
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2023

ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)

12-14 декабря 2023 г.

Новокузнецк
2023

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, к.т.н., доц. В.А. Кубарев,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве)
AS'2023: труды Всероссийской научно–практической конференции
(с международным участием), 12-14 декабря 2023 г. / Министерство
науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский
государственный индустриальный университет ; под общ. ред.
В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. –
420 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКОЙ В СИСТЕМЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ «ПАРКА-ГОРЕВА»

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

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, kva2003@list.ru

Аннотация. В работе представлено построение математической модели синхронного двигателя (СД) типовой конструкции (с обмоткой возбуждения (ОВ), располагаемой на роторе) с демпферной (успокоительной) обмоткой на индукторе в системе относительных единиц (о.е.) «Парка-Горева». Предлагаемая модель и способ ее построения могут быть полезны при разработке «частотно-напряженческих» систем автоматического регулирования (САР) синхронной машины с векторным управлением, синтез которых осуществляется в соответствии с принципом подчиненного регулирования.

Ключевые слова: синхронный двигатель, демпферная обмотка, математическое моделирование, уравнения Парка-Горева, система относительных единиц, базисные величины, система автоматического регулирования.

Abstract. The paper presents the construction of a mathematical model of a synchronous motor of a typical design (with an excitation winding located on the rotor) with a damper (amortisseur) winding on the inductor in the per-unit (p.u.) system of «Park-Gorev». The proposed model and the method of its construction can be useful in the development of «frequency-voltage» automatic control systems (ACS) of a vector control synchronous machine, the synthesis of which is carried out in accordance with the principle of subordinate regulation.

Keywords: synchronous motor, damper winding, mathematical modeling, Park-Gorev equations, per-unit systems, basic values, automatic control system.

Введение

Частотно-регулируемый (ЧР) электропривод (ЭП) большой мощности (от единиц до десятков МВт), основным силовым электромеханическим агрегатом которого выступает СД с электромагнитным (ЭМ) возбуждением, начиная с конца XX века и продолжая по сей день, активно вытесняет ранее повсеместно применяющийся регулируемый ЭП постоянного тока. Так, СД с полеориентированным управлением или с прямым управлением моментом успешно внедряются и эксплуатируются в качестве приводной силы валков крупных станов горячей и холодной прокатки, шахтно-подъемных установок, мельниц, нефтеперекачивающих установок, судов и др. [1-4]. Применение до недавних пор электромеханических систем (ЭМС) постоянного тока в ответственных механизмах большой мощности объяснялось их общеизвестными достоинствами, например, легкостью регулирования координат ЭП, высокой точностью исполнения последним заданных законов, простотой САР и относительно хорошими энергетическими и экономическими показателями [5]. Тем не менее, появление полностью управляемых силовых электронных ключей на рубеже двадцатого и двадцать первого столетий, а также дальнейшее их бурное развитие позволило создать высокопроизводительные ЧР ЭП переменного тока, в частности, синхронный ЭП, получающий питание от двухзвенного преобразователя частоты или реже от непосредственного преобразователя частоты. В настоящее время ЧР синхронный ЭП является наиболее подходящим для применения в тех областях, в которых существуют довольно жесткие требования, предъявляемые условиями технологического процесса, и в которых наблюдается колоссальное потребление электроэнергии, связанное с мощностью приводных механизмов. При этом, как показывает отечественная и зарубежная практика, электроприводу на основе синхронной машины с обмоткой возбуждения (ОВ) на роторе уделяется намного меньше исследовательского внимания по сравнению с ЧР приводом на основе асинхронной короткозамкнутой машины и синхронной машины с постоянными магнитами. В частности, в технической литературе крайне

мало источников, поднимающих вопросы построения моделей двигателя для последующего их синтеза с САР при увеличении контуров ротора.

Резюмируя все вышесказанное, можно обосновать актуальность вопроса построения универсальной модели синхронной машины с демпферной обмоткой (ДО).

Теоретические основания работы

Успокоительная обмотка в конструкции синхронной явнополусной машины может выполнять две функции – использоваться для асинхронного пуска машины, что в подавляющем большинстве случаев применяется для нерегулируемых СД, а также служить для демпфирования колебаний ротора [6]. Частотно-регулируемому СД не требуется пуск в асинхронном режиме и, в связи с этим наличие в его конструкции ДО не является обязательным условием. Более того, ряд авторов утверждает, что использование ДО для ЧР синхронного ЭП не является рациональным, поскольку приводит к ухудшению показателей качества переходных процессов и усложняет форсировку последних [7-9]. Тем не менее как показывает практика в промышленности находят применение как СД с одним замкнутым контуром ротора – контуром возбуждения, так и частотно-регулируемые машины с двумя (с демпферной обмоткой) или даже с тремя контурами (с компенсационной обмоткой), к примеру, синхронный двигатель AMZ900LT08LSB, установленный на приводе вращения валков прокатного стана рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Как правило, при анализе физических процессов, происходящих при работе синхронной машины в различных режимах, пользуются одной из нескольких систем относительных единиц, позволяющих упростить ряд уравнений, исключив из рассмотрения некоторые коэффициенты и унифицировать форму представления переменных, выразив их в долях. В дальнейшем условимся при обозначении величин, выраженных в о.е., ставить знак «—» над ними, к примеру – $\tilde{x}$.

Перевод различных переменных, параметров и постоянных машины из абсолютных единиц (а.е.) в относительные производится путем их нормирования относительно базовых (базисных) величин. Обычно за базовые величины, характеризующие электрическую цепь статора, в различных системах относительных единиц принимают номинальные параметры, к примеру номинальную амплитуду фазного тока, напряжения, номинальную среднюю мощность и др. [6]. Базисные величины, относящиеся к цепям ротора (ОВ и ДО), в свою очередь, не являются общепринятыми и, как правило, выбираются исходя из удобства рассмотрения тех или иных вопросов, относящихся к работе СД. На практике получили наибольшее распространение система о.е., предложенная Горевым, т.н. система «Парка-Горева» и система о.е. x_{ad} [6, 10]. Основой системы о.е. для контуров индуктора служат базисные величины токов, протекающих в ОВ I_{f6} и в ДО I_{DW6} . В рамках данной статьи используется система о.е. «Парка-Горева», ввиду более простого перевода величин из а.е. в о.е., поскольку не требуется учитывать обмоточные данные машины, а также использования системы уравнений Парка-Горева в первоначальном виде. При выборе данной системы под базисным током обмотки возбуждения I_{f6} , равно как и демпферной обмотки I_{DW6} , понимают такой ток, который при холостом ходе (ХХ) машины, вращение ротора которой происходит с базисной угловой скоростью, индуцирует в обмотках статора базисное напряжение [6]. Таким образом, базисный ток обмотки возбуждения определяется по спрямленной в начале координат характеристике ХХ СД, построенной в относительных или абсолютных единицах [11]. При определении базисного тока ДО необходимо также учитывать, что она может также быть разложена по двум осям симметрии, в связи с чем при определении базовых токов стоит рассматривать базовый ток, протекающий в ДО по прямой (d) I_{D6} и квадратурной (q) I_{Q6} оси.

Определение базисных значений токов, протекающих в ДО, разложенной по прямой и квадратурной оси соответственно, можно осуществить по следующим формулам:

$$I_{D6} = \frac{M_{df}}{M_{dD}} I_{f6}, \quad (1)$$

$$I_{Q6} = \frac{M_{df}}{M_{qQ}} I_{f6}, \quad (2)$$

где M_{df} – коэффициент взаимной индукции между ОВ и обмоткой статора, расположенной на оси d, Гн;
 M_{dD} – коэффициент взаимной индукции между ДО и обмоткой статора, которые расположены на продольной оси, Гн;
 M_{qQ} – коэффициент взаимной индукции между ДО и обмоткой статора, которые расположены на поперечной оси, Гн.

Математическое моделирование

Применяя систему о.е. «Парка-Горева», базисные величины которой можно найти в источниках [6, 12], можно привести систему уравнений Парка-Горева, представленную, к примеру, в трудах [7, 12], к следующему виду:

$$\bar{u}_{sd} = \bar{R}_s \bar{i}_{sd} + p \frac{\bar{\psi}_{sd}}{\omega_{ан.б}} - \bar{\omega}_{ан} \bar{\psi}_{sq}, \quad (3)$$

$$\bar{u}_{sq} = \bar{R}_s \bar{i}_{sq} + p \frac{\bar{\psi}_{sq}}{\omega_{ан.б}} - \bar{\omega}_{ан} \bar{\psi}_{sd}, \quad (4)$$

$$\bar{U}_f = I_f + p \Phi_f T_f, \quad (5)$$

$$\bar{\psi}_{sd} = \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + \bar{I}_f + \bar{i}_D, \quad (6)$$

$$\bar{\psi}_{sq} = \bar{L}_{sq} \bar{i}_{sq} + \bar{i}_Q, \quad (7)$$

$$\Phi_f = \mu_{fd} \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + I_f + m_f \bar{i}_D, \quad (8)$$

$$0 = \frac{1}{T_D} \bar{i}_D + p \bar{\psi}_D, \quad (9)$$

$$0 = \frac{1}{T_Q} \bar{i}_Q + p \bar{\psi}_Q, \quad (10)$$

$$\bar{\psi}_D = \mu_{dD} \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + m_D \bar{I}_f + \bar{i}_D, \quad (11)$$

$$\bar{\psi}_Q = \mu_{qQ} \bar{L}_{sq} \bar{i}_{sq} + \bar{i}_Q, \quad (12)$$

где $\bar{u}_{sd}$, $\bar{u}_{sq}$ и $\bar{U}_f$ – проекции пространственного вектора напряжения статора на продольную и поперечную ось соответственно и напряжение на зажимах ОВ;
 $\bar{R}_s$ – активное сопротивление фазной обмотки статора;
 $\bar{i}_{sd}$, $\bar{i}_{sq}$ и $\bar{I}_f$ – проекции пространственного вектора тока, протекающего в фазной обмотке статора, на продольную и поперечную ось соответственно и ток в обмотке возбуждения;
 p – оператор дифференцирования: $p = \frac{d}{dt}$; $\bar{\psi}_{sd}$, $\bar{\psi}_{sq}$ и Φ_f – проекции пространственного вектора потокоцепления статора на продольную и поперечную ось соответственно и потокоцепление обмотки возбуждения;

$\omega_{эл.б}$	– базисная угловая электрическая частота равная номинальной угловой скорости вращающегося магнитного поля: $\omega_{эл.б} = 2\pi f_n, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
f_n	– номинальная угловая частота питающего обмотку статора напряжения равная номинальной выходной частоте преобразователя частоты или частоте питающей сети, Гц;
$\bar{\omega}_{эл}$	– угловая электрическая частота;
T_f	– электромагнитная постоянная времени цепи ОБ: $T_f = \frac{L_f}{R_f}, \text{с}$;
L_f	– коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения, Гн;
R_f	– активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;
$\bar{L}_{sd}$ и $\bar{L}_{sq}$	– коэффициенты самоиндукции обмоток статора, расположенных на продольной и поперечной оси соответственно, Гн;
$\bar{i}_D$ и $\bar{i}_Q$	– токи, протекающие в демпферной обмотке, разложенной на продольную и поперечную ось соответственно;
μ_{fd}	– коэффициент магнитной связи между обмоткой статора, расположенной на оси d, и ОБ: $\mu_{fd} = \frac{3}{2} \frac{M_{fd}^2}{L_f L_{sd}}$;
L_{sd}	– коэффициент самоиндукции обмотки статора по оси d, выраженный в а.е., Гн;
m_f	– коэффициент связи между ДО, расположенной на продольной оси, и ОБ: $m_f = \frac{M_{fd} M_{df}}{L_f M_{dd}}$;
M_{fD}	– коэффициент взаимной индукции между ОБ и ДО, расположенной на продольной оси, Гн;
T_D	– электромагнитная постоянная времени демпферной обмотки, расположенной на продольной оси: $T_D = \frac{L_D}{R_D}, \text{с}$;
T_Q	– электромагнитная постоянная времени демпферной обмотки, расположенной на поперечной оси: $T_Q = \frac{L_Q}{R_Q}, \text{с}$;
L_D и L_Q	– коэффициенты взаимной индукции демпферной обмотки, разложенной на продольную и поперечную ось соответственно, Гн;
R_D и R_Q	– активные сопротивления демпферной обмотки, разложенной на продольную и поперечную ось соответственно, Ом;
$\bar{\psi}_D$ и $\bar{\psi}_Q$	– потокосцепления демпферной обмотки, разложенной на продольную и поперечную ось соответственно;
μ_{dD}	– коэффициент магнитной связи между ДО и обмоткой статора, которые расположены на продольной оси: $\mu_{dD} = \frac{3}{2} \frac{M_{dD}^2}{L_D L_{sd}}$;
m_D	– коэффициент связи между ДО, расположенной на продольной оси, и обмоткой возбуждения: $m_D = \frac{M_{fD} M_{dD}}{L_D M_{df}}$;
μ_{qQ}	– коэффициент магнитной связи между ДО и обмоткой статора, которые расположены на поперечной оси: $\mu_{qQ} = \frac{3}{2} \frac{M_{qQ}^2}{L_Q L_{sq}}$;
L_{sq}	– коэффициент самоиндукции обмотки статора, расположенной на поперечной оси, выраженный в а.е., Гн.

Синхронная машина является нелинейным многомерным объектом, содержащим три входа: проекции пространственного вектора напряжения статора по оси d, проекции пространственного вектора напряжения статора по оси q и напряжения на обмотке возбуждения. По типу основных регулируемых координат модели СД можно разделить на

две категории: для синтеза «частотно-напряженческой» САР и для синтеза «частотно-токовой» САР. В первом случае основными регулируемыми координатами служат проекции тока статора $\bar{i}_{sd}$ и $\bar{i}_{sq}$, а также потокосцепление ОВ Ψ_f , во втором – вместо потокосцепления ОВ выступает ток I_f , протекающий в ней [7]. В рамках данной статьи проводится построение модели СД удобной для синтеза с «частотно-напряженческой» САР, которая является наиболее распространенной на практике.

Вывод уравнений, характеризующих модель СД с ДО, осуществляется за счет преобразований уравнений (3) – (12) в порядке, представленном в таблице 1.

Таблица 1 – Последовательность преобразований системы уравнений Парка-Горева

Переменная модели	Последовательность преобразований уравнений (3) – (12)
$\bar{i}_{sd}(p)$	(6) → (3) = (I); (8) → (5) = (II); (11) → (9) = (III); $\frac{1}{T_f} \cdot (II) \rightarrow (I) = (IV)$; $\frac{m_D}{T_f} \cdot (II) \rightarrow (III) = (V)$; (V) → (IV).
$\bar{i}_{sq}(p)$	(7) → (4) = (I); (12) → (10) = (II); (II) → (I).
$I_f(p)$	переменная выражается из уравнения (8)
$\bar{\psi}_{sd}(p)$	(8) → (6) = (I); (8) → (12) = (II); (II) → (I).
$\bar{\psi}_{sq}(p)$	(7) → (12)
$\Psi_f(p)$	(8) → (5)
$\bar{i}_D(p)$	(8) → (11) = (I); (I) → (9)
$\bar{i}_Q(p)$	(12) → (10)
$\bar{\psi}_D(p)$	$m_D \cdot (8) \rightarrow (11)$
$\bar{\psi}_Q(p)$	соответствует уравнению (12)
Примечание: арабские цифры соответствуют порядковому номеру уравнений Парка-Горева (3) – (12), римские цифры – результат подстановки уравнений (3) – (12) друг в друга	

После выполнения последовательных преобразований уравнений (3) – (12) получаем следующие уравнения, характеризующие модель СД с ДО:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{i}_{sd} = \frac{1/R_s}{1+pT''_{sd}} \cdot \left[\bar{u}_{sd} - \frac{1}{\omega_{\Delta\Delta.6}} \cdot \left(\frac{\rho_D}{T_f} (\bar{U}_f - \bar{I}_f) - \frac{\rho_f}{T_D} \bar{i}_D \right) + \bar{\omega}_{\Delta\Delta} \bar{\psi}_{sq} \right], \\ \bar{i}_{sq} = \frac{1/R_s}{1+pT''_{sq}} \cdot \left[\bar{u}_{sq} + \frac{\bar{i}_Q}{\omega_{\Delta\Delta.6} T_Q} - \bar{\omega}_{\Delta\Delta} \bar{\psi}_{sd} \right], \\ \bar{I}_f = \bar{\Psi}_f - \mu_{fd} \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} - m_f \bar{i}_D, \\ \bar{\psi}_{sd} = L''_{sd} \bar{i}_{sd} + \rho_f \bar{\psi}_D + \rho_D \bar{\Psi}_f, \\ \bar{\psi}_{sq} = L''_{sq} \bar{i}_{sq} + \bar{\psi}_Q, \\ \bar{\Psi}_f = \frac{1}{1+pT_f} \cdot (\bar{U}_f + \mu_{fd} \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + m_f \bar{i}_D), \\ \bar{i}_D = -\frac{pT_D}{1+pT'_D} \cdot [\mu_{dD} (1 - m_f) \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + m_D \bar{\Psi}_f], \\ \bar{i}_Q = -\frac{T_Q \mu_{qQ} L_{sq} p}{1+pT_Q} \bar{i}_{sq}, \\ \bar{\psi}_D = \mu_{fD} (1 - m_f) \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + m_D \bar{\Psi}_f + (1 - \mu_{fD}) \bar{i}_D, \\ \bar{\psi}_Q = \mu_{qQ} \bar{L}_{sq} \bar{i}_{sq} + \bar{i}_Q, \end{array} \right. \quad (13)$$

где T''_{sd} – ЭМ постоянная времени обмотки статора на оси d в сверхпереходном режиме: $T''_{sd} = \frac{L''_{sd}}{R_s}$, с;

- L''_{sd} – сверхпереходная индуктивность обмотки статора на оси d:

$$L''_{sd} = L_{sd}(1 - \mu_{fd}) - \frac{\mu_{ad}(1 - m_f)^2}{1 - \mu_{fd}} L_{sd}, \text{ Гн};$$
- ρ_D – введенная постоянная: $\rho_D = \frac{1 - m_D}{1 - \mu_{fd}}$;
- ρ_f – введенная постоянная: $\rho_f = \frac{1 - m_f}{1 - \mu_{fd}}$;
- T''_{sq} – ЭМ постоянная времени обмотки статора на оси q в сверхпереходном режиме: $T''_{sq} = \frac{L''_{sq}}{R_s}, \text{ с};$
- L''_{sq} – сверхпереходная индуктивность обмотки статора на оси q:

$$L''_{sq} = L_{sq}(1 - \mu_{qD}), \text{ Гн};$$
- T'_D – ЭМ постоянная времени ДО по оси d: $T'_D = \frac{L'_D}{R_D}, \text{ с};$
- L'_D – переходная индуктивность ДО на оси d: $L'_D = \frac{L_D(1 - \mu_{fd})}{R_D}, \text{ Гн};$
- μ_{fD} – коэффициент магнитной связи между ОВ и ДО, расположенной на продольной оси: $\mu_{fD} = \frac{M_{fD}^2}{L_D L_f}.$

В соответствии с системой уравнений модели (13) и уравнениями ЭМ момента и движения ЭП [8, 12] получаем структурную схему СД с ДО, представленную на рисунке 1.

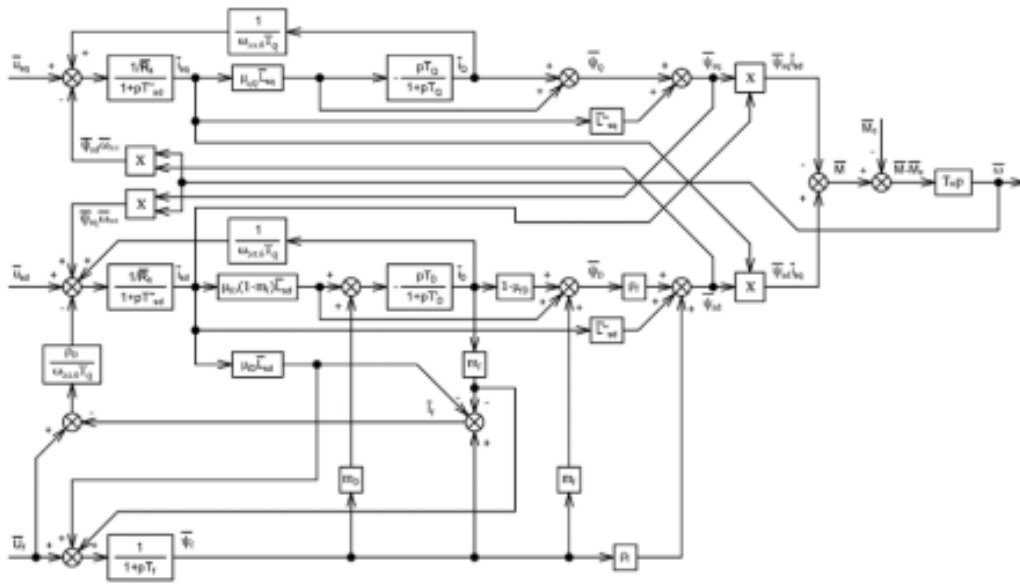


Рисунок 1 – Структурная схема модели синхронной машины с демпферной обмоткой, предназначенной для синтеза с «частотно-напряженной» САР

Заключение

В рамках статьи произведено построение математической модели синхронного двигателя с демпферной обмоткой на роторе в системе относительных единиц «Парка-Горева» (система уравнений (13)), которую можно применить для синтеза с «частотно-напряженческими» САР, проектируемыми в соответствии с принципом подчиненного регулирования. Полученная математическая модель может быть полезна при анализе переходных процессов и устойчивых режимов работы синхронных машин, имеющих успокоительную обмотку, а также может применяться при моделировании автоматизированного синхронного электропривода различного назначения.

В дальнейшем с целью проверки адекватности математической модели авторским коллективом предлагается ее имитация в совокупности с САР с помощью компьютерного моделирования.

Библиографический список

1. Гасияров, В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолистного прокатного стана : специальность 05.09.12 «Силовая электроника» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В.Р. Гасияров ; науч. конс. А.А. Радионов. – Челябинск : Южно-Уральский государственный университет (НИУ), 2021. – 359 с. – Библиогр. : с. 294-331. – Текст : непосредственный. – Место защиты: Магнитогорский государственный технический университет.
2. Finch, J. W. Controlled AC electrical drives / J.W. Finch, D. Giaouris // IEEE Transactions on Industrial Electronics, March 2008. – Vol. 55, No. 2. – P. 481-491.
3. Электропривод современных шахтных подъемных машин / Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой, И.С. Кузнецов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 3-2. – С. 157-165.
4. Гельвер, Ф.А. Гребные электрические установки судов большой мощности / Ф.А. Гельвер, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 30. – С. 7-27.
5. Островляничик, В.Ю. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства : учебное пособие / О.В. Островляничик. – Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2004. – 383 с.
6. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Ленинград : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. – 256 с. : ил.
7. 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.
8. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с. : ил.
9. Моделирование двухзонной системы автоматического управления частотно-регулируемого синхронного электродвигателя с демпферной обмоткой / В.Ю. Островляничик, В.А. Кубарев, Н.С. Зайцев, Д.Е. Модзелевский, Е.С. Кузнецова, Д.А. Маршев // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 5(163). – С. 46-58.
10. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов / И.А. Груздев, К.П. Кадомская, Л.А. Кучумов [и др.] ; под ред. Н.И. Соколова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : «Энергия», 1970. – 400 с. : ил.
11. Меркурьев, Г.В. Устойчивость энергосистем. Расчеты : монография / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин. – Санкт-Петербург : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». – 300 с.
12. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник / Г.Г. Соколовский. – Москва : Академия, 2006. – с. 265.