

**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

подъема/спуска. Для получения 4 скоростей необходимо сконфигурировать 2 и 4 скорости (PS4 и PS2) (рисунок 9) [6].

4 скорости LI (PS4)	2 скорости LI (PS2)	Задание скорости
0	0	Задание (1)
0	1	SP2
1	0	SP3
1	1	SP4

Рисунок 9 – Заданные скорости преобразователя частоты

Вывод: предложенная схема с преобразователем частоты с функцией «Выравнивание нагрузки» позволит согласовать работу четырех независимых друг от друга электродвигателей, работающих на общий вал, выровнять токи и моменты в номинальном режиме работы, что невозможно было при релейно-контакторной схеме. Также данная схема регулируемого электропривода удовлетворяет техническим требованиям. Электропривод позволит повысить качество управления электрическими машинами, увеличить срок службы, надежность оборудования и механизмов.

Библиографический список

1. Азимов А.А. Машины и оборудование коксовых батарей и пекококсовых установок / А.А. Азимов - М.: «Металлургия», 1980 - 88 с.
2. Анучин А.С. Система управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин - М.: Издательский дом МЭИ, 2015. - 375. с.:ил.
3. Ключев, В.И., Теория электропривода: учебник для вузов / В.И. Ключев. - М. : Энергоатомиздат, 1985. - 560 с.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский - М.: Академия, 2006. - 272 с.
5. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. - М. : Энергия, 1979. - 616 с.
6. Активный выпрямитель напряжение Altivar AFE. Руководство по выбору АВН мощностью 120-160 кВт. Руководство пользователя. - 98 с.
7. Выравнивание нагрузки с помощью преобразователей частоты Altivar 71. Руководство пользователя. - 18с.

УДК 621.313

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ В НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ДЛИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Поползин И.Ю., Живаго Р.Э.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, roman.zhivago@mail.ru

Аннотация. Составлена математическая модель электромеханической системы в составе синхронного двигателя и центробежного насоса. Исследовалась ситуация глубокой просадки напряжения питающей сети. Получены графики изменения токов обмоток статора и ротора при просадке напряжения питающей сети и выполнен их анализ.

Ключевые слова: синхронный двигатель, центробежный насос, тиристорный выпрямитель, форсировка, напряжения питающей сети.

Abstract. A mathematical model of an electromechanical system consisting of a synchronous motor and a centrifugal pump has been compiled. The situation of a deep voltage drop in the supply network was investigated. Graphs of changes in the currents of the stator and rotor windings during a voltage drop in the supply network were obtained and their analysis was performed.

Keywords: synchronous motor, centrifugal pump, thyristor rectifier, boost, supply voltage.

Синхронные электродвигатели (СД) имеют абсолютно жесткую механическую характеристику и, как правило, предназначены для привода мощных механизмов, не требующих регулирования скорости и работающих в длительном режиме на постоянной скорости (насосов, вентиляторов, дымососов, компрессоров и т.п.) [1]. При реализации частотного регулирования возможно достижение любой жесткости механической характеристики и диапазона регулирования скорости, однако в силу сравнительной сложности и высокой стоимости реализации таких систем СД, питаемые непосредственно от сети или через понижающий трансформатор продолжают применяться в системах управления электроприводами указанных выше механизмов. В дальнейшем рассматривается именно такое включение СД.

Основной проблемой при питании СД непосредственно от сети, помимо реализации режима асинхронного пуска, являются колебания напряжения в питающей сети. В условиях производства это, как правило, просадки напряжения, вызванные пусками мощных двигателей, особенно для механизмов с тяжелыми условиями пуска (например, длинных конвейеров), работой потребителей с высокой мощностью (например, дуговых печей), нештатными режимами работы трансформаторов, износом питающих кабелей, ненадежными контактами и т.п. Особенно актуально влияние таких негативных факторов в сетях горных предприятий. При просадке напряжения на статоре СД уменьшается электромагнитный момент двигателя, по причине чего СД может выйти из синхронизма под действием момента нагрузки, что, помимо остановки двигателя и прекращения работы механизма (что часто недопустимо, например, если такой СД приводит в движение вентилятор главного проветривания шахты или насос водоотлива) приводит также к перегреву двигателя и возможному его повреждению [2, с.156]. Кроме того, изменение тока статора при просадке напряжения на статоре СД и возможный выход двигателя из синхронизма приводит к сдвигу рабочей точки на U-образной характеристике машины, что приводит к изменению тока возбуждения СД и, как следствие, изменению его потока возбуждения, что также может привести к перегреву двигателя и повреждению его магнитной системы. По этим причинам вопрос исследования особенностей работы СД при колебаниях питающего напряжения является весьма актуальным.

Выберем в качестве объекта исследования синхронный электропривод насоса типа 20 НДС с явнополюсным двигателем типа СДЗ-2-1000-1000УЗ (мощность 1000 кВт; номинальная скорость 1000 об/мин; номинальный ток статора 112 А).

Система уравнений, описывающих электромагнитные процессы в явнополюсном СД с демпферной обмоткой на якоре, в двухфазной системе координат d-q имеет вид [1, 2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = R_l \cdot I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - (1 - S) \cdot \Psi_q, \\ U_q = R_l \cdot I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - (1 - S) \cdot \Psi_d, \\ U_f = R_f \cdot I_f + \frac{d\Psi_f}{dt}, \\ U = R_D \cdot I_D + \frac{d\Psi_D}{dt}, \\ U = R_Q \cdot I_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

- где U_d и U_q – составляющие вектора напряжения по осям d и q ;
 U_f – напряжение обмотки возбуждения;
 I_d и I_q – составляющие вектора тока по осям d и q ;
 I_f – ток возбуждения;
 I_D и I_Q – составляющие вектора тока демпферной обмотки;
 R_l, R_f, R_D, R_Q – активные сопротивления статора, ротора и демпферной обмотки по осям d и q ;
 $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_D, \Psi_Q$ – потокосцепления статора, ротора и демпферной обмотки по осям d и q ;
 S – скольжение.

Потокасцепления в (1) определяются (2):

$$\begin{cases} \Psi = x_d \cdot I_d + x_{ad} \cdot I_f + x_{ad} \cdot I_D, \\ \Psi_q = x_q \cdot I_q + x_Q \cdot I_Q, \\ \Psi_f = x_{ad} \cdot I_d + x_f \cdot I_f + x_D \cdot I_D, \\ \Psi_{kq} = x_{aq} \cdot I_q + x_Q \cdot I_Q, \end{cases} \quad (2)$$

- где x_d, x_q – синхронные индуктивные сопротивления по осям d и q ;
 x_{ad}, x_{aq} – индуктивные сопротивления взаимоиндукции статора и ротора по осям d и q ;
 x_f – индуктивно сопротивление обмотки возбуждения;
 x_D, x_Q – индуктивные сопротивления демпферной обмотки по осям d и q .

Для исследования переходных процессов (1) требуется дополнить описанием электромагнитного момента:

$$M = \Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d. \quad (3)$$

С учетом выражений (2) и (3) совместная система запишется (4) [3]:

$$\begin{cases} U_d = R_l \cdot I_d - (x_q \cdot I_q + x_{aq} \cdot I_Q), \\ U_q = R_l \cdot I_q + (x_d \cdot I_d + x_f \cdot I_f + x_D \cdot I_D), \\ U_f = R_f \cdot I_f + \left(x_{ad} \cdot \frac{dI_d}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_D \cdot \frac{dI_D}{dt} \right) \\ 0 = R_D \cdot I_D + \left(x_{ad} \cdot \frac{dI_d}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_D \cdot \frac{dI_D}{dt} \right), \\ 0 = R_Q \cdot I_Q + \left(x_{aq} \cdot \frac{dI_q}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_Q \cdot \frac{dI_Q}{dt} \right), \\ M = \Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d, \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

- где M_c – момент сопротивления на валу синхронного двигателя, создаваемый насосом НДЗ-20 [3].

Насосная установка характеризуется равенством подачи и напора насоса расходу и давлению в сети.

Мощность центробежного насоса выражается [4]:

$$P_H = H_{cm} \cdot Q = M_c \cdot \alpha_{\text{синх}}, \quad (5)$$

- где $H_{cm} = \frac{p_2 + p_1}{\rho g} + (z_2 - z_1)$.

Тогда момент двигателя составит:

$$M_c = \frac{H_{cm} \cdot Q}{\alpha_{\sin x}}. \quad (6)$$

С учётом (6) общая система уравнений запишется (7) [4, 5]:

$$\begin{cases} U_d = R_l \cdot I_d - (x_q \cdot I_q + x_{aq} \cdot I_Q), \\ U_q = R_l \cdot I_q + (x_d \cdot I_d + x_f \cdot I_f + x_D \cdot I_D), \\ U_f = R_f \cdot I_f + \left(x_{ad} \cdot \frac{dI_d}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_D \cdot \frac{dI_D}{dt} \right) \\ 0 = R_D \cdot I_D + \left(x_{ad} \cdot \frac{dI_d}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_D \cdot \frac{dI_D}{dt} \right), \\ 0 = R_Q \cdot I_Q + \left(x_{aq} \cdot \frac{dI_q}{dt} + x_f \cdot \frac{dI_f}{dt} + x_Q \cdot \frac{dI_Q}{dt} \right), \\ M = \Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d, \\ M - \frac{H_{cm} \cdot Q}{\alpha_{\sin x}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \end{cases} \quad (7)$$

На основании (7) в среде MatLab, пакете расширения Simulink была составлена модель электромеханического комплекса (рисунок 1) [6, 7].

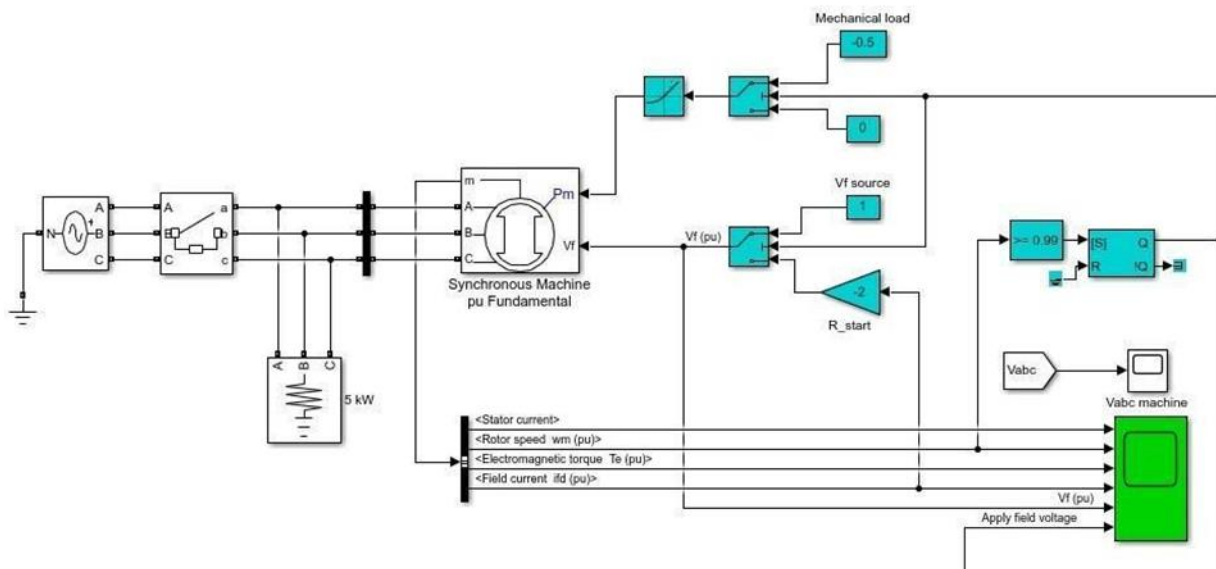
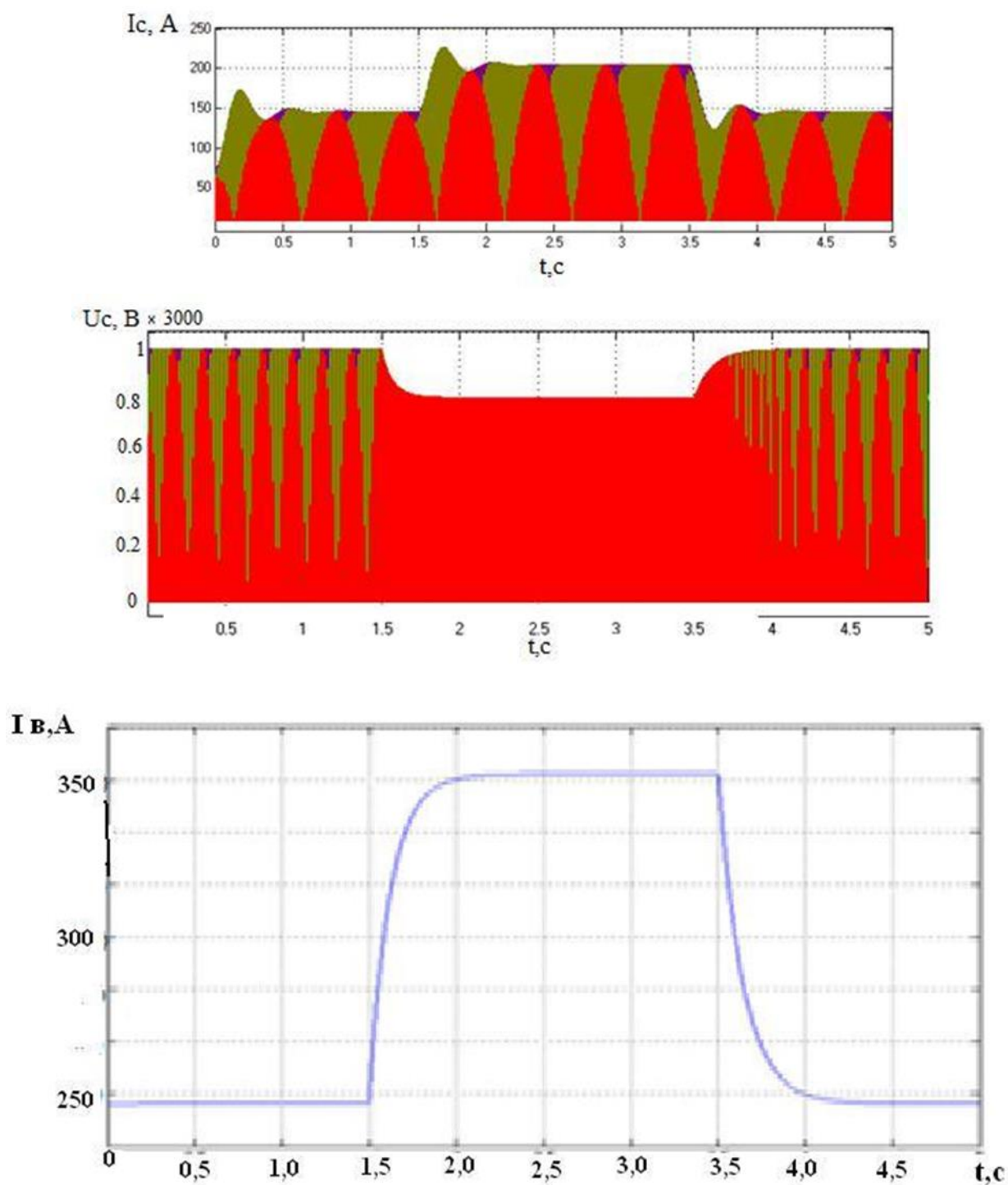


Рисунок 1 – Схема системы ТВД-СД насосного агрегата в MatLab Simulink

В модели исследовался режим посадки напряжения питающей сети на 20% от номинального значения. Графики переходных процессов показаны на рисунке 2.

По графикам, показанным на рисунке 2, видно, что просадка напряжения питающей сети на 20% приводит к росту тока статора на 30% и к увеличению тока возбуждения на 25%. Рост тока возбуждения (форсировка) позволяет двигателю кратковременно сохранить перегрузочную способность, и поэтому за период моделирования выхода из синхронизма не произошло. Однако при более существенной или более длительной просадке такая форсировка окажется бесполезной, и двигатель выйдет из синхронизма и остановится в колебательном режиме.



в)

а) график тока статора синхронной машины; б) график напряжения статора синхронной машины; в) график тока возбуждения синхронной машины

Рисунок 2 – Графики переходных процессов в СД при просадки питающей сети

Проведенное моделирование показывает, что даже не слишком большая просадка скорости приводит к существенным изменениям токов обмотки СД, что, как было указано выше, может привести к негативным последствиям. При этом внутренняя форсировка

двигателя за счет роста тока возбуждения сохраняет его перегрузочную способность в течение небольшого периода времени. По этой причине необходимо применение защит СД от просадки напряжения либо систем автоматического регулирования, позволяющих компенсировать такие просадки. Кроме того, следует отметить, что использование частотного управления СД снимает проблему просадок питающего напряжения, хотя, очевидно, рентабельность и необходимость реализации частотного управления для электроприводов рассматриваемых в данной работе механизмов находится под вопросом.

Библиографический список

1. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс)/Г.А. Сипайлов, Е.В. Конonenko, К.А. Хорьков. -М.: Высшая школа, 1987. -287 с.
2. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока/К.П. Ковач, И. Рац. - М.-Л.: Госэнерго-издат, 1963. -744 с.
3. Пугачев, Е.В. Динамические характеристики системы гидротурбина - синхронный генератор работающей на автономную нагрузку в аварийных режимах / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2014. – № 1-2(130). – С. 117-123. – EDN VBXTMN.
4. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики: учебник, 3-е изд., стер.-М.: КНОРУС, 2012. - 352 с.
5. Пугачев, Е.В. Косвенное оценивание неисправностей механической части гидрогенераторов / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 2(108). – С. 122-127. – EDN TRJGKD.
6. Mark S. Gockenbach. MATLAB Tutorial to accompany Partial Differential Equations: Analytical and Numerical Methods, 2nd edition, SIAM, 2010, 136p.
7. A A Ansari, D M Deshpande, Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink, A. Ansari et. al. /International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(5), 2010, 1260-1267.

УДК 62.523/524:664.61

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОТОЧНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Костылев С.Ю., Модзелевский Д.Е.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, Bonelion2020@gmail.com

Аннотация. Проведен сбор и анализ технологических процессов работы поточно-транспортной системы и производства. Обозначена актуальность исследования методов оптимизации производственного процесса с целью усовершенствования имеющихся алгоритмов работы. Были рассчитаны основные протекающие физические процессы на участке производственной линии. Построена функциональная, математическая модель производственного участка, получены временные диаграммы. Результаты данной работы будут использованы для модернизации существующих алгоритмов работы производственного процесса, а также при проектировании новых объектов.

Ключевые слова: поточно-транспортная система, ПТС, конвейерная линия, теплопередача, туннельная печь, оптимизация производства, автоматизированная система управления.

Abstract. The collection and analysis of technological processes of the flow-transport system and production was carried out. The relevance of the research of methods of optimization of the production process in order to improve the existing algorithms of work is indicated. The main physical processes occurring on the production line section were calculated. A functional, mathematical model of the production site is constructed. Time diagrams are obtained. The results of this work will be used to modernize the existing algorithms of the production process, as well as in the design of new facilities.

<i>Александров Н.А., Модзелевский Д.Е., Кипервассер М.В.</i>	
Модернизация многодвигательного электропривода установки сухого тушения кокса с учетом неидентичности характеристик электродвигателей	346
<i>Поползин И.Ю., Живаго Р.Э.</i>	
Особенности работы синхронного двигателя при колебаниях сетевого напряжения в нерегулируемых электроприводах с длительным режимом работы	351
<i>Костылев С.Ю., Модзелевский Д.Е.</i>	
Построение модели и синтез управления автоматизированной поточно-транспортной системы	356
<i>Калачева О.К., Модзелевский Д.Е.</i>	
Исследование режимов работы многоагрегатного электропривода насосной станции.....	362
<i>Алтухов Д.И., Модзелевский Д.Е.</i>	
Разработка многоуровневого инвертора напряжения для электропривода ШПУ	367
<i>Вершинин М.С., Модзелевский Д.Е.</i>	
Применение имитационного моделирования при создании тренажера для подготовки к сдаче демонстрационного экзамена по «Мехатронике».....	374
<i>Малышев Г.Д., Борицинский М.Ю.</i>	
Разработка электронного значка со световой эмблемой СибГИУ	381
<i>Ушаков В.В., Кармачев С.К., Борицинский М.Ю.</i>	
Осциллограф на базе персонального компьютера	383
<i>Рогожников И.П., Борицинский М.Ю.</i>	
Реализация системы единого времени с использованием микроконтроллера	386
<i>Яценко Н.Р., Борицинский М.Ю.</i>	
Измерение АФЧХ с помощью универсального измерительного прибора OSA103F	390
<i>Дорошенко А.В.</i>	
Современные методы и средства исследования автоматизированных электрических и электромеханических систем. состояние, проблемы, перспективы.....	394
<i>Сарсембин А.О., Кубарев В.А.</i>	
Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей шахтного подъёма.....	398
<i>Кубарев В.А., Кучик М.М., Маршев Д.А.</i>	
Визуализация электрических схем	402
<i>Бунакова М.Т., Водоватова А.Е., Корнеев П.А., Мищенко С.А., Низовская А.Д.,</i>	
Разработка учебного квадрокоптера.....	406
СПИСОК АВТОРОВ	412
СОДЕРЖАНИЕ	414