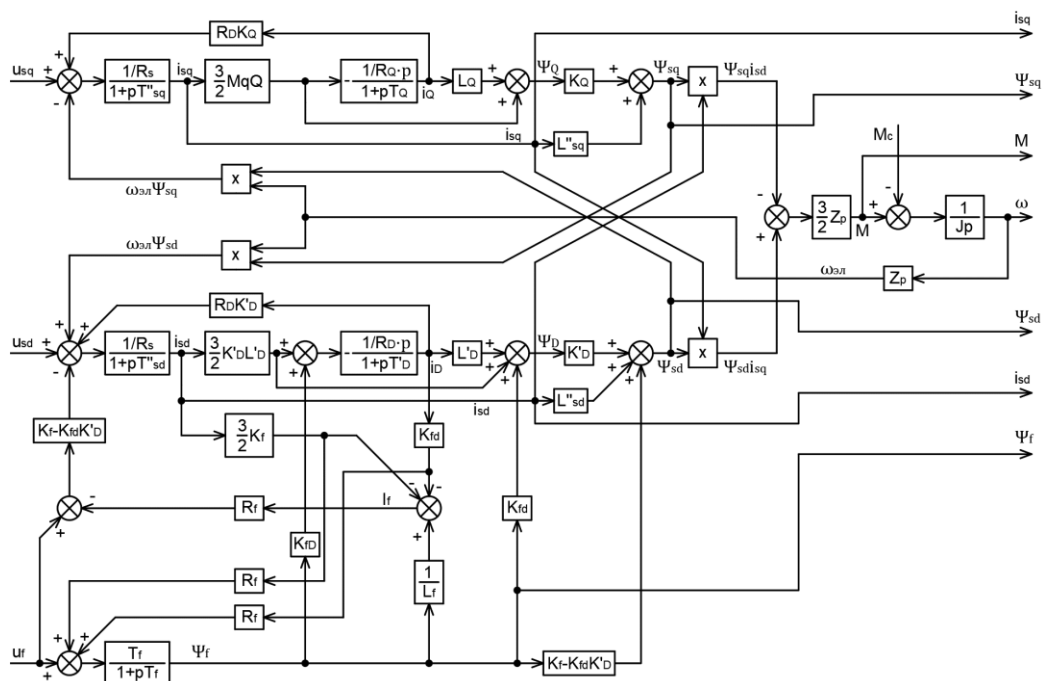


Рис. 2. Структурная схема синхронного двигателя, как объекта управления
Fig. 2. Block diagram of a synchronous motor as a control object

$$\begin{cases}
i_{sd}(p) = \frac{1/R_s}{1+pT_{sd}''} (u_{sd} - \\
- (k_f - k_{fd}k'_D)(u_f - i_{fr}R_f) + k'_D R_D i_D + \omega_{эл} \psi_{sq}); \\
i_{sq}(p) = \frac{1/R_s}{1+pT_{sq}''} (u_{sq} + k_Q R_Q i_Q - \omega_{эл} \psi_{sd}); \\
i_f(p) = \frac{\psi_f}{L_f} - \frac{3}{2} k_f i_{sd} - k_{fd} i_D; \\
\psi_{sd}(p) = L_{sd}'' i_{sd} + k'_D \psi_D + (k_f - k_{fd}k'_D) \psi_f; \\
\psi_{sq}(p) = L_{sq}'' i_{sq} + k_Q \psi_Q; \\
\psi_f(p) = \frac{T_f}{1+pT_f} \left(\frac{3}{2} k_f R_f i_{sd} + k_{fd} R_f i_D + u_f \right); \\
i_D(p) = - \left(\frac{3}{2} k'_D L'_D i_{sd} + k_{fd} \psi_f \right) \cdot \frac{1/R_D p}{1+pT_D'}; \\
i_Q(p) = - \left(\frac{3}{2} M_{qQ} i_{sq} \right) \cdot \frac{1/R_Q p}{1+pT_Q'}; \\
\psi_D(p) = \frac{3}{2} k'_D L'_D i_{sd} + L'_D i_D + k_{fd} \psi_f; \\
\psi_Q(p) = L_Q i_Q + \frac{3}{2} M_{qQ} i_{sq}; \\
M(p) = \frac{3}{2} Z_p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}); \\
M - M_c = J p \omega(p); \\
\omega_{эл}(p) = Z_p \omega. \\
M(p) = \frac{3}{2} Z_p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd})
\end{cases} \quad (2)$$

где T_i'' и T_i' – постоянная времени в сверхпереходном и переходном режиме i -ой цепи соответственно, с; k_i – мера влияния взаимной индукции со стороны одной обмотки на i -ую обмотку; L_i'' и L_i' – сверхпереходная и переходная индуктивность i -ой обмотки соответственно, Гн.

На рис. 2 представлена структурная схема синхронной машины с успокоительной обмоткой в соответствии с системой уравнений (2).

Для наглядности сведем формулы расчета всех вновь вводимых в систему уравнений (2) величин (мер влияния взаимной индукции, постоянных времени, индуктивностей) в таблицу 1.

Из системы уравнений (2) видно, что проекции токов демпферной обмотки появляются и оказывают реактивное действие лишь при изменении основных регулируемых координат $i_{sd}(p)$, $i_{sq}(p)$ и $\psi_f(p)$. При этом проекция тока, протекающего в демпферной обмотке по оси q , зависит лишь от изменения тока, протекающего в статорной обмотке, расположенной по оси q , в то время как проекция тока демпферной обмотки по оси d зависит одновременно и от тока в контурной обмотке статора по оси d , и от потокосцепления обмотки возбуждения. Преобразовав уравнения проекций тока успокоительной обмотки, можно получить передаточные функции (ПФ) $W_{iD}(p)$ и $W_{iQ}(p)$, отражающее физический смысл работы демпферной обмотки.

$$W_{iD}(p) = \frac{i_D(p)}{k_{fd} \psi_f(p) - \frac{3}{2} k'_D L'_D i_{sd}(p)} = - \frac{1/R_D p}{1+pT_D'} \quad (3)$$

$$W_{iQ}(p) = \frac{i_Q(p)}{i_{sq}(p)} = - \frac{3}{2} M_{qQ} \cdot \frac{1/R_Q p}{1+pT_Q'} \quad (4)$$

Передаточные функции, представленные формулами (3) и (4), являются реальными инверсными дифференцирующими звеньями. Иными словами, при изменении регулируемых координат

$i_{sd}(p)$, $i_{sq}(p)$ и $\psi_f(p)$ в демпферной обмотке создаются токи, которые стремятся данное изменение скомпенсировать. Реакция на изменение регулируемых величин тем быстрее, чем меньше величины постоянных времени контурных демпферных обмоток, расположенных на прямой и квадратурной осях.

Математическое моделирование. Система автоматического управления. Синтез системы автоматического управления удобно осуществить, пользуясь методикой, изложенной Слежановским О.В. и др. в работе [5]. В данном случае САУ будет содержать блок компенсации внутренних перекрестных обратных связей (ВПОС) по проекциям пространственного вектора ЭДС вращения; три автономных внутренних контура: по проекциям пространственного вектора тока статора d и q $i_{sd}(p)$ и $i_{sq}(p)$ соответственно и по потокосцеплению обмотки возбуждения $\psi_f(p)$; разомкнутый многомерный контур момента (МКМ), необходимый для воспроизведения нелинейных статических зависимостей $i_{sd}(M)$, $i_{sq}(M)$ и $\psi_f(M)$ ($i_{sd}(I_s)$, $i_{sq}(I_s)$ и $\psi_f(I_s)$); внешний замкнутый контур скорости и внешний разомкнутый контур базового потокосцепления, с помощью которого осуществляется регулирование координат ЭП во второй зоне.

Выражения для компенсационных звеньев $f_d(p)$ и $f_q(p)$ легко получить с помощью структурной схемы контуров проекций тока, входящих в САУ. Данная схема представлена на рис. 3.

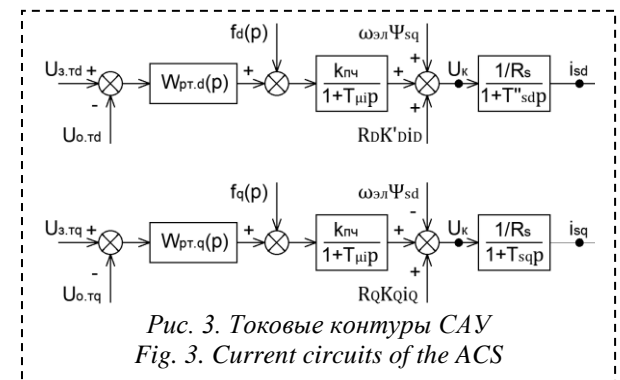


Рис. 3. Токковые контуры САУ
Fig. 3. Current circuits of the ACS

Наиболее важным вопросом при построении САУ является выбор базового потокосцепления машины, поскольку от него зависят будущие эксплуатационные характеристики электропривода в целом. Для синхронных машин с векторным управлением существует три основных способа регулирования магнитного поля [5, 6]:

- обеспечение постоянства потокосцепления статора $\Psi_s = \Psi_6 = const$ в любом диапазоне нагрузок при регулировании скорости в первой зоне;
- обеспечение постоянства потокосцепления рассеяния $\Psi_\delta = \Psi_6 = const$ в любом диапазоне нагрузок при регулировании скорости в первой зоне;
- обеспечение переменной структуры регулирования потокосцеплений, при которой постоянство магнитного поля статора поддерживается при малых нагрузках, а поля рассеяния – при больших.

Таблица 1. Физические параметры и константы математической модели СД
Table 1. Physical parameters and constants of SM's mathematical model

Расшифровка величины	Обозначение	Формула
Мера влияния взаимной индукции демпферной обмотки по оси q со стороны обмотки статора по оси q	k_Q	$\frac{M_{qQ}}{L_Q}$
Мера влияния взаимной индукции на обмотку возбуждения со стороны обмотки статора по оси d	k_f	$\frac{M_{df}}{L_f}$
Мера влияния взаимной индукции на обмотку возбуждения со стороны демпферной обмотки по оси d	k_{fD}	$\frac{M_{fD}}{L_f}$
Переходная индуктивность обмотки статора по оси d	L'_{sd}	$L_{sd} - \frac{\frac{3}{2}M_{df}^2}{L_f}$
Переходная индуктивность демпферной обмотки по оси d	L'_D	$L_D - \frac{M_{fD}^2}{L_f}$
Сверхпереходная индуктивность обмотки статора по оси d	L''_{sd}	$L'_{sd} - \frac{\frac{3}{2}\left(M_{dD} - \frac{M_{df}M_{fD}}{L_f}\right)^2}{L'_D}$
Сверхпереходная индуктивность обмотки статора по оси q	L''_{sq}	$L_{sq} - \frac{\frac{3}{2}M_{qQ}^2}{L_Q}$
Мера влияния взаимной индукции на переходную индуктивность демпферной обмотки по оси d	k'_D	$\frac{M_{dD} - \frac{M_{df}M_{fD}}{L_f}}{L'_D}$
Постоянная времени обмотки статора по оси d в сверхпереходном режиме	T''_{sd}	$\frac{L''_{sd}}{R_s}$
Постоянная времени обмотки статора по оси q в сверхпереходном режиме	T''_{sq}	$\frac{L''_{sq}}{R_s}$
Постоянная времени обмотки возбуждения	T_f	$\frac{L_f}{R_f}$
Постоянная времени демпферной обмотки по оси q	T_Q	$\frac{L_Q}{R_Q}$
Постоянная времени демпферной обмотки по оси d в переходном режиме	T_D	$\frac{L'_D}{R_D}$

Первый вид управления магнитным полем двигателя применяется для электроприводов, работающих с плавно изменяющейся нагрузкой при не слишком высоких значениях статического момента (электропривод некоторых судовых установок, шахтных подъемников и т.д.).

Второй вид управления позволяет повысить перегрузочные характеристики электропривода, однако ухудшает его энергетические показатели. Данное управление является более подходящим для приводов, работающих в условиях значительных ударных нагрузок.

Третий вид управления совмещает достоинства обоих способов регулирования поля, однако характеризуется наиболее сложной системой автоматического управления [5, 10].

В данном исследовании рассматривается частотное управление машиной при поддержании постоянства потокосцепления обмотки статора. Реализация того или иного закона управления магнитным полем происходит за счет формирования МКМ. Нелинейные статические зависимости обычно получают с помощью построения векторных диаграмм машины [5]. На рисунке 4 представлена векторная диаграмма синхронного двигателя с демпферной обмоткой при управлении $\Psi_s = \Psi_6 = \text{const}$.

Синтез регуляторов системы автоматического регулирования (САР) удобно произвести, используя ПФ, представленные на рисунках 2 и 3.

Двухзонное регулирование скорости синхронного двигателя можно осуществить как с замкнутым управлением ЭДС вращения, так и с разомкнутым регулированием потокосцепления обмотки статора. Разомкнутое управление имеет несколько худшее перерегулирование по координате тока статора, однако обеспечивает меньшую колебательность по координатам тока и электромагнитного

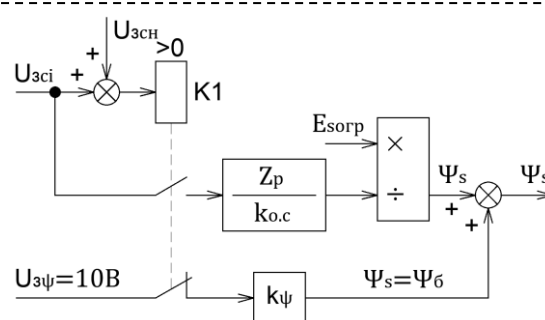


Рис. 5. Разомкнутое управление потокосцеплением обмотки статора при двухзонном регулировании скорости
Fig. 5. Open control of the stator winding flux linkage with two-zone speed control

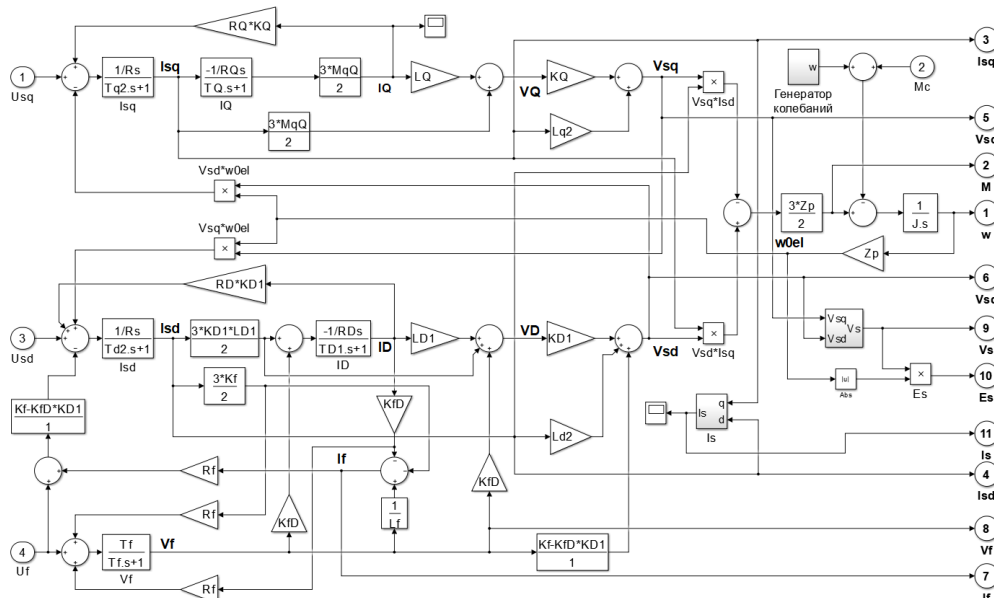


Рис. 6. Имитационная модель синхронной машины с демпферной обмоткой
Fig. 6. Simulation model of the synchronous machine with damper winding

момента при подаче нагрузки на вал двигателя в произвольный момент времени. В связи с этим в данном исследовании осуществляется настройка двухзонного регулирования скорости с разомкнутым управлением потокосцепления. Принцип регулирования скорости вращения ротора сверх основной за счет ослабления магнитного поля иллюстрируется на рис. 5.

Математическая модель системы автоматического управления, включающая в себя выражения для передаточных функций контурных регуляторов, для передаточных функций звеньев компенсации ВПОС, для нелинейных функциональных зависимостей МКМ, представлена системой уравнений (5).

$$\left\{ \begin{array}{l} f_d(p) = -\frac{\omega_{эл}(p)\psi_{sq}(p)}{k_{пч}}; \\ f_q(p) = \frac{\omega_{эл}(p)\psi_{sd}(p)}{k_{пч}}; \\ W_{р.г.}(p) = \frac{T_{sq}'p+1}{2T_{\mu i}k_{o.т}k_{пч}p}; \\ W_{р.г.}(p) = \frac{T_{sd}''p+1}{2T_{\mu i}k_{o.т}k_{пч}p}; \\ W_{р.п.}(p) = \frac{T_f p+1}{2T_{\mu v}T_f k_{o.п.}k_{т.п.}p}; \\ W_{р.с.}(p) = \frac{Jk_M}{8T_{\mu i}k_{o.с.}} \cdot \frac{1+p k_{н.с}T_{\mu i}}{k_{н.с}T_{\mu i}p}; \\ I_{sq}(I_s) = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{L_{sq}^2}{\psi_s^2}I_s^2}} \cdot I_s; \\ i_{sd}(I_s) = -\frac{L_{sq}}{\psi_s} \sqrt{1+\frac{L_{sq}^2}{\psi_s^2}I_s^2} \cdot I_s; \\ \psi_f(I_s) = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{L_{sq}^2}{\psi_s^2}I_s^2}} \cdot \left(I_{f0}L_f + \frac{L_{sq}I_{sd}}{\psi_s M_{df}} \cdot I_s^2 \right); \\ \psi_s = \psi_{сн} = \frac{U_{сн}}{\pi f_n}, \text{ при } U_{зci} - U_{зсн} \leq 0; \\ \psi_s = \frac{E_{сorp}k_{o.с.}}{Z_p U_{зci}}, \text{ при } U_{зci} - U_{зсн} > 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $k_{пч}$ – коэффициент усиления преобразователя частоты (ПЧ): $k_{пч} = \frac{U_{пч}}{U_y}$; $T_{\mu i}$ – малая некомпенсируемая постоянная времени, равная постоянной времени ПЧ: $T_{\mu i} \approx 5\text{мс}$; $k_{o.т}$ – коэффициент обратной связи (ОС) по току: $k_{o.т} = \frac{U_y}{I_{sm}} \cdot \frac{B}{A}$; U_y – максимальное значение напряжения управляющего сигнала: $U_y = 10\text{В}$; I_{sm} – модуль максимальной величины тока статора, А; $U_{пч}$ – максимальное значение напряжения на выходе ПЧ, В; $T_{\mu v}$ – малая некомпенсируемая постоянная времени цепи ОВ, равная постоянной времени тиристорного возбудителя (ТВ): $T_{\mu v} = 10\text{мс}$; $k_{o.п.}$ – коэффициент ОС по потокосцеплению ОВ: $k_{o.п.} = \frac{U_y}{\psi_{fm}} \cdot \frac{B}{B_0}$; ψ_{fm} – максимальное значение потокосцепления ОВ, Вб; $k_{т.п.}$ – коэффициент усиления ТВ: $k_{т.п.} = \frac{U_{xx}}{U_y}$; U_{xx} – напряжения холостого хода ТВ, В; J – момент инерции одномассовой системы ЭП, кг·м²; $k_{o.с.}$ – коэффициент ОС по скорости: $k_{o.с.} = \frac{U_y}{\omega_{max}} \cdot \frac{B}{\text{рад}}$; ω_{max} – максимальная скорость вращения ротора в физическом пространстве, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; k_M – коэффициент передачи по моменту: $k_M = \frac{U_y}{M_{max}} \cdot \frac{B}{\text{Н·м}}$; $k_{н.с.}$ – подстроечный коэффициент регулятора скорости: $k_{н.с.} = 32$; I_s – ток статора, вычисляемый по формуле: $I_s = \frac{M}{2Z_p \psi_{сн}} \cdot A$; I_{f0} – ток холостого хода СД, А; $U_{сн}$ – модуль фазного напряжения статора, В; f_n – номинальная частота ПЧ, Гц; $E_{сorp}$ – значение ограничения ЭДС вращения, равное номинальной величине: $E_{сorp} = E_{сн} = Z_p \psi_{сн} \omega_n$, В; $U_{зci}$ – значение напряжения i-ого задающего сигнала на контур скорости: $U_{зci} = \frac{\omega_i}{\omega_{max}} U_y$, В; $U_{зсн}$ – напряжение задающего сигнала на контур скорости в номинальном режиме: $U_{зсн} = \frac{\omega_n}{\omega_{max}} U_y$, В.

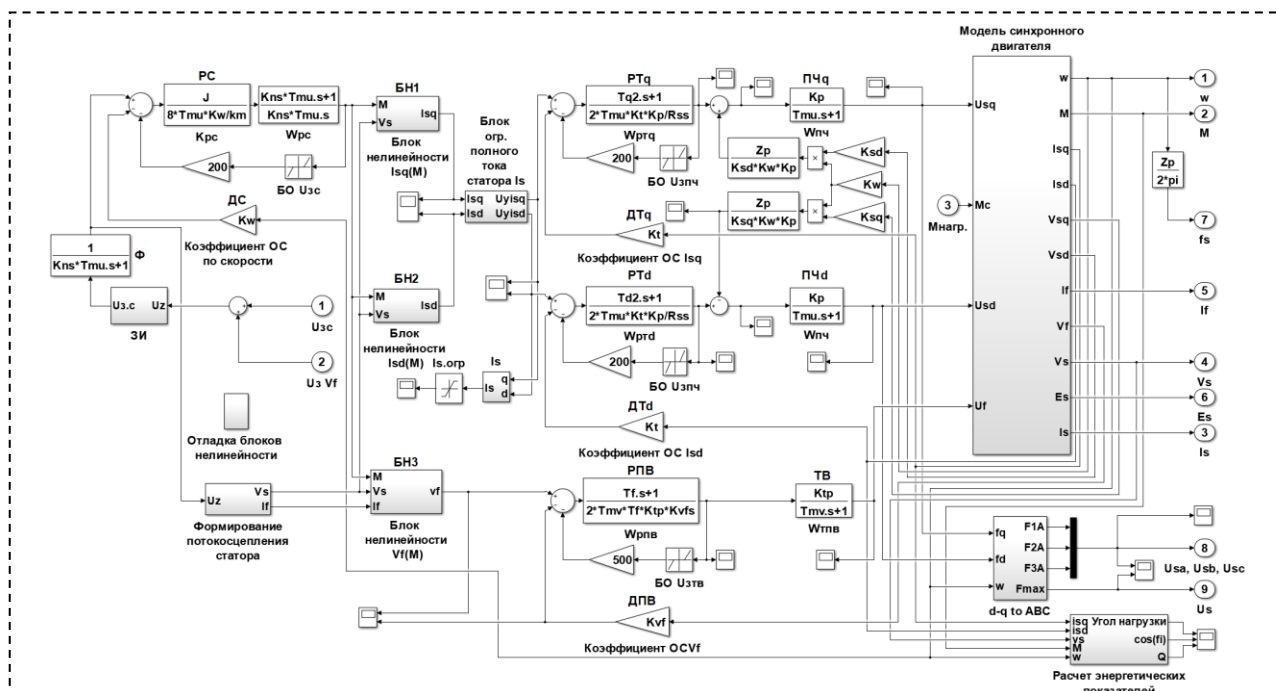


Рис. 7. Имитационная модель САУ синхронной машины с демпферной обмоткой

Fig. 7. Simulation model of the synchronous machine with damper winding

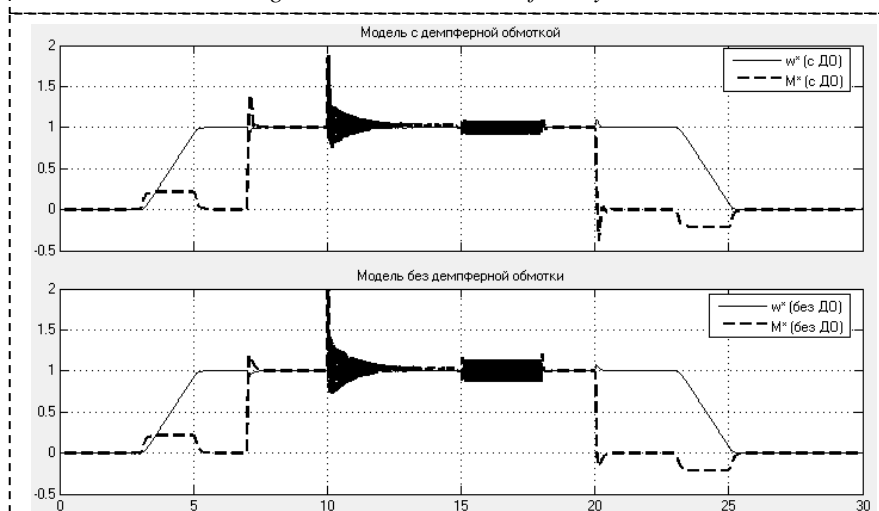


Рис. 8. Динамические характеристики ЭП (режим работы №1)

Fig. 8. Dynamic characteristics of ED (mode of operation No. 1)

Имитационное моделирование. Моделирование САУ СД с демпферной обмоткой с векторным управлением осуществляется на основе параметров машины фирмы ABB типа AMZ 0900LT08LSB. Имитационная модель машины, построенная в соответствии с рис. 2, представлена ниже.

Имитационная модель САУ частотно-регулируемого СД представлена на рисунке 7. Сымитируем несколько режимов работы в системе с ДО и без [2] для сравнения показателей качества их работы.

Характеристики исследуемых режимов приводятся в таблице 2. Переходные процессы по координатам скорости вращения ротора и электромагнитного момента представлены на рис. 8-10.

Результаты исследований. Проведем сравнительный анализ качества переходных процессов, представленных на рис. 8-10. Расчеты показателей обеих систем сведем в таблицу 3.

При анализе данных таблицы 3 можно выявить следующие особенности:

- модель ЭП с ДО является более быстродействующей по сигналу скорости в статическом режиме, однако имеет существенно худшие значения перерегулирования по сигналам тока и момента при одинаковом ускорении двигателя, одинаковом подстроечном коэффициенте регулятора скорости, что наблюдается независимо от режима работы;
- сигналы электромагнитного момента и тока в фазе статора в модели ЭП с демпферной обмоткой имеют меньшее

искажение при появлении колебательной нагрузки на валу независимо от режима работы;

- модель ЭП с демпферной обмоткой оказывается более устойчивой к незатухающим колебательным воздействиям по сигналам электромагнитного момента, скорости вращения ротора, а в некоторых режимах работы и тока в обмотке статора.

В целом можно заключить, что модель электропривода с демпферной обмоткой в лучшей степени проявляет себя при возникновении колебательной нагрузки на валу двигателя, что подтверждает ее сглаживающую функцию. Немаловажным преимуществом такой схемы электропривода также является быстродействие по сигналу скорости при воздействии статической ударной нагрузки на ротор машины. С другой стороны, в таком случае возникают довольно высокие значения перерегулирования по току и электромагнитному моменту, кото-

Таблица 2. Характеристики исследуемого режима работы электропривода

Table 2. Characteristics of studied electric drive operating mode

Режим №	Установившаяся скорость	Нагрузка на валу	Момент возникновения/снятия нагрузки	
			$t_{\text{возн}}, \text{с}$	$t_{\text{возн}}, \text{с}$
1	ω_n	M_n	7	7
		$0,5M_n e^{-t} \cos(2f_n \pi t)$	10	10
		$0,5M_n \cos(2f_n \pi t)$	15	15
2	ω_n	$2,25M_n$	7	7
		$0,5M_n e^{-t} \cos(2f_n \pi t)$	10	10
		$0,5M_n \cos(2f_n \pi t)$	15	15
3	$2\omega_n$	$0,5M_n$	11	11
		$0,5M_n e^{-t} \cos(4f_n \pi t)$	14	14
		$0,5M_n \cos(4f_n \pi t)$	19	19

Таблица 3. Сравнительный анализ показателей качества моделей систем автоматического управления

Table 3. Comparative analysis of the automatic control systems models quality indicators

Режим №	Модель	Вид нагрузки в соответствии с таблицей 2							
		Статическая			Затухающие колебания		Незатухающие колебания		
		$\sigma_{I_s}, \%$	$\sigma_M, \%$	$t_{\text{пп.с}}, \text{с}$	$\sigma_{I_s}, \%$	$\sigma_M, \%$	$A_{I_s}, \text{о. е.}$	$A_M, \text{о. е.}$	$A_\omega, \text{о. е.}$
1	С ДО	43,92	40,32	0,1874	60,24	57,37	0,0867	0,0739	0,0125
	Без ДО	16,82	17,83	0,2636	65,86	75,62	0,0822	0,1080	0,0134
2	С ДО	29,07	24,48	0,2266	18,84	20,18	0,0985	0,1182	0,0136
	Без ДО	17,16	14,56	0,2555	21,51	23,03	0,1200	0,1529	0,0146
3	С ДО	49,36	66,64	0,0984	25,07	27,82	0,1186	0,0734	0,0131
	Без ДО	39,89	52,72	0,0708	26,73	28,92	0,1215	0,1001	0,0137

Примечание: σ_i – перерегулирование по i-ой величине, $t_{\text{пп.с}}$ – время регулирования по скорости при приложении нагрузки; A_i – амплитуда колебаний в относительных единицах: $A_i = \frac{|X_{i,\text{мгновенное}} - X_{i,\text{н}}|}{X_{i,\text{н}}}$.

рые могут приводить к излишней перегрузке электрической цепи и механической части привода. Значительного снижения перерегулирования можно добиться за счет повышения подстроечного коэффициента регулятора скорости, однако такая настройка может привести к равноценному ухудшению быстродействия электропривода.

Заключение. В рамках проведения исследовательской работы был разработан универсальный математический аппарат, который может быть применен в дальнейшем при построении систем автоматического управления проектируемых приводов на основе частотно-регулируемого синхронного двигателя. С использованием данного аппарата была построена имитационная модель ЭП, которая может быть также использована при проектировании электромеханических систем. Имитацион-

ная модель ЭП с демпферной обмоткой позволяет оценить целесообразность ее применения в том или ином случае.

На основе смоделированных режимов работы электропривода с демпферной обмоткой и без были также проанализированы преимущества и недостатки обеих систем. Применение ДО, как показывают полученные динамические характеристики, в целом негативно влияет на качество переходных процессов по координатам тока и электромагнитного момента при возникновении обычных ударных нагрузок, на что ранее указывал Слежановский О.В. и др. в работе [5]. Использование успокоительной обмотки в конструкции частотно-регулируемой синхронной машины может быть в целом оправдано в электроприводах, чувствительных к колебаниям нагрузки.

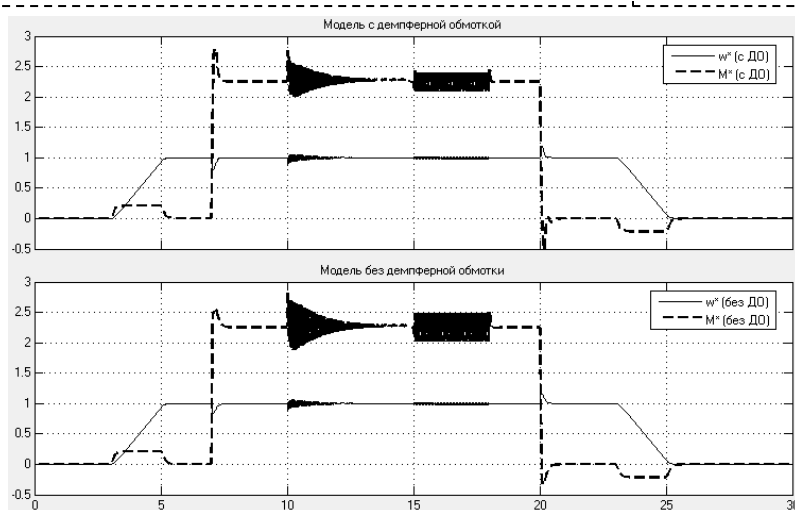


Рис. 9. Динамические характеристики ЭП (режим работы №2)
Fig. 9. Dynamic characteristics of ED (mode of operation No.2)

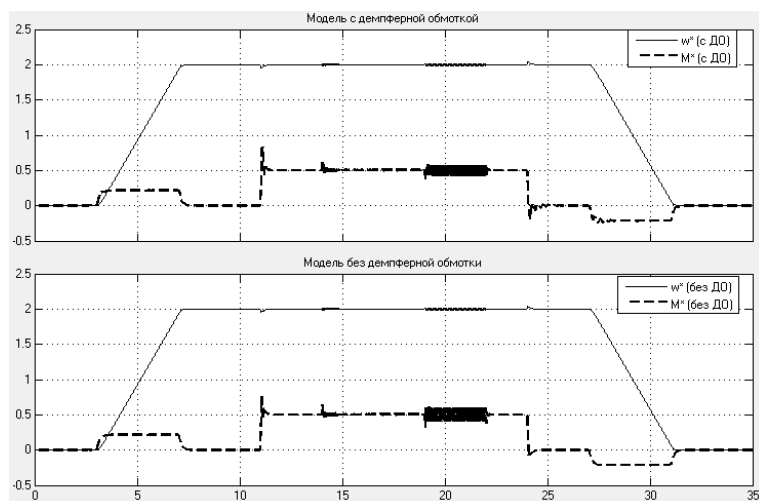


Рис. 10. Динамические характеристики ЭП (режим работы №3)
Fig. 10. Dynamic characteristics of ED (mode of operation No.3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасияров В. Р. Совершенствование электро-технических систем реверсивной клетки толстолистого прокатного стана : дис. ... докт. техн. наук. – Магнитогорский государственный технический университет, Магнитогорск, 2021.
2. Кузнецов В. А., Зайцев Н. С., Кузнецова Е. С. Имитационное моделирование системы автоматического управления главным электроприводом прокатного толстолистого стана по системе «частотный преобразователь – синхронный двигатель» // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, 25-26 ноября 2020. С. 32-40.
3. Design of observer of flux linkage of synchronous drive of rolling mill / I. R. Abdulvelev, T. R. Khrumshin, G. P. Kornilov, A. A. Nikolaev // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering, 2016. V. 16, No. 3. P. 84-92.
4. Finch J. W., Giaouris D. Controlled AC electrical drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics, March 2008. V. 55, No. 2. P. 481-491.

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

6. Вейнгер А. М. Регулируемый синхронный электропривод. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 224 с. : ил.

7. Маклаков А. С., Маклакова Е. А., Гасияров В.Р. Математическое моделирование синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки // Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015)». 2015. С. 131-136.

8. Маклаков А. С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистого стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный журнал. 2014. Т. 2, № 3. С. 16-25.

9. Алгоритм векторного управления гребными электроприводами на основе синхронных двигателей для ледоколов с движителями типа «АЗИПОД» / В. И. Вершинин, С. В. Махонин, В. А. Паршиков, В. А. Хомяк // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Т. 3, № 389. С. 103-112.

10. Электропривод современных шахтных подъемных машин / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой, И. С. Кузнецов, Жидков А. А., Воликов А. А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-2. С. 157-165.

11. Преобразователи частоты ВПЧС для синхронного электропривода с тяжелыми условиями пуска : техническое описание. Дубна : ЭНЕРГОИМПЭКС, 2014. 12 с.

12. Кузнецов В. А., Кузнецова Е. С., Зайцев Н. С. Модернизация системы управления синхронным электроприводом вращения валков прокатного стана // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды V Международной научно-практической конференции, 14 апреля 2021. Новокузнецк : изд. центр СибГИУ, 2021 г. С. 315-321.

13. Шрейнер Р.Т. Медведев А. В., Поляков В. Н. Двухзонная система регулирования скорости явнополюсного синхронного электропривода // Современный взгляд на проблемы технических наук, 10 сентября 2015 г. Уфа : Изд-во «Инновационный центр развития образования и науки». 2015. С. 79-86.

14. Гасияров В. Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толсто-

листвого прокатного стана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: машиностроение. 2019. Т. 19, № 2. С. 5-18.

15. Dwivedi S. K., Singh B. Vector control vs direct torque control comparative evaluation for PMSC drive // Institute of electrical and electronics engineers, 20-23 December 2010. P. 1-8.

16. Giridharan K., Chitra A., Vanish J., Sultana W. R. Vector control of permanent magnet synchronous motor using high performance hexagram inverter // International journal of engineering and technology (IJET), Dec 2012 – Jan 2013. V. 4, No. 6. P. 486-493.

17. Cuji W. D., Arcos-Aviles D. Direct torque control and field oriented control for permanent magnet

synchronous motor // Ingenieria, May 2019. V. 24, No. 2. P. 1-13.

18. Sarhan G., Nafeh A., Shaalan M. H. Direct torque control of PM synchronous // Journal of Electrical Engineering, January 2010. Vol. 10. P. 24-31.

19. Фираго Б. И., Александровский С. В. Выбор параметров демпферной обмотки синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением при скалярном частотном управлении // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Международной научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2018. Т. 1. С. 244.

20. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1950. 553 с.

© 2022 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Островляничик Виктор Юрьевич, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), доктор техн. наук, профессор

Кубарев Василий Анатольевич, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), кандидат техн. наук, доцент, kubarev.sibsiu@list.ru

Зайцев Никита Сергеевич, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Модзелевский Дмитрий Евгеньевич, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), кандидат техн. наук, доцент

Кузнецова Елена Степановна, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), кандидат техн. наук, доцент

Маршев Дмитрий Александрович, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Заявленный вклад авторов:

Островляничик В.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Кубарев В.А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Зайцев Н.С. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Модзелевский Д.Е. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Кузнецова Е.С. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Маршев Д.А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Victor Yu. Ostrovlyanchik, Vasiliy A. Kubarev*, Nikita S. Zaitsev, Dmitriy E. Modzelevskiy, Elena S. Kuznetsova, Dmitriy A. Marshev

Siberian State Industrial University

E-mail: kubarev.sibsiu@list.ru

MODELLING OF THE TWO-ZONE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE FREQUENCY CONTROLLED SYNCHRONOUS MOTOR WITH A DAMPER WINDING



Article info

Received:

20 April 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

04 October 2022

Keywords: an automatic control system, a synchronous motor with a damping winding, vector control, a magnetic flux linkage of the stator winding, mathematical and simulation modelling, dynamic characteristics, qualitative indicators, Park-Gorev equations.

Abstract.

Building mathematical and simulation models of the automatic control system of a salient pole synchronous motor with a damper winding is proposed in this article. It's supposed that the models which have been obtained in the work and the approach to their construction will be useful further in designing real electric drives, regardless of their application.

The urgency of the discussed issue. A frequency controlled electric drive with a synchronous motor is becoming increasingly widespread as a drive for especially large aggregates and installations. A field excited synchronous machine is a complex multidimensional nonlinear control object that accordingly affects the complexity of automatic control system building. Complication of synchronous machine design due to use of damper winding often creates an additional difficulty in building the automatic control system. In this connection, the issue of developing a unified approach to building the automatic control system for the synchronous motor with the damper winding becomes quite relevant.

The main aim of the study: development of the universal mathematical apparatus for the successful synthesis of the automatic control system of the synchronous machine with damper winding and simulation of the above system for evaluation of its quality indicators.

The methods used in the study: mathematical modeling based on the operator method for calculating electromechanical systems; simulation modeling in the graphical programming environment MATLAB Simulink.

The results. Mathematical and simulation models of the automatic control system of the frequency controlled synchronous motor with damper winding, the dynamic characteristics of electric drive model and comparative analysis of its transient processes with those observed in the model without damper winding are presented in this article.

For citation: Ostrovlyanchik V.Yu., Kubarev V.A., Zaitsev N.S., Modzelevskiy D.E., Kuznetsova E.S., Marshev D.A. Modelling of the two-zone automatic control system of the frequency controlled synchronous motor with a damper winding. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 5(163):46-58 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-46-58

REFERENCES

1. Gasiyarov V.R. Sovershenstvovanie elektrotehnicheskikh sistem reversivnoy kleti tolstolistovogo prokatnogo stana [Improvement of Electrical System of the Reversing Stand of a Thick Plate Rolling Mill]. Magnitogorsk, Publishing of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2021. 359 P.
2. Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S., Zaitsev N.S. Imitatsionnoe modelirovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya glavnym elektropriivodom prokatnogo tolstolistovogo stana po sisteme «chastotnyy preobrazovatel – sinkhronnyy dvigatel» [Simulation Modeling of the Automatic Control System of the Main Electric Drive of the Rolling Plate Mill According to the “Frequency Converter – Synchronous Mo-

tor” System]. *Avtomatizirovanny elektropriivod i promyshlennaya elektronika : sbornik statey IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novokuznetsk, Publishing of the Siberian State Industrial University, 2020. P. 32-40.

3. Abdulveleev I. R., Khrumshin T. R., Kornilov G. P., Nikolaev A. A. Design of observer of flux linkage of synchronous drive of rolling mill. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2016; 16(3): 84-92.

4. Finch J. W., Giaouris D. Controlled AC electrical drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008; 55(2): 481-491.

5. Slezhanovskiy O.V., Datskovskiy L.Kh., Kuznetsov I.S. Sistemy podchinennogo regulirovaniya

electroprivodov peremennogo toka s ventilyami preobrazovatelyami [Systems of Subordinate Regulation of AC Electric Drives with Valve Converters]. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 256 p. ill.

6. Veynger A.M. Reguliruemyy sinkhronnyy elektroprivod [Controlled Synchronous Electric Drive]. Moscow: Energoatomizdat; 1985. 224 p. ill.

7. Maklakov A.S., Maklakova E.A., Gasiyarov V.R. Matematicheskoe modelirovanie sinkhronnogo elektroprivoda reversivnoy prokatnoy kleti [Mathematical Modeling of Synchronous Electric Drive of a Reversible Rolling Stand]. *Trudy mezhdunarodnoy shestnadtsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroprivod peremennogo toka (EPPT 2015)"*. 2015. P. 131-136.

8. Maklakov A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tololistovogo stana 5000 [Simulating Modeling of the Main Electric Drive of the Rolling Stand of the Thick-Sheet Mill 5000]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy zhurnal*. 2014; 2(3): 16-25.

9. Vershinin V.I., Makhonin S.V., Parshikov V.A., Khomiak V.A. Algoritmy vektornogo upravleniya grebnymi elektroprivodami na osnove sinkhronnykh dvigateley dlya ledokolov s dvizhitelyami tipa "AZI-POD" [Algorithm of Vector Control of Electric Rowing Drives Based on Synchronous Motors for Icebreakers with "AZIPOD" Type Propulsion]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2019; 3(389): 103-112.

10. Datskovskiy L.Kh., Rogovoy V.I., Kuznetsov I.S., Zhidkov A.A., Volikov A.A. Elektroprivod sovremennykh shakhtnykh podemnykh mashin [Electric Drive of Modern Mine Lifting Machines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskaya nauka*. 2010; 3-2: 157-165.

11. Preobrazovateli chastoty VPCS dlya sinkhronnogo elektroprivoda s tyazholymi usloviyami pushki: tekhnicheskoe opisanie. Dubna: ENERGO-IMPEKS; 2014. 12 p.

12. Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S., Zaytsev N.S. Modernizatsiya sistemy upravleniya sinkhronnym elektroprivodom vrashcheniya valkov prokatnogo stana [Modernization of the Control System of the Synchronous Electric Drive of Rotation of the Rolls of the Rolling Mill]. *Modelirovanie i naukoemkie informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh: trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novokuznetsk. Publishing of the Siberian State Industrial University, 2021. P. 315-321.

13. Shreyner R.T., Medvedev A.V., Polyakov V.N. Dvukhzonnaya Sistema regulirovaniya skorosti yavnopolyusnogo sinkhronnogo elektroprivoda [Two-Zone Speed Control System of a Single-Pole Synchronous Electric Drive]. *Sovremennyy vzglyad na problem tekhnicheskikh nauk, 10 sentyabrya, 2015. Ufa. Publishing house "Innovative Center for the Development of Education and Science"*. 2015. P. 79-86.

14. Gasiyarov V.R. Sposob ogranicheniya dinamicheskikh nagruzok mekhatronnykh sistem kleti tololistovogo prokatnogo stana [A Method for Limiting Dynamic Loads of Mechatronic Systems of a Thick-Sheet Rolling Mill Crate]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: mashinostroenie [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering.]*. 2019; 19(2): 5-18.

15. Dwivedi S. K. Vector control vs direct torque control comparative evaluation for PMSC drive / S. K. Dwivedi, B. Singh. *Institute of electrical and electronics engineers*. 2010. P. 1-8.

16. Giridharan K., Chitra A., Vanish J., Sultana W. R. Vector control of permanent magnet synchronous motor using high performance hexagram inverter. *International journal of engineering and technology (IJET)*. 2012-2013; 4(6): 486-493.

17. Cuji W. D., Arcos-Aviles D. Direct torque control and field oriented control for permanent magnet synchronous motor. *Ingenieria*. 2019; 24(2): 1-13.

18. Sarhan G., Nafeh A., Shaalan M. H. Direct torque control of PM synchronous. *Journal of Electrical Engineering*. 2010; 10: 24-31.

19. Firago B.I., Aleksandrovskiy S.V. Vybory parametrov dempfernoy obmotki sinkhronnogo dvigatelya s elektromagnitnym vzbuzhdeniem pri skalyarnom chastotnom upravlenii [Selection of Parameters of the Damper Winding of an Asynchronous Motor with Electromagnetic Excitation with Scalar Frequency Control]. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 16-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Minsk. BNTU. 2018; 1: 244.

20. Gorev A.A. Perekhodnye processy sinkhronnoy mashiny [Transients of a Synchronous Machine]. Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo; 1950. 553 p.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). The author declare no conflict of interest.

About the author:

Victor Yu. Ostrovlyanchik, Siberian State Industrial University (654007, Russian Federation, Novokuznetsk, Kirova Street 42), Dr. Sc. in Engineering, Professor

Vasiliy A. Kubarev, Siberian State Industrial University (654007, Russian Federation, Novokuznetsk, Kirova Street 42), C. Sc. in Engineering, Associate Professor

Nikita S. Zaitsev, Postgraduate Student, Siberian State Industrial University (654007, Russian Federation, Novokuznetsk, Kirova Street 42),

Dmitriy E. Modzelevskiy, Siberian State Industrial University (654007, Russian Federation, Novokuznetsk, Kirova Street 42), C. Sc. in Engineering, Associate Professor

Elena S. Kuznetsova, Siberian State Industrial University (654007, Russian Federation, Novokuznetsk, Kirova Street 42), C. Sc. in Engineering, Associate Professor

Dmitriy A. Marshev, Postgraduate Student, Siberian State Industrial University (654007, Russian Federation, Novokuznetsk, Kirova Street 42),

Contribution of the authors:

Victor Yu. Ostrovlyanchik – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Vasily A. Kubarev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Nikita S. Zaitsev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Dmitriy E. Modzelevskiy – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Elena S. Kuznetsova – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Dmitriy A. Marshev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

