На правах рукописи

ПАЙМУРЗОВ ЕВГЕНИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ С ЗАВИСИМЫМ ИНВЕРТОРОМ ТОКА ПРИ ПУСКЕ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2024

Работа выполнена на кафедре автоматики и управления в технических системах федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова».

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор, **Афанасьев Александр Александрович**
Официальные оппоненты:	**Макаров Валерий Геннадьевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Электропривод и электротехника», заведующий кафедрой **Пронин Михаил Васильевич**, доктор технических наук, акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», дирекция систем автоматики энергетических машин, ведущий эксперт
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва

Защита состоится «18» апреля 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.434.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус № 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова по адресу: 428034, Чувашская республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «19» февраля 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.434.03	Руссова Наталия Валерьевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Мощные и сверхмощные синхронные машины среднего напряжения получили широкое распространение для электроприводов различных механизмов, шкала мощностей которых лежит в диапазоне от 1000 до 400000 кВт, а шкала напряжений – от 1000 до 15750 В.

Одной из главных проблем в эксплуатации синхронных машин является обеспечение их надёжного пуска в режиме синхронного электродвигателя. Согласно исследованиям и мировой практике наиболее приемлемым решением является частотный пуск возбуждённой синхронной машины от двухзвенного реверсивного тиристорного преобразователя частоты с зависимым инвертором тока. Одна из основных задач такого пуска – обеспечение трогания ротора неподвижной синхронной машины строго в заданном направлении вращения с заданным ускорением при отсутствии колебаний вала машины с приводимым механизмом. Задача фактически сводится к определению углового положения ротора.

Отказ от применения датчиков положения ротора определил необходимость и целесообразность решения важной научно-практической задачи по разработке и исследованию систем косвенного бездатчикового определения углового положения ротора. Несмотря на ряд выполненных исследований, задача бездатчикового управления системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» при трогании синхронной машины из неподвижного состояния и работе на низких частотах вращения под действием «импульсного» электромагнитного момента, формируемого в циклическом режиме коммутаций тиристоров инвертора, пока не получила ещё однозначного решения. Это в значительной мере связано с неполнотой информации о переходных электромагнитных и электромеханических процессах в момент трогания синхронной машины, когда электродвижущая сила вращения статора мала.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в решение теоретических и практических задач, связанных с проблемами пуска синхронных машин, в том числе сверхмощных, был внесён целым рядом отечественных и зарубежных учёных и специалистов: И. А. Глебовым, В. Н. Шулаковым, Е. А. Крутяков, М. И. Слодаржем, А. К. Аракеляном, А. А. Афанасьевым, А. М. Вейнгером, Ю. Д. Виницким, А. М. Колоколкиным, Г. Б. Лазаревым, М. В. Прониным, T. Peterson, K. Frank и другими.

Обзор и анализ многочисленных публикаций, показывает, что вопросам частотного пуска мощных и сверхмощных синхронных машин с бездатчиковым определением углового положения неподвижного и вращающегося вала ротора уделяется значительное внимание. В то же время недостаточно изученной представляется важная в методическом и практическом плане проблема повышения точности бездатчикового определения углового положения ротора и формирования оптимальных электромагнитных и электромеханических процессов частотного пуска мощной синхронной машины в условиях неопределённости изменения её углового ускорения.

Целью работы является разработка и исследование способа и алгоритма бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» в области нулевой и низких частот вращения синхронной машины, позволяющие повысить точность определения углового положения ротора и обеспечить устойчивый надёжный её пуск с минимизацией его времени и формированием оптимальных электромагнитных и электромеханических процессов при пуске синхронной машины в условиях неопределённости изменения её углового ускорения, что имеет существенное значение при широком внедрении устройств частотного пуска мощных синхронных машин различного применения.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные **задачи**:

1. Выбор способа и устройства пуска мощных синхронных машин, анализ способов бездатчикового определения углового положения ротора синхронной машины в области нулевой и низких частот вращения.

2. Установление закономерностей между угловым положением ротора и напряжением статора синхронной машины, разработка компьютерной модели системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» для импульсного режима её работы с непосредственным определением углового положения ротора синхронной машины, проведение на ней исследований электромагнитных и электромеханических процессов при частотном пуске синхронной машины на установленные закономерности между угловым положением ротора и напряжением статора синхронной машины и выработка рекомендаций.

3. Разработка способа и алгоритма бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» в области нулевой и низких частот вращения синхронной машины, корректировка компьютерной модели системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» по части использования предложенных способа и алгоритма бездатчикового управления и проведение на ней исследований электромагнитных и электромеханических процессов при частотном пуске синхронной машины.

4. Реализация разработанных технических решений бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина», проведение экспериментальных и практических исследований.

Научная новизна исследования:

1. Установлена и исследована закономерность, связывающая временной параметр работы зависимого инвертора тока, угловое положение ротора и напряжение статора синхронной машины при обесточенной фазе зависимого инвертора тока, отличающаяся от известных тем, что угол поворота ротора определяется как отношение длительности проводящего состояния пары тиристорных плеч зависимого инвертора тока от момента последней принудительной коммутации его тиристоров к периоду, определяемому из напряжения статора синхронной машины при обесточенной фазе зависимого

инвертора тока.

2. Разработаны способ и алгоритм бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» в области нулевой и низких частот вращения, позволяющие оптимизировать электромагнитные и электромеханические процессы при частотном пуске и регулировании частоты вращения синхронной машины с учётом неопределённости изменения её углового ускорения, отличающиеся от известных тем, что организовывается параллельная работа скалярного управления и управления по напряжению статора синхронной машины, последнее дополнительно обрабатывается и выделяется напряжение статора синхронной машины обесточенной фазы зависимого инвертора тока, из которого определяются величины фазы напряжения и угла поворота ротора, которые сравниваются с заданными уставками и по их сравнению или по сигналу скалярного управления выполняется принудительная коммутация тиристоров зависимого инвертора тока двухзвенного тиристорного преобразователя частоты, в момент осуществления которой выполняется воздействие на скалярное управление и управление по напряжению статора, далее цикл работы повторяется.

3. Разработан алгоритм фильтрации напряжения статора синхронной машины, обеспечивающий уменьшение трансформаторной электродвижущей силы, отличающийся от известных тем, что значения элементов памяти и коэффициентов фильтрации зависят от режимов работы и состояния элементов выпрямителя и инвертора двухзвенного тиристорного преобразователя частоты.

Теоретическая значимость работы. Результаты выполненных исследований направлены на дальнейшее развитие теории электромагнитных и электромеханических процессов при частотном пуске мощных и сверхмощных синхронных машин с разработанными и исследованными способом и алгоритмом бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» в области нулевой и низких частот вращения синхронной машины.

Практическая значимость работы:

1. Практическая ценность и новизна подтверждаются тем, что разработанные способ и алгоритм бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» в области нулевой и низких частот вращения, предложенная фильтрация напряжений статора синхронной машины с изменяющимися сопрягающими частотами в зависимости от режимов работы выпрямителя и инвертора преобразователя частоты реализованы автором в программном обеспечении системы управления тиристорных преобразователей частоты серий ШПТУ-ВИ и ШПТУ-ВИР производства ООО НПП «ЭКРА», а предложенный расчёт параметров имитатора датчика положения ротора используется при настройке указанных преобразователей частоты. На разработанные решения бездатчикового управления получены патенты на изобретения способа и устройства.

2. Разработанная компьютерная модель системы «преобразователь

частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» и программное обеспечение по обработке и анализу результатов работы системы управления системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» используются на ООО НПП «ЭКРА» с целью проведения исследований, тестирования, сравнения с результатами компьютерного моделирования и образцовых исследований, контроля и поиска неисправностей в работе преобразователей частоты серий ШПТУ-ВИ и ШПТУ-ВИР.

3. Предложенный способ бездатчикового управления может использоваться в полупроводниковых преобразователях частоты иной топологии при обеспечении цикла работы, при котором ток проводят только две фазы статора синхронной машины, а третья фаза – обесточена. Для преобразователей частоты, способных работать с единичным коэффициентом мощности по выходу, можно обеспечить работу системы «преобразователь частоты – синхронная машина» во всём диапазоне изменения рабочей частоты вращения синхронной машины.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы методы теоретических основ электротехники, теории электрических машин, автоматического управления, математического моделирования на электронно-вычислительных машинах и экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности между угловым положением ротора и напряжением статора синхронной машины с учётом особенностей импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина», позволяющие повысить точность косвенного определения углового положения ротора синхронной машины.

2. Способ и алгоритм бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» в области нулевой и низких частот вращения синхронной машины, обеспечивающие устойчивый надёжный пуск синхронной машины с минимизацией его времени и формированием оптимальных электромагнитных и электромеханических процессов при пуске синхронной машины в условиях неопределённости изменения её углового ускорения.

3. Фильтрация напряжений статора синхронной машины с изменяющимися сопрягающими частотами в зависимости от режимов работы выпрямителя и инвертора преобразователя частоты.

4. Результаты компьютерных, экспериментальных и практических исследований реализации технических решений бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина».

Степень достоверности предложенных методов, научных выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата современной теории автоматического управления, методов математического моделирования, непротиворечивостью результатов и выводов с ранее полученными данными исследований, а также сходимостью результатов

компьютерного моделирования в среде моделирования Simulink программного продукта MATLAB с результатами экспериментальных данных работы тиристорного преобразователя частоты испытательного стенда 0,4 кВ и тиристорных преобразователей частоты серий ШПТУ–ВИ и ШПТУ–ВИР напряжением (6–10) кВ и мощностью до 12500 кВт производства ООО НПП «ЭКРА». Все разработанные в ходе исследования программные модули тестировались путём проведения циклов замкнутого моделирования. Основные научные положения и выводы работы совпадают с результатами экспериментальных и практических исследований.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на VI Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2011 г., доклад отмечен дипломом I степени), VI Международной (XVII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (г. Иваново, 2012 г.), технико-практической конференции «Энергосбережение и энергоэффективность. Высоковольтная преобразовательная и релейная техника ООО НПП “ЭКРА”» (г. Чебоксары, 2013 г.), VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (г. Саранск, 2014 г.), X Международной научно-практической конференции по электроэнергетике «Энергия знаний» (г. Чебоксары, 2016 г.), XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (г. Санкт-Петербург, 2020 г.).

Публикации. По направлению диссертационной работы автором опубликовано 13 трудов, в том числе 4 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК, 3 патента на полезную модель, 1 патент на изобретение способа и 1 патент на изобретение устройства.

Внедрение результатов диссертации. Полученные результаты работы реализованы и используются в тиристорных преобразователях частоты серий ШПТУ-ВИ и ШПТУ-ВИР производства ООО НПП «ЭКРА».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 115 наименований, четырёх приложений. Общий объём диссертации – 218 страниц, 67 рисунков и 19 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность, формулируются цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту. Отмечаются научная новизна, теоретическая и практическая ценности работы.

В первой главе сформулированы критерии для выбора способа и устройства пуска мощных синхронных машин (СМ), с учётом которых проведён обзор публикаций и анализ существующих решений. Установлено, что критериям в наибольшей степени удовлетворяет способ частотного пуска возбуждённой СМ, обеспечиваемый двухзвенным реверсивным тиристорным преобразователем частоты (ТПЧ), состоящим из управляемого сетевого

выпрямителя (УВ) и зависимого инвертора тока (ЗИ). Проведён обзор публикаций и анализ существующих решений по бездатчиковому определению углового положения ротора СМ (УПР) в области нулевой и низких частот вращения. Выявлено, что существующие решения бездатчикового управления для импульсного режима работы системы ТПЧ-СМ не имеют окончательного технического решения и требуют дальнейшей разработки и исследований. Установлено, что наиболее близким по сформулированным требованиям и критериям является косвенное определение УПР из напряжения обесточенной фазы статора, но существующие решения обладают недостаточной точностью и чувствительностью к самой точности определения УПР, особенно начального УПР неподвижной СМ.

Во второй главе рассматривается математическое описание переходных процессов в СМ. В работе все сигналы представлены в системе частично-относительных единиц с ориентацией на переменные цепей статора и электромагнитную мощность СМ, в которой сделано исключение для переменной времени и угловых величин. Поэтому упоминание, что переменные состояния и параметры выражены в относительных единицах (о.е.), опускается. Получены формулы, устанавливающие взаимосвязь координат вектора тока статора I_1 в системе координат dq и электромагнитного момента M от УПР Θ и выбранной проводящей тиристорной пары ЗИ. Подробно рассмотрены различные формы записи вектора напряжения статора U_1 и его составляющих. Установлено, что трансформаторные электродвижущие силы (ЭДС) статора на интервале проводимости тиристоров ЗИ характерны для системы ТПЧ-СМ и присутствуют в напряжении обесточенной фазы статора СМ. Показано, что угол опережения ЗИ по ЭДС статора вращения однозначно определяет моменты коммутаций тиристоров ЗИ для формирования необходимого электромагнитного момента СМ. Проведены расчёты и рекомендации по углу опережения ЗИ по напряжению статора с учётом принудительной коммутации тиристоров ЗИ для формирования близкого к максимальному значению среднего электромагнитного момента СМ на интервале проводимости тиристоров ЗИ, в том числе для 1-го межкоммутационного интервала проводимости тиристоров (МКИ) ЗИ.

Преобразованиями из напряжения обесточенной фазы статора СМ получен сигнал u_{s00}, переход которого из отрицательной области в положительную область соответствует углу опережения, равному $\pi/6$. Выведены соотношения для косвенного определения УПР, в которых из напряжения обесточенной фазы статора u_{s00} определяются его фаза Θ_{s00} и угол поворота ротора $\Delta\Theta_{s00}$. Фаза Θ_{s00} определяется известным решением, основанным на интегрировании напряжения обесточенной фазы статора СМ.

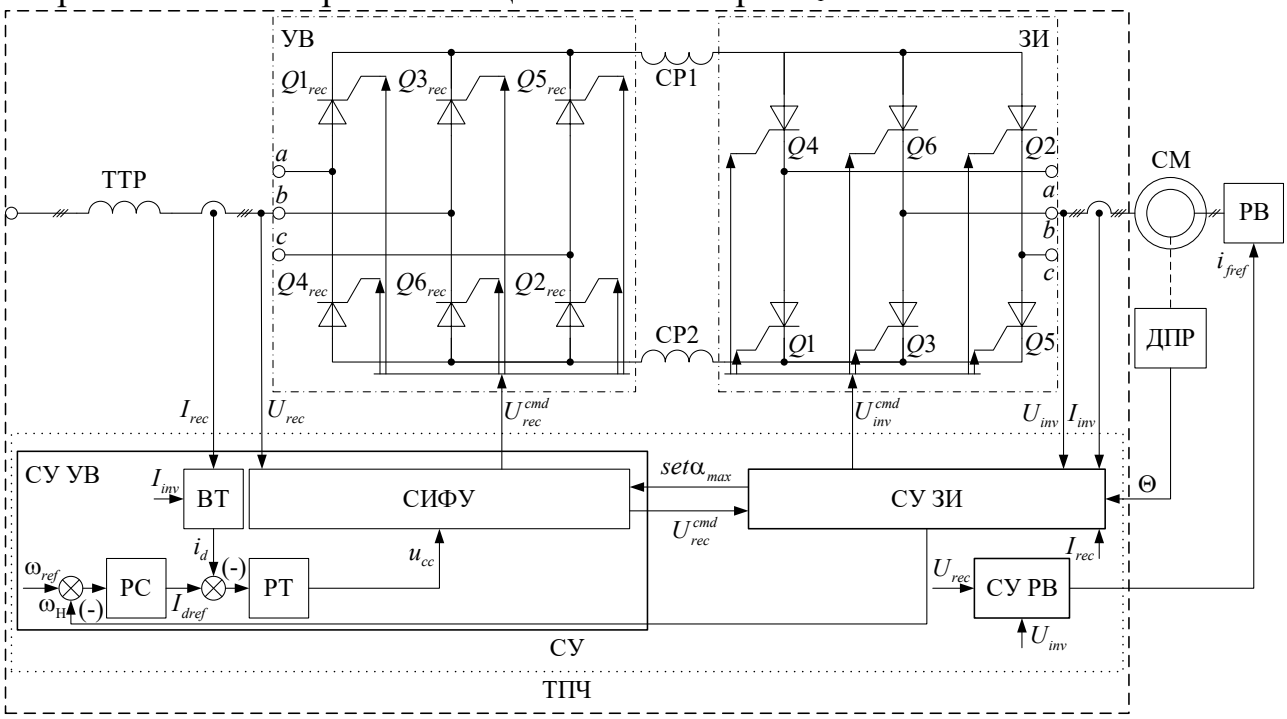
Угол поворота ротора $\Delta\Theta_{s00}$ связывает временные параметры ЗИ и СМ и определяется как отношение временного интервала $\Delta t_И$ проводящего состояния пары тиристорных плеч ЗИ, отсчитываемого от момента последней принудительной коммутации тиристоров ЗИ, к периоду T_{s00}, определённому из

напряжения обесточенной фазы статора СМ:

$$\Delta\Theta_{s00} = 2\pi\Delta t_{И}/T_{s00}\ ,\ T_{s00} = \begin{cases} T_{max}, & \text{если } u_{s00} \le 0 \\ \psi_{mfss}\sin\Theta_{s00ref}/(f_b u_{s00}), & \text{иначе} \end{cases} \qquad (1)$$

где f_b – базовая частота, равная номинальной частоте напряжения статора; $T_{max} = 1/(f_b\omega_{И0})$ – максимальный период, обратно пропорциональный начальной пусковой частоте $\omega_{И0}$; ψ_{mfss} – установившееся значение амплитуды вектора потокосцепления намагничивания Ψ_{mf}, формируемого током возбуждения i_f и определяемого из опыта холостого хода или по предложенным в работе рекомендациям; $\Theta_{s00ref} = \pi/6 - \beta_{ref}$ – задание фазы напряжения обесточенной фазы статора СМ, соответствующее заданному углу опережения β_{ref}.

Для исследования электромагнитных и электромеханических процессов, протекающих в системе ТПЧ-СМ при её импульсном режиме работы и датчиковом управлении, в среде моделирования Simulink программного продукта MATLAB разработана компьютерная модель системы ТПЧ-СМ, упрощённая структурная схема которой и её системы управления (СУ) показана на рисунке 1. СУ компьютерной модели системы ТПЧ-СМ обладает информацией об УПР Θ и угле нагрузке δ_1 СМ, который является углом между направлением вектора потокосцепления статора Ψ_1 и осью d.

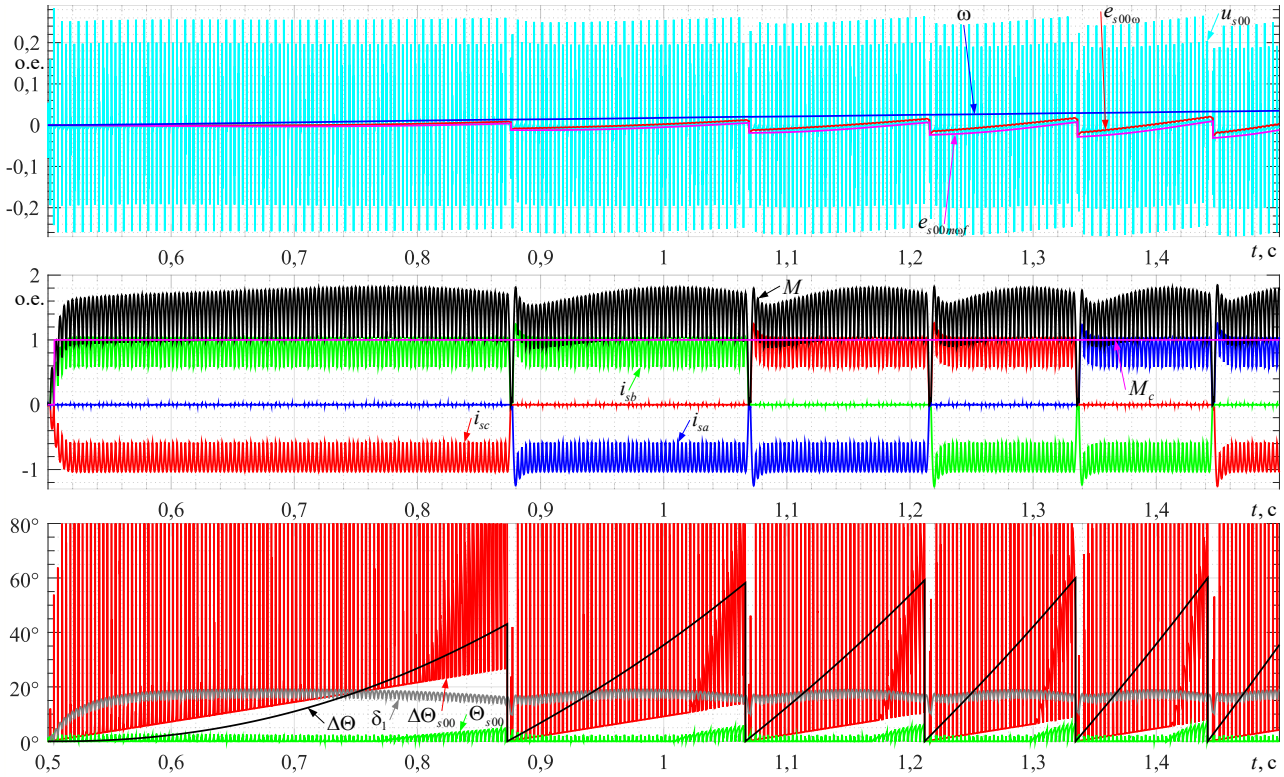


РВ – регулятор возбуждения; ДПР – датчик положения ротора; ТТР – трёхфазный токоограничивающий реактор; СР1 и СР2 – сглаживающие реакторы; ВТ – блок вычисления выпрямленного тока i_d; РС и РТ – регуляторы скорости и тока; СИФУ – система импульсно-фазового управления; $Q1_{rec}$, $Q2_{rec}$, $Q3_{rec}$, $Q4_{rec}$, $Q5_{rec}$, $Q6_{rec}$, $Q1$, $Q2$, $Q3$, $Q4$, $Q5$ и $Q6$ – тиристорные плечи УВ и ЗИ; I_{rec}, I_{inv}, U_{rec} и U_{inv} – измеряемые токи и напряжения на входе УВ и выходе ЗИ; U_{rec}^{cmd} и U_{inv}^{cmd} – сигналы управления тиристорными плечами УВ и ЗИ; ω_{ref} и $\omega_{Н}$ – задание и обратная связь по угловой скорости вращения ротора СМ; u_{cc} – сигнал управления на выходе РТ; $set\alpha_{max}$ – команда перевода УВ в инверторный режим; I_{dref} и i_{fref} – задания выпрямленного тока и тока возбуждения

Рисунок 1 – Упрощённая структурная схема системы ТПЧ-СМ

На разработанной модели проведены 4 эксперимента пуска СМ типа ДС101-6 от ТПЧ. Эксперименты проводились при одинаковых нагрузках на валу ротора M_c и заданиях I_{dref} и i_{fref}. Управление инвертора было настроено для формирования близкого к максимальному значению среднего электромагнитного момента СМ на интервале проводимости тиристоров ЗИ. Эксперименты делились на две группы с низким и высоким уровнями амплитуды пульсаций выпрямленного тока i_d и на две группы в зависимости от отсутствия или наличия ёмкостных связей относительно земли на выходе ТПЧ.

На рисунке 2 приведены графики пуска СМ типа ДС101-6 при наличии ёмкостной связи относительно земли на выходе ТПЧ и высоком уровне амплитуды пульсаций выпрямленного тока.



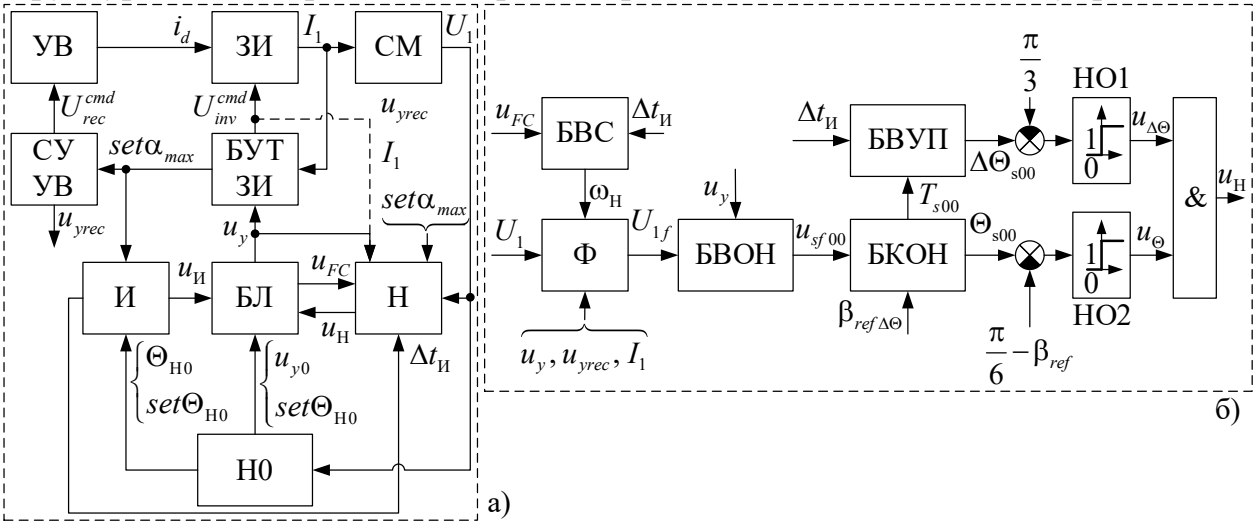
ω – угловая скорость вращения ротора СМ; $e_{s00\omega}$ и $e_{s00m\omega f}$ – ЭДС вращения обесточенной фазы статора СМ, формируемые потокосцеплениям Ψ_1 и Ψ_{mf}; i_{sa}, i_{sb} и i_{sc} – токи статора СМ по фазам *a*, *b* и *c*; $\Delta\Theta$ – фактический угол поворота ротора СМ между принудительными коммутациями тиристоров ЗИ

Рисунок 2 – Графики пуска СМ типа ДС101-6 при датчиковом управлении

Результаты исследования подтвердили возможность извлечения из напряжения обесточенной фазы статора u_{s00} фазы Θ_{s00} и угла поворота ротора $\Delta\Theta_{s00}$. Также показали необходимость фильтрации напряжения обесточенной фазы статора из-за колебаний трансформаторной ЭДС статора. Последние формируются пульсациями выпрямленного тока и коммутациями тиристоров УВ и ЗИ, особенно при наличии ёмкостных связей относительно земли на входе и выходе ТПЧ. Это видно из графиков, показанных на рисунке 2.

В третьей главе рассматриваются способ, алгоритм и математическое описание бездатчикового управления для импульсного режима работы системы ТПЧ-СМ. Предлагаемое управление основано на параллельной работе двух

каналов управления: скалярного и по напряжению статора СМ. По сигналу одного из каналов выполняется принудительная коммутация тиристоров ЗИ. В момент осуществления указанной коммутации производится воздействие на оба управления, а далее цикл работы повторяется. На рисунке 3 а) показана структурная схема реализации рассматриваемого бездатчикового управления.



БУТ ЗИ – блок управления тиристорами ЗИ; И – имитатор ДПР (ИДПР); Н – наблюдатель УПР; Н0 – наблюдатель начального УПР $\Theta_{Н0}$ неподвижной СМ; БЛ – блок логики; u_{yrec} и u_y – логические сигналы управления тиристорными плечами УВ и ЗИ; u_{y0} – начальные логические сигналы управления тиристорными плечами ЗИ; $set\Theta_{0Н}$ – логический сигнал завершения определения $\Theta_{Н0}$; $u_И$ и $u_Н$ – логические сигналы принудительной коммутации тиристоров ЗИ от ИДПР и наблюдателя УПР; u_{FC} – логический сигнал принудительной коммутации тиристоров ЗИ; Ф – фильтр; БВОН и БКОН – блоки выбора и контроля напряжения обесточенной фазы статора u_{sf00} СМ; БВУП и БВС – блоки вычисления угла поворота ротора и угловой скорости вращения ротора; НО1 и НО2 – нуль-органы; & – блок логической операции «И»; U_{1f} – отфильтрованное напряжение статора U_1; $\beta_{ref\Delta\Theta}$ – задание угла опережения ЗИ для расчёта T_{s00}; $u_{\Delta\Theta}$ и u_Θ – сигналы принудительной коммутации тиристоров ЗИ по углу поворота ротора $\Delta\Theta_{s00}$ и фазе Θ_{s00} напряжения обесточенной фазы статора

Рисунок 3 – Структурные схемы: а) бездатчикового управления; б) наблюдателя УПР

Работа скалярного управления описывается следующими выражениями:

$$\omega_И = \omega_{И0} + \int \varepsilon_И dt,\ \Delta\Theta_И = \Delta\Theta_{И0} + \int_0^{\Delta t_И} \omega_И dt,\ u_И = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta\Theta_И \geq \pi/3 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \qquad (2)$$

где $\omega_И$, $\omega_{И0}$, $\varepsilon_И$ и $\Delta\Theta_И$ – угловая скорость, начальная угловая скорость, угловое ускорение и угол поворота ротора ИДПР; $\Delta\Theta_{И0}$ – начальный угол поворота ИДПР, принимающий нулевое значение в момент начала последней принудительной коммутации тиристоров ЗИ, кроме 1-го МКИ ЗИ.

В работе даны соотношения для определения начальных логических сигналов управления тиристорными плечами ЗИ u_{y0} и начального угла поворота ИДПР $\Delta\Theta_{И0}$ на 1-м МКИ ЗИ с учётом начального УПР $\Theta_{Н0}$ неподвижной СМ, заданных угла нагрузки δ_{1ref0} СМ и начального угла опережения ЗИ β_{ref0}. Даны рекомендации расчёта δ_{1ref0} в зависимости от заданного электромагнитного момента и области применения.

При разгоне СМ в импульсном режиме работы системы ТПЧ-СМ изменение последовательности логических сигналов управления тиристорами ЗИ u_y производится логическим сигналом принудительной коммутации тиристоров ЗИ u_{FC}, который определяется как:

$$u_{FC} = u_{\text{И}} + u_{\text{Н}}. \qquad (3)$$

Управление по напряжению статора СМ заключается в измерении напряжения статора и дополнительных операциях с ним, из которых получаются производные сигналы. На рисунке 3 б) приведена структурная схема управления по напряжению статора СМ. Повышение точности косвенного определения УПР достигается расширением информационного обеспечения за счёт выделения из напряжения обесточенной фазы статора в виде фазы Θ_{s00} и угла поворота ротора $\Delta\Theta_{s00}$, их сравнением с уставками и формированием по результатам сравнения сигнала принудительной коммутации тиристоров ЗИ от наблюдателя $u_{\text{Н}}$:

$$u_{\Delta\Theta} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta\Theta_{s00} \geq \Delta\Theta_{ref} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, u_{\Theta} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Theta_{s00} \geq \Theta_{s00ref} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \; u_{\text{Н}} = u_{\Delta\Theta} u_{\Theta} \qquad (4)$$

где $\Delta\Theta_{ref} = \pi/3$ – угол поворота ротора между принудительными коммутация тиристоров ЗИ; $u_{\Delta\Theta}$ и u_{Θ} – логические сигналы принудительной коммутации тиристоров ЗИ по углу поворота ротора $\Delta\Theta_{s00}$ и фазе Θ_{s00}.

Рассмотрена индивидуальная фильтрация напряжения по каждой фазе статора с целью снижения влияния трансформаторной ЭДС статора, при которой происходит переключение сопрягающей частоты фильтра на разные сопрягающие частоты в зависимости от режимов работы УВ и ЗИ. Математическое описание фильтрации напряжения статора описывается выражением:

$$\mathbf{U}_{sf} = \begin{cases} \mathbf{U}_s, & \text{если}\left(set_U_{sf} = 1\right) \\ \dfrac{1}{\mathbf{T}_{sf}\, p + 1} \circ \mathbf{U}_s, & \text{иначе} \end{cases}, \qquad (5)$$

где $\mathbf{U}_{sf} = \left[u_{saf} \;\; u_{sbf} \;\; u_{scf}\right]^T$ и $\mathbf{T}_{sf} = \left[T_{saf} \;\; T_{sbf} \;\; T_{scf}\right]^T$ – вектор-столбцы трёхфазных составляющих вектора отфильтрованного напряжения статора U_{1f} и постоянных времени апериодических звеньев по фазам a, b и c статора; set_U_{sf} – логический сигнал установки начальных значений интеграторов апериодических звеньев, принимающий единичное значение при спадающем фронте сигнала $set\alpha_{max}$. Рассмотрены индивидуальные условия переключения постоянной времени (сопрягающей частоты) апериодических звеньев фильтра и даны рекомендации по определению их величин в зависимости от режимов работы УВ и ЗИ.

Для предложенного способа бездатчикового управления рассмотрена методика настройки скалярного управления, заключающаяся в расчёте начальной угловой скорости $\omega_{\text{И}0}$ ИДПР с его нулевым угловым ускорением $\varepsilon_{\text{И}}$ при пуске с наименьшим угловым ускорением СМ $\varepsilon_{\min}$ и с возможностью учёта ошибочного определения УПР по формулам:

$$\omega_{\text{И}0} = \omega_{\text{И}00} / k_{n\pi/3}, \; \omega_{\text{И}00} = \sqrt{2\Delta\Theta_{1\min}\varepsilon_{\min}} / 2 \qquad (6)$$

где $k_{n\pi/3}$ – подстроечный коэффициент ИДПР, изменяющийся в диапазоне от 1

до 6, учитывающий соотношение между угловым путём $\Delta\Theta_1$ ротора СМ на 1-м МКИ ЗИ при ошибочном определении начального УПР неподвижной СМ и углом поворота ИДПР на $\pi/3$; $\omega_{И00}$ – значение начальной угловой скорости ИДПР при корректном определении начального УПР неподвижной СМ; $\Delta\Theta_{1\min} = \pi/3$ – минимальный угол поворота ротора СМ 1-го МКИ ЗИ.

Произведены изменения в компьютерной модели системы ТПЧ-СМ с целью реализации предложенного бездатчикового управления с учётом рассмотренной фильтрации напряжения статора СМ и заявленного варианта настройки скалярного управления. При помощи компьютерного моделирования проведено 13 экспериментов пуска СМ типа ДС101-6 от ТПЧ. Эксперименты разделены на две группы в зависимости от точности определения начального УПР неподвижной СМ: в первой группе, состоящей из 9 экспериментов, определяемое СУ системы ТПЧ-СМ $\Theta_{Н0}$ и фактическое Θ_0 начальные УПР неподвижной СМ приблизительно одинаковы, а во второй группе они отличаются на $2\pi/3$ или π. Исследование проводились в широком диапазоне изменения углового ускорения СМ. Это достигалось разными условиями моделирования каждого эксперимента за счёт установки значений момента нагрузки M_c, суммарного момента инерции, индуктивности сглаживающих реакторов, ограничений выпрямленного тока I_{dref} и тока возбуждения i_{fref}. Изменение индуктивности сглаживающих реакторов позволяло формировать низкий и высокий уровни амплитуды пульсаций выпрямленного тока. Изменение индуктивности сглаживающих реакторов и ограничение выпрямленного тока задавали непрерывный или прерывистый режим выпрямленного тока на МКИ ЗИ.

Условия первых 4 экспериментов работы системы ТПЧ-СМ при бездатчиковом управлении схожи с условиями 4 экспериментов работы системы ТПЧ-СМ при датчиковом управлении, проведённых во второй главе. При этом временная разница с момента трогания неподвижной СМ и её разгона до одинаковых угловых скоростей вращения не превышает 2 %.

На рисунке 4 приведены графики пуска СМ типа ДС101-6 под нагрузкой от ТПЧ при бездатчиковом управлении, из которых видно, что фактический угол поворота ротора $\Delta\Theta$ между принудительными коммутациями тиристоров ЗИ, начиная со 2-го МКИ ЗИ, приблизительно равен $\pi/6$ или 60 °.

Результаты исследования бездатчикового управления системы ТПЧ-СМ на компьютерной модели показали, что предложенная индивидуальная фильтрация напряжений статора с изменяющейся в зависимости от режимов работы УВ и ЗИ сопрягающей частоты фильтра снижает влияние трансформаторной ЭДС статора СМ, а предложенное бездатчиковое управление:

– функционирует в широком диапазоне изменения углового ускорения СМ;

– минимизирует время пуска СМ с момента её трогания и дальнейшего разгона до перехода на режим естественной коммутации тиристоров ЗИ за счёт формирования электромагнитного момента СМ близкого к максимальному возможному при заданных ограничениях токов статора и возбуждения;

– обеспечивает трогание неподвижной СМ и её разгон с вращением в строго

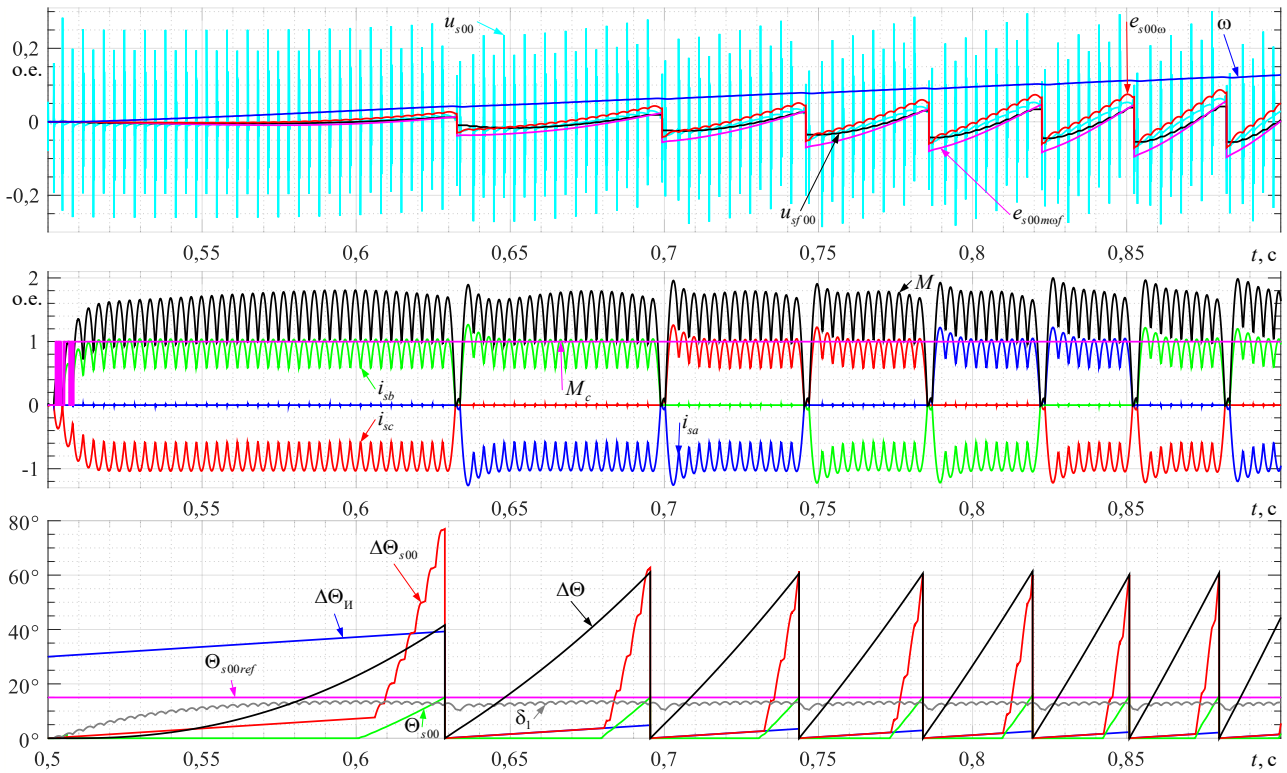


Рисунок 4 – Графики пуска СМ типа ДС101-6 под нагрузкой при бездатчиковом управлении

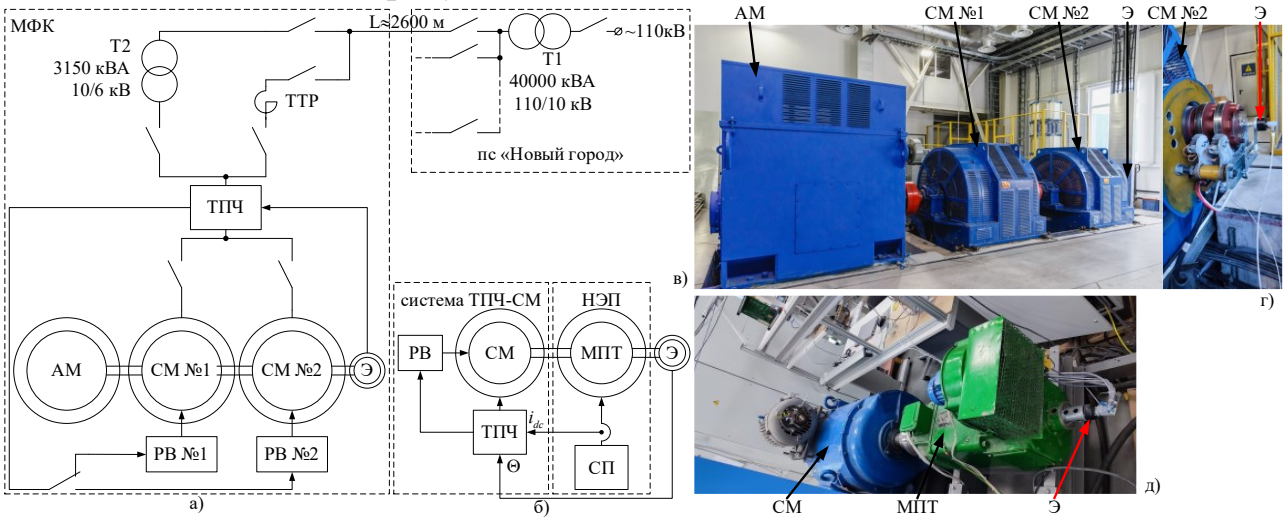
заданную сторону без изменения знака угловой скорости и колебательных движений ротора, если начальное УПР неподвижной СМ определено правильно, а значит, отсутствует негативное воздействие на механизмы, приводимые во вращение СМ;

– обладает низкой чувствительностью к влиянию, возникающего из-за ёмкостной связи линии нагрузки ЗИ с землёй, и пульсациям выпрямленного тока, возникающих из-за малой величины индуктивности сглаживающих реакторов звена постоянного тока, которая занижается для снижения затрат на внедрение устройства частотного пуска СМ;

– сохраняет работоспособность системы ТПЧ-СМ при ошибочном определении начального УПР неподвижной СМ, при этом её ротор поворачивается первоначально в противоположную сторону, но уже ко второму или третьему интервалу проводимости тиристоров ЗИ вращается в заданную сторону.

В четвёртой главе рассматривается практическая реализация бездатчикового управления. Область применения разработанного бездатчикового управления является импульсный режим работы системы ТПЧ-СМ при частотном пуске мощных СМ, неправильная реализация которого может привести к выходу из строя составных частей системы ТПЧ-СМ и механизма, приводимого во вращение. Поэтому для исключения ошибок и сбоев были проведены многократные испытания на стендах в широком диапазоне изменения углового ускорения СМ, достигаемое разными значениями момента нагрузки, ограничений выпрямленного тока и тока возбуждения, уровней амплитуды пульсаций выпрямленного тока и режимами выпрямленного тока на МКИ ЗИ. Описываются испытательные стенды среднего и низкого напряжений, структурные схемы и фотографии которых показаны на рисунке 5, и СУ ТПЧ.

На стенде низкого напряжения установлена СМ типа ДС101-6 напряжением 380 В. На стенде среднего напряжения установлены СМ мощностью 2500 кВт типа СДС-2500-6-6 напряжением 6 кВ и типа СДС-2500-10-6 напряжением 10 кВ, обозначенные на рисунке 5 как СМ № 1 и СМ № 2 соответственно.



МФК – многофункциональный комплекс ООО НПП «ЭКРА»; пс – подстанция; Т1 и Т2 – силовые трансформаторы; ТТР – трёхфазный токоограничивающий реактор; АМ – асинхронная машина; НЭП – нагрузочный ЭП, состоящий: МПТ – машина постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения; СП – статический преобразователь; Э – преобразователь угловых перемещений; i_{dc} – ток якоря МПТ

Рисунок 5 – Испытательные стенды: а) и б) – структурные схемы стендов среднего и низкого напряжения; в), г), д) – фотографии электромашинных комплексов стендов и место установки энкодера стенда среднего напряжения

На стенде низкого напряжения было проведено 7 испытаний, 4 из которых проведены при ошибочном определении начального УПР неподвижной СМ. На стенде среднего напряжения было проведено 8 испытаний, 4 из которых проведены при ошибочном определении начального УПР неподвижной СМ, также испытания были проведены как при трансформаторном подключении ТПЧ к питающей сети, так и при бестрансформаторном. Ёмкость питающей сети относительно земли за счёт своей разветвлённости существенно превышает ёмкости относительно земли нагрузки ТПЧ и обмотки трансформатора, к которому подключается УВ при трансформаторном подключении ТПЧ к сети. Поэтому размах пульсаций напряжения обесточенной фазы статора СМ при бестрансформаторном подключении УВ к сети выше, чем при трансформаторном. На рисунках 6–7 показаны графики пусков СМ типа СДС-2500-10-6 при бестрансформаторном подключении УВ к сети, из которых видно, что угол поворота ротора $\Delta\Theta$ между принудительными коммутациями тиристоров ЗИ, начиная со 3-го МКИ ЗИ, приблизительно равен $\pi/6$ или 60 °. Графики на рисунке 7 относятся к работе ТПЧ-СМ при ошибочном определении начального УПР неподвижной СМ.

Результаты исследований разработанного бездатчикового управления для импульсного режима работы системы ТПЧ-СМ, проведённых на испытательных стендах и с помощью компьютерного моделирования, в целом повторяются. Поэтому выводы, сделанные ранее, справедливы и при практической реализации рассматриваемого бездатчикового управления.

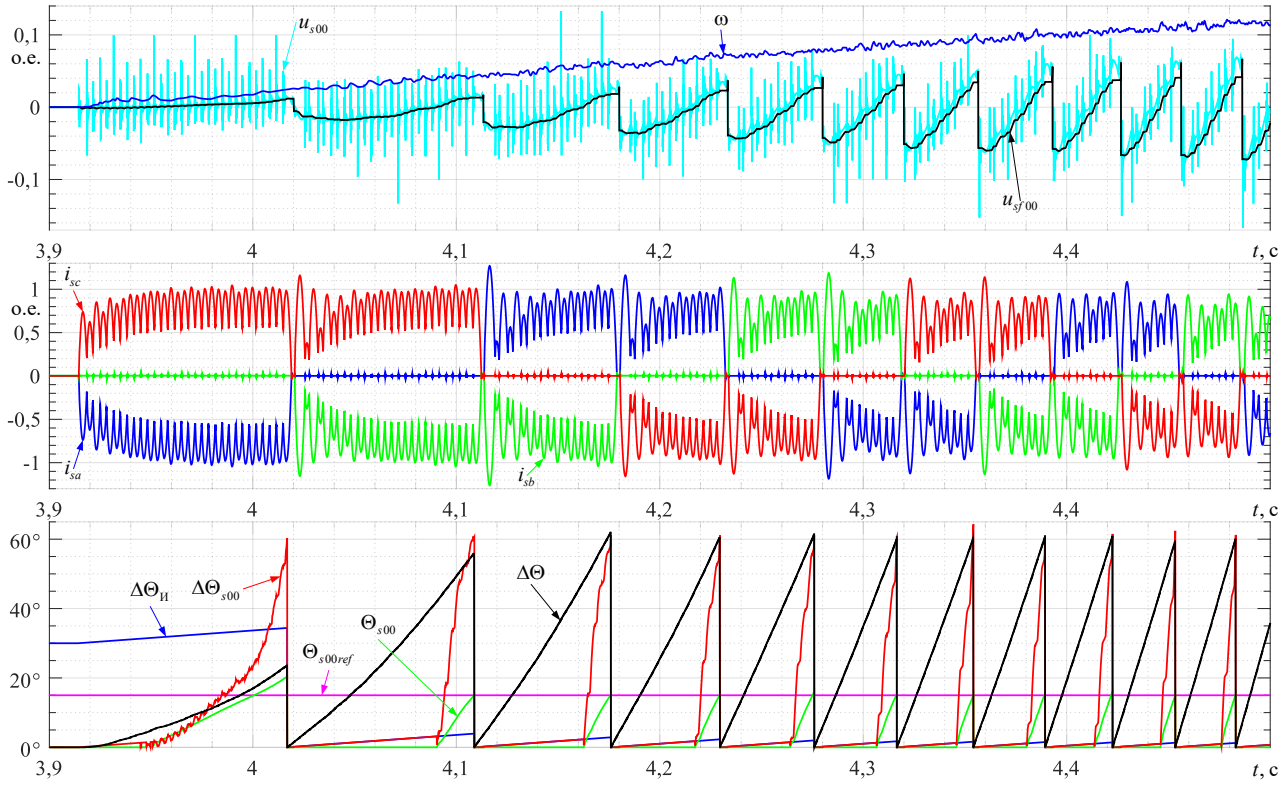


Рисунок 6 – Пуск СДС-2500-10-6 при бестрансформаторном подключении УВ к сети

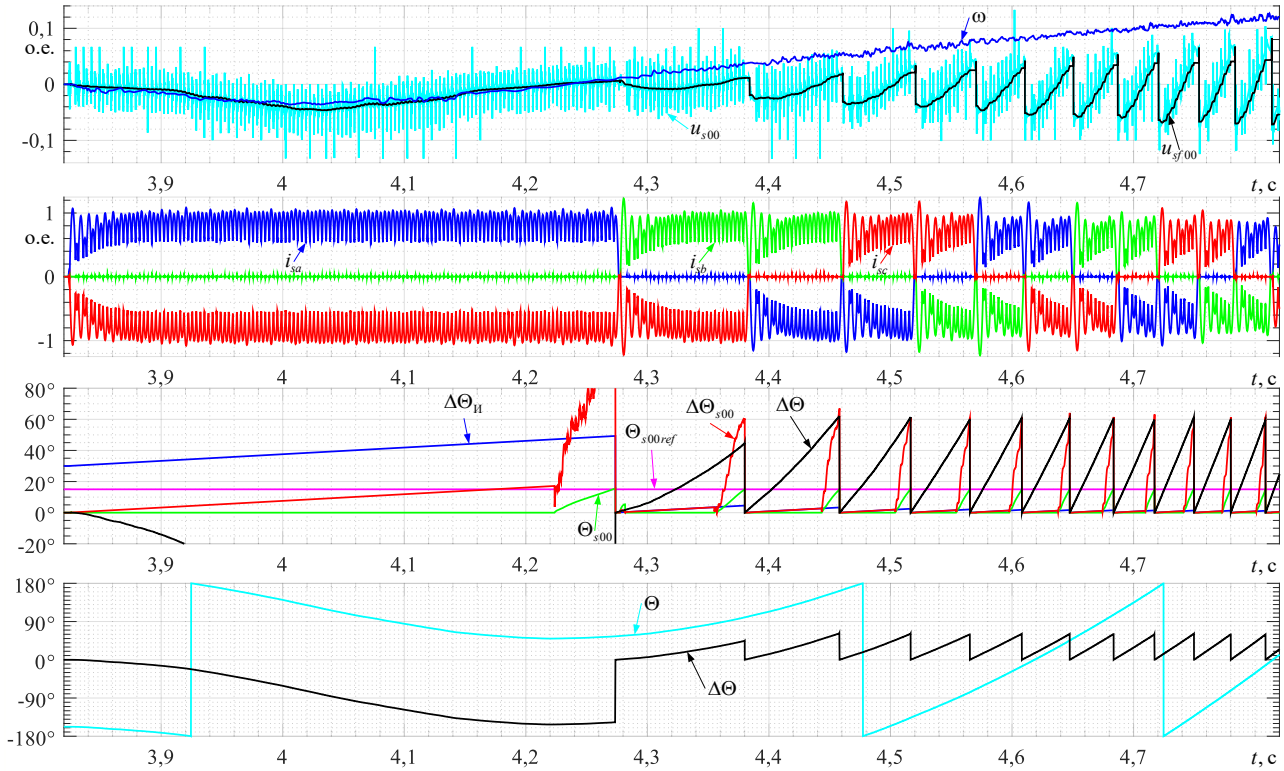


Рисунок 7 – Пуск СДС-2500-10-6 при ошибочном определении начального УПР

Проведено исследование разработанного бездатчикового управления в режиме валоповоротного устройства для поддержания сверхнизкой частоты вращения СМ типа СДС-2500-10-6 испытательного стенда среднего напряжения на уровне 0,003 номинальной частоты вращения СМ. Результаты исследования показали, что ТПЧ с предложенным бездатчиковым управлением может выполнять функции резервного или основного валоповоротного устройства мощных СМ, а стабильность поддержания угловой скорости вращения

обеспечивается регулятором скорости и качеством обратной связи по скорости.

Проведены испытания практической реализации предложенных технических решений по бездатчиковому управлению. В качестве механизмов, приводимых во вращении СМ, выступали мельница мокрого самоизмельчения типа ММС 90х30, шаровая мельница типа МШЦ 5500х8700 и газотурбинная установка ГТЭ-150. ТПЧ СМ мельниц имеют бестрансформаторное подключение к питающей сети, а ТПЧ СМ ГТЭ-150 – трансформаторное. Результаты испытаний показали, влияние ёмкостных связей относительно земли на входе и выходе ТПЧ на напряжение статора СМ обесточенной фазы ЗИ при коммутациях тиристоров УВ в реальных заводских условиях. На рисунке 8 показаны графики пуска СМ типа СДМ 32-24-59-80У4 напряжением 6 кВ и мощностью 4000 кВт мельницы ММС-90х30 от ТПЧ, из которых видно, что трогание СМ из неподвижного состояние и её разгон осуществляется равномерно.

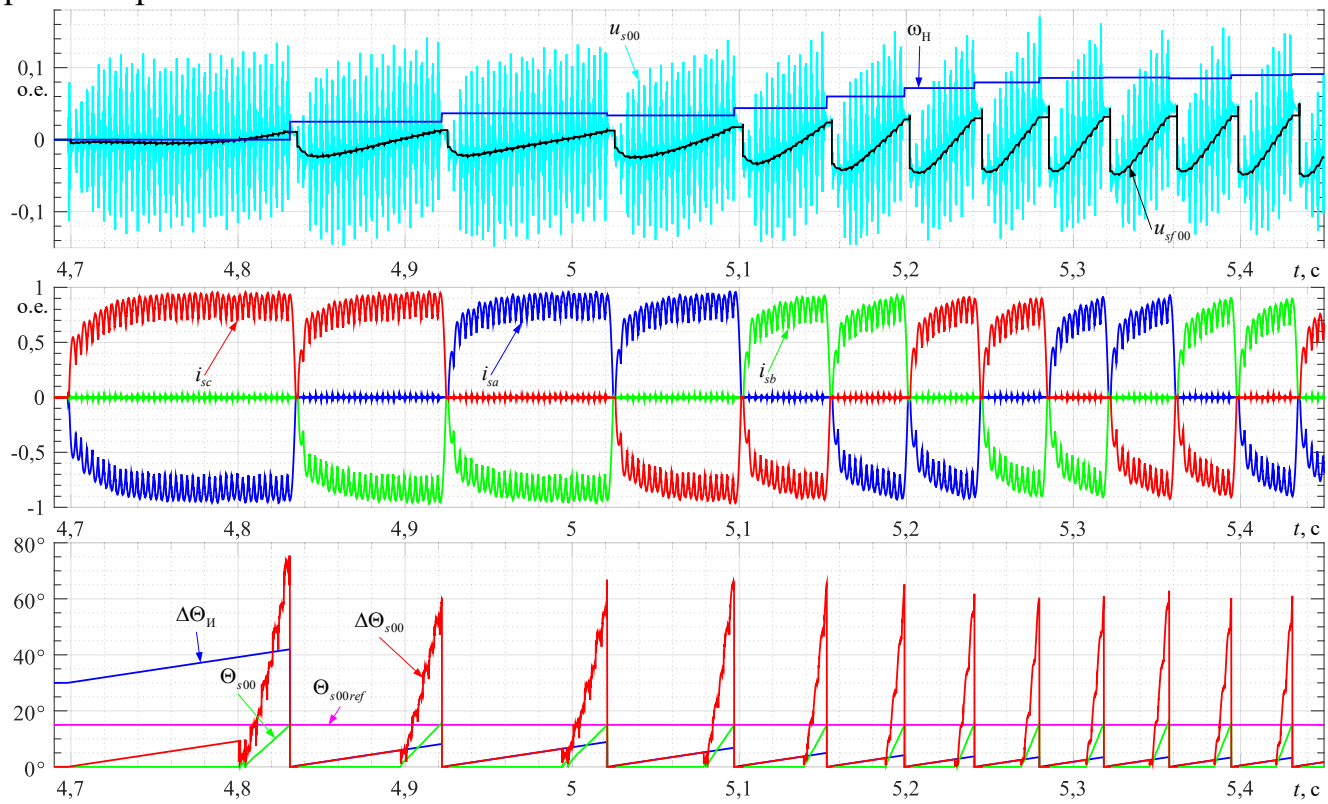


Рисунок 8 – Пуск СДМ 32-24-59-80У4 мельницы типа ММС-90х30

Результаты испытаний на стендах и объектах эксплуатации показали, что разработанное бездатчиковое управление для импульсного режима работы системы ТПЧ-СМ позволяет повысить точность определения УПР и обеспечить устойчивый надёжный её пуск в условиях неопределённости изменения углового ускорения СМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные и практические результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, позволили обосновать и подтвердить полезность предложенного и всесторонне исследованного способа и алгоритма

бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» при частотном пуске мощных синхронных машин. При этом:

1. Установлена и исследована закономерность между угловым положением ротора и напряжением статора синхронной машины обесточенной фазы зависимого инвертора тока, заключающаяся в том, что угол поворота ротора синхронной машины между принудительными коммутациями тиристоров инвертора определяется как отношение длительности проводящего состояния тиристорной пары зависимого инвертора тока от момента последней принудительной коммутации его тиристоров к периоду, определённому из напряжения статора синхронной машины обесточенной фазы зависимого инвертора тока.

2. Разработаны способ и алгоритм бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина». Отличаются от известных тем, что организовывается параллельная работа скалярного управления и управления по напряжению статора синхронной машины, по сигналу одного из которых выполняется принудительная коммутация тиристоров зависимого инвертора тока. В момент принудительной коммутации производится воздействие на скалярное управление и управление по напряжению статора, далее цикл работы повторяется. Это обеспечивает устойчивый надёжный пуск синхронной машины, в том числе при ошибочном определении начального углового положения неподвижного ротора, с минимизацией времени пуска и формированием оптимальных электромагнитных и электромеханических процессов при пуске в условиях неопределённости изменения углового ускорения. На разработанные решения бездатчикового управления получены патенты на изобретения способа и устройства и патенты на полезные модели.

3. Разработано косвенное определение углового положения ротора синхронной машины, обеспечивающее повышенную точность. Основано на том, что напряжение статора синхронной машины измеряется и подвергается фильтрации. Выделяется напряжение статора синхронной машины обесточенной фазы зависимого инвертора тока, из которого определяются величины фазы напряжения и угла поворота ротора. Последние сравниваются с заданными уставками, и по результатам сравнения формируется сигнал принудительной коммутации тиристоров зависимого инвертора.

4. Разработан алгоритм фильтрации напряжения статора для уменьшения трансформаторной электродвижущей силы, отличающийся от известных тем, что значения элементов памяти и коэффициентов фильтрации зависят от текущего состояния работы выпрямителя и инвертора тиристорного преобразователя частоты.

5. Разработана компьютерная модель системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» для импульсного режима её работы с датчиковым и бездатчиковым управлениями и проведены на ней исследования установленной угловой закономерности и разработанного бездатчикового управления.

6. Работоспособность предложенных технических решений бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» доказана многократными исследованиями с помощью компьютерного моделирования в среде моделирования Simulink программного продукта MATLAB, на испытательных стендах и на серийно выпускаемых тиристорных преобразователях частоты среднего напряжения серий ШПТУ-ВИ и ШПТУ-ВИР производства ООО НПП «ЭКРА» в реальных условиях эксплуатации.

7. Практическое применение разработанного бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» подтверждено реализацией в серийно выпускаемых тиристорных преобразователях частоты среднего напряжения серий ШПТУ-ВИ и ШПТУ-ВИР производства ООО НПП «ЭКРА».

8. Разработано программное обеспечение цифровой системы управления преобразователей частоты серий ШПТУ-ВИ и ШПТУ-ВИР производства ООО НПП «ЭКРА» в части реализации предложенных технических решений бездатчикового управления.

Применение рассмотренных способа и алгоритма бездатчикового управления для импульсного режима работы системы «преобразователь частоты с зависимым инвертором тока – синхронная машина» возможно в полупроводниковых преобразователях частоты иной топологии при обеспечении цикла работы, при котором ток проводят только две фазы статора синхронной машины, а третья фаза обесточена. Для полупроводниковых преобразователей частоты с автономными инверторами возможно применение рассмотренных способа и алгоритма бездатчикового управления во всём диапазоне изменения частоты вращения синхронной машины.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Паймурзов, Е. Г. Алгоритм работы бездатчикового зависимого инвертора тока в зоне низких скоростей / Е. Г. Паймурзов // Экспозиция Нефть Газ. – 2010. – № 5/Н (11). – С. 41–45.
2. Паймурзов, Е. Г. Электромагнитные и электромеханические процессы при бездатчиковом способе пуска мощных синхронных машин тиристорным преобразователем частоты / Е. Г. Паймурзов, Г. Б. Лазарев // Энергетик. – 2020. – № 9. – С. 39–51. (1,51/1,01 п.л.)
3. Паймурзов, Е. Г. Способ бездатчикового управления тиристорным преобразователем частоты при пуске синхронной машины / Е. Г. Паймурзов, А. А. Афанасьев // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 2 – С. 41–54. – DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-41-54 (1,14/1,02 п.л.)
4. Паймурзов, Е. Г. Бездатчиковое управление тиристорным преобразователем частоты при пуске синхронной машины / Е. Г. Паймурзов, А. А. Афанасьев, Н. В. Руссова // Электротехника. – 2023. – № 8 – С. 24–31. (0,98/0,78 п.л.)

Патенты

5. Пат. 107007 РФ, МПК H 02 P 6/20, H 02 P 25/30. Устройство плавного пуска синхронного двигателя с асинхронным возбудителем / М. И. Альтшуллер, Е. Г. Паймурзов, В. М. Пименов, заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА» – № 2011108345/07; заявл. 03.03.2011; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21. – 2 с.: ил. (0,23/0,16 п.л.)

6. Пат. 108246 РФ, МПК H 02 P 6/20. Устройство для пуска синхронного электродвигателя / Е. Г. Паймурзов, М. И. Альтшуллер, заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА» – № 2011114519/07; заявл. 31.03.2011; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25. – 2 с.: ил. (0,23/0,21 п.л.)

7. Пат. 205355 РФ, МПК H 02 P 6/22, H 02 P 1/46. Устройство для пуска синхронной машины / Е. Г. Паймурзов, заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА» – № 2021112462; заявл. 29.04.2021; опубл. 12.07.2021, Бюл. № 20. – 13 с.

8. Пат. 2761865 РФ, МПК H 02 P 6/20, H 02 P 1/46. Способ пуска синхронной машины (варианты) / Е. Г. Паймурзов, В. Ф. Ильин, заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА» – № 2021112460; заявл. 29.04.2021; опубл. 13.12.2021, Бюл. № 35. – 19 с. (2,2/1,54 п.л.)

9. Пат. 2766862 РФ, МПК H 02 P 6/22, H 02 P 1/46. Устройство для пуска синхронной машины / Е. Г. Паймурзов, В. Ф. Ильин, заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА» – № 2021112461; заявл. 29.04.2021; опубл. 16.03.2022, Бюл. № 8. – 18 с. (2,08/1,04 п.л.)

Публикации в других изданиях

10. Паймурзов Е. Г. Пуск и регулирование скорости взрывозащищенных синхронных двигателей с бесщеточной системой возбуждения / Е. Г. Паймурзов, М. И. Альтшуллер, В. М. Пименов // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново: Изд-во ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – 2012. – С. 254–257. (0,47/0,37 п.л.)

11. Паймурзов Е. Г. Преобразователи частоты на базе инвертора тока серии ШПТУ-ВИ(Р) для пуска и регулирования скорости высоковольтных синхронных электродвигателей мощностью до 17 МВт / Е. Г. Паймурзов // Сборник докладов технико-практической конференции «Энергосбережение и энергоэффективность. Высоковольтная преобразовательная и релейная техника ООО НПП «ЭКРА». – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА». – 2013. – С 32–36.

12. Паймурзов Е. Г. Реализация пуска бездатчикового электропривода с синхронным двигателем и зависимым тиристорным инвертором тока / Е. Г. Паймурзов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Т. 1. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та. – 2014. – С. 252–260.

13. Паймурзов Е. Г. Исследование бездатчикового определения положения ротора синхронной машины при пуске от зависимого инвертора тока / Е. Г. Паймурзов, Г. Б. Лазарев // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2020 (СПб, 4 – 7 октября 2020 г.). Под ред. Демидовой Г. Л. – СПб: Ун-т ИТМО. – 2021. – С. 70–75. (0,35/0,31 п.л.)

Паймурзов Евгений Геннадьевич

Разработка бездатчикового управления преобразователем частоты с зависимым инвертором тока при пуске мощных синхронных машин

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.02.2024 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,25.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 173.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д. 15.