Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи

Мудров Михаил Валентинович

Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса для испытаний и наладки электроприводов

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Зюзев Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: **Анучин Алексей Сергеевич,**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет ”МЭИ”», г. Москва, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода;

Карякин Александр Ливиевич,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой электрификации горных предприятий;

Бородацкий Евгений Георгиевич,
кандидат технических наук, АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург, начальник группы «Системы управления энергоустановками».

Защита состоится 22 января 2020 года в 14 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»: https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=880

Автореферат разослан «____» декабря 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Болотин Кирилл Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Как правило, электротехническое оборудование (электрические аппараты, электрические машины, электрические преобразователи и т.д.) подвергается электрическим испытаниям.

Для сокращения как финансовых, так и временных издержек на проведение испытаний сложного электротехнического оборудования возможно применение специальных систем, имитирующих работу силовой части тестируемого оборудования в реальном времени. Для подобных задач в настоящее время применяются различного вида программно - аппаратные симуляторы, воспроизводящие работу силовой части электротехнического оборудования в реальном времени.

Актуальность работы, определяющая цели и задачи исследования, обосновывается системным подходом к проектированию, изготовлению и вводом в эксплуатацию оборудования на основе современных цифровых технологий. Программно-аппаратные симуляторы силовой части электропривода позволяют испытывать и отлаживать работу систем управления и преобразователей различных типов электроприводов, таких как ШИП-ДПТ, ТПН-АД, ПЧ-АД.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями цифровых средств для испытаний и наладки систем электроприводов мировое научное сообщество активно начало заниматься в конце 90-х – начале 2000-х годов. На это время приходится расцвет цифровых аппаратных средств, таких как программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), и появление новых силовых полупроводниковых элементов, например, биполярных транзисторов с изолированным затвором. Первые исследования подтвердили возможность создания испытательных стендов электроприводов без применения электромеханической части. Полученные результаты предыдущих исследований дают возможность сконцентрировать свое внимание на структурах испытательных стендов и на системах управления, которые позволят с достаточной точностью воспроизвести поведение силовой части электропривода в отсутствии нагрузочного агрегата. Совре-

менные средства моделирования силовых схем и систем управления позволяют более детально изучить электрические процессы, протекающие в симуляторе, что дает возможность предлагать и анализировать различные решения по построению системы управления испытательного стенда.

Цели и задачи диссертационной работы. Анализ современных тенденций в практике проектирования и наладки электротехнических комплексов и систем и изучение научно-технической информации в области автоматизированного электропривода позволяет сформулировать **цель диссертационной работы**, заключающуюся в повышении эффективности проектных и пуско-наладочных работ на основе применения программно - аппаратных симуляторов электроприводов.

Для достижения цели, поставленной в работе, сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработка и исследование структуры программно - аппаратных симуляторов силовой части основных систем электроприводов (HiL-симуляторы).

2. Обоснование выбора аппаратных средств, на основе которых целесообразно создание программно - аппаратных симуляторов электроприводов, работающих в реальном времени.

3. Обоснование выбора метода решения дифференциальных уравнений, описывающих поведение имитируемого комплекса электропривода в реальном времени.

4. Исследование модели реального времени имитируемых объектов, реализуемых на ПЛИС, и выбор разрядности данных, при которых аппаратные средства HiL-симулятора будут использоваться рационально.

5. Разработка и исследование структуры силовых программно - аппаратных симуляторов основных систем электроприводов (PHiL-симуляторы).

6. Разработка и исследование топологии силовых цепей для программно - аппаратных симуляторов основных систем электроприводов.

7. Разработка и исследование системы автоматического регулирования силовыми программно - аппаратными симуляторами.

Научная новизна определяется тем, что:

1. Обоснован выбор метода решений дифференциальных уравнений (ДУ) для реализации на ПЛИС.

2. Установлена зависимость количества разрядов данных ПЛИС-модели от точности решения уравнений двигателя постоянного тока и асинхронной машины.

3. Предложена структура силового симулятора для испытаний преобразователей совместно с системой управления.

4. Предложены топологии силовых цепей симуляторов для испытаний преобразователей совместно с системой управления массово применяемых электроприводов постоянного и переменного тока.

5. Разработан универсальный способ управления силовыми симуляторами, отличающийся от известных компенсацией возмущающего воздействия.

Теоретическая и практическая значимость работы для электротехнической отрасли состоит в следующем:

– обоснована возможность замены реального оборудования электронной нагрузкой при проведении испытаний электроприводов с имитацией работы технологического оборудования;

– результаты могут быть использованы при проектировании и наладке систем управления сложными электротехническими комплексами.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе использовались методы теории электрических машин, теории электропривода, теории автоматического управления, методы математического моделирования нелинейных динамических систем с применением различных пакетов прикладных программ и численных методов решения, а так же методы экспериментального исследования для подтверждения теоретически полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рекомендации по выбору методов решения ДУ математических моделей двигателя постоянного тока и асинхронной машины для реализации на ПЛИС, обеспечивающих требуемую точность вычисления. В зависимости от шага расчёта модели реального времени предлагается семейство методов Адамса-Бэшфорта.

2. Результаты вычислительного эксперимента, устанавливающие зависимость количества разрядов данных ПЛИС-модели от точности решения ДУ двигателя постоянного тока и асинхронной машины.

3. Структура силового симулятора для испытаний преобразователей совместно с системой управления, исключающая дополнительные переключения сигналов обратной связи в контроллере испытуемой системы.

4. Топологии силовых цепей симуляторов для широко распространённых электроприводов постоянного и переменного тока, построенные на основе однотипных базовых комплектов «транзисторная стойка – реактор».

5. Выбор быстродействия системы управления нагрузочного преобразователя PHiL-симулятора для электропривода постоянного и переменного тока.

6. Универсальный способ управления силовыми симуляторами с дополнительным математическим блоком компенсации возмущающего воздействия.

Степень достоверности результатов работы определяется:

– применением положений теоретических основ электротехники;

– использованием современных апробированных программ для компьютерного моделирования электротехнических комплексов;

– подтверждением результатов компьютерного моделирования сходимостью с экспериментальными данными;

– метрологическим обеспечением и точностью измерительной аппаратуры для обработки результатов экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы. Результаты, представленные в работе, использованы в процессе проектирования и разработки частотных преобразователей в компании «Атерма Экспорт», которые эксплуатируются на объектах аг-

ропромышленного комплекса группы компаний «Русагро». Силовые симуляторы применяются при ремонте частотных преобразователей в компании «Актив-Термокуб».

Ряд полученных результатов используются в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Апробация результатов. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, представлены на: 16-ой, 18-ой и 20-ой международных научно-технической конференциях «European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe» в 2014, 2016 и 2018 гг.; Международной научно-технической конференции «VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014», г. Саранск, 07-09 октября 2014 г.; Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ)», г. Екатеринбург, в 2015 и 2018 гг.; 9-ой и 10-ой международной научно-технической конференции «International Conference on Electrical Power Drive Systems», в 2016 и 2018 гг.; Международной научно-технической конференции «Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)», г. Брашов (Румыния), 25-27 мая 2017 г.; Международной научно-технической конференции «Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)», г. Милан (Италия), 06-09 июня 2017 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 20 печатных работах, которые включают в себя 11 статей в журналах, рекомендуемых ВАК, 8 из которых индексируются в международной реферативной базе Scopus; 2 тезиса доклада в материалах конференций различного уровня; получен 1 патент РФ на полезную модель, 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в научном обосновании поставленных целей и задач исследования. Все разработки и научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Экспериментальные исследования и программная реализация выполнялась автором лично. В целом личный вклад в работах, выполненных в соавторстве, составляет не менее 75%.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 13 приложений. Общий объём диссертации – 235 страниц, в том числе 174 страницы основного текста, 154 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 97 наименований.

Содержание работы

Во введении показана актуальность темы исследования и степень её разработанности, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные защищаемые положения, выносимые на защиту, а также результаты апробации и реализации работы.

В первой главе приведено краткое описание средств для проведения испытаний и наладки систем управления электроприводов. Самым распространённым вариантом испытания преобразователя является электромеханический стенд, состоящий из следующих блоков: испытуемого преобразователя, электрического двигателя, нагрузочной электромеханической установки и нагрузочного преобразователя. На таком стенде идеально воспроизводятся электрические параметры нагрузки (индуктивности, активные сопротивления, э.д.с.), но возникают сложности с имитацией механических параметров. Зачастую для создания момента сопротивления на валу испытуемого двигателя используется второй двигатель и преобразователь сопоставимой с испытуемым преобразователем мощности. Имитация момента инерции механизма оказывается ещё сложнее, поскольку требует или установки дополнительных инерционных масс, или быстродействующего контура регулирования момента второго двигателя.

В последнее время в международном научном сообществе сформировалась тенденция к разработке и исследованию цифровых средств для проведения испытаний, называемых симуляторами. Подобные симуляторы можно разделить на два типа: Hardware-in-the-Loop (HiL) симуляторы и Power Hardware-in-the-Loop (PHiL) симуляторы. Структура стенда-симулятора для испытаний электропривода показана на рис. 1.

HiL-симуляторы применяются, в основном, для отладки программной части систем управления электроприводом. Испытуемая система управления подключается к HiL-симулятору, включающему в себя вычислительную платформу, на базе которой проводится решение уравнений модели имитируемой системы. Симулятор обрабатывает полученные сигналы и выдаёт в систему управления цифровые аналоги переменных электропривода (ток, скорость, положение и т.д.).

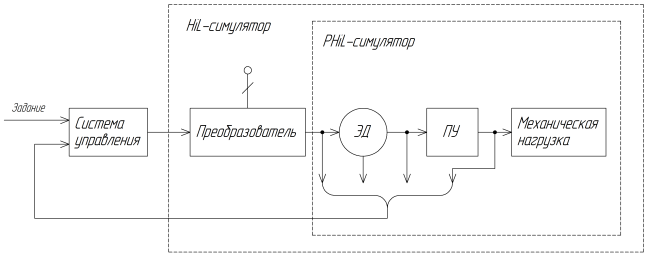


Рис. 1. Базовый элемент PHiL-симулятора

В главе рассмотрены аппаратные средства, на которых реализуются HiL-симуляторы: одноядерные и многоядерные процессоры, компьютерные кластеры, графические процессоры и ПЛИС, рассмотрены их достоинства и недостатки. На основе проведённого анализа аппаратных средств для дальнейшего построения и исследования HiL-симулятора выбраны контроллеры с ПЛИС на борту.

Второй тип симуляторов (PHiL-симуляторы) применяется для испытаний силовых преобразователей в комплексе с системами управления.

В главе рассмотрены варианты построения стенда для проведения испытаний и наладки систем управления и преобразовательных устройств, имитирующего режимы работы реальной электрической нагрузки. Первым рассмотренным вариантом является симулятор э.д.с., уравнение электрического баланса напряжений которого выглядит следующим образом: $E_{\text{ип}} = E_{\text{нп}} + \Sigma R I_{\text{р}} + \Sigma L \dfrac{dI_{\text{р}}}{dt}$. Здесь ΣR, ΣL – активные сопротивления и индуктивность всей электрической цепи си-

стемы; $E_{ИП}$, $E_{НП}$ – э.д.с. испытуемого и нагрузочного преобразователей; $I_Р$ – ток реактора.

Вторым, предлагаемым в работе, вариантом стенда для испытания и наладки систем управления и преобразователей является симулятор тока (рис. 2). Испытуемый преобразователь нагружается устройством, состоящим из реакторов и быстродействующего нагрузочного преобразователя. В этом случае форма токов определяется системой управления нагрузочного преобразователя, созданной на основе HiL-симулятора реального времени, что исключает необходимость в точном подборе параметров реакторов.

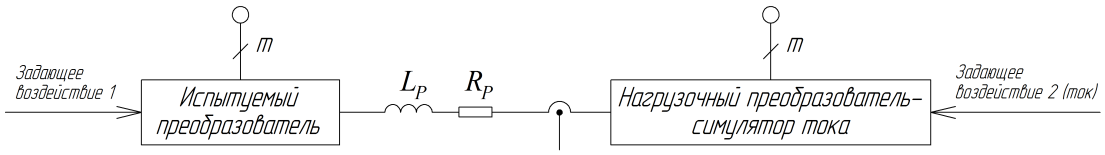


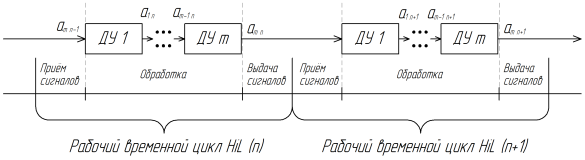
Рис. 2. Структура симулятора тока

Главным требованием к реализации симуляторов является имитация поведения силовой части электропривода в реальном времени. Это означает, что имитация процессов испытуемого комплекса должна выполняться со скоростью физического процесса в реальной системе.

Во второй главе обсуждаются вопросы построения программ реального времени, исполняемых на ПЛИС (ПЛИС-моделей), на основе представленного математического описания объектов: ШИП-ДПТ, ТПН-АД, ПЧ-АД.

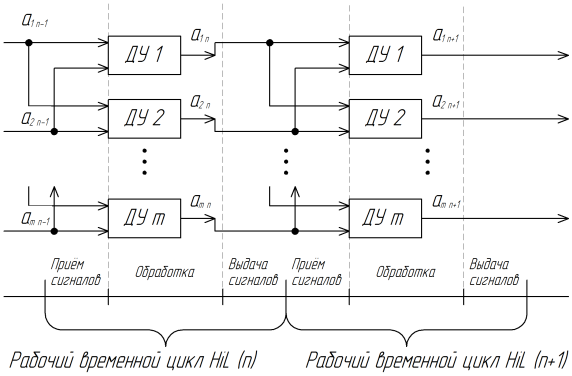
С целью выбора метода решения ДУ для реализации ПЛИС-моделей рассмотрены одношаговый численный метод решения ДУ Рунге-Кутты 4-го порядка и семейство методов Адамса-Бэшфорта. Главным недостатком метода Рунге-Кутты, с точки зрения построения ПЛИС-моделей реального времени, является то, что он требует последовательного решения уравнений метода (рис. 3), используя переменные одного уравнения, полученные на исполняемом такте для решения второго, следующего уравнения, что не позволяет реализовать одно из главных преимуществ ПЛИС – параллельную обработку информации. Семейство методов Адамса-Бэшфорта позволяют организовать решение каждого из уравне-

ний системы ДУ параллельно (рис. 3). На основе проведённого анализа сделан вывод, что для построения ПЛИС-моделей с шагом решения ДУ 1 мкс целесообразно использовать метод Адамса-Бэшфорта первого порядка, который является общеизвестным методом Эйлера. В связи с этим в работе была поставлена задача оценки ошибки, которую даёт выбранный метод.



а)

Рис. 3. Временная диагарамма последовательного (*а*) и параллельного (*б*) решения уравнений в HiL-симуляторе



б)

Поскольку основной задачей HiL-симулятора является максимально точное решение ДУ на ПЛИС, где переменные представлены в виде чисел с фиксированной точкой, предлагается определить минимальное число разрядов для целой и дробной частей переменных ПЛИС-моделей, необходимых для обеспечения достаточной точности решения ДУ.

Математические модели в работе записаны в переменных, выраженных в относительных единицах, поэтому можно оценить количество разрядов целой части переменных, учитывая их ограничения. Для ПЛИС-модели ДПТ НВ значения переменных не превышают 3-4 о.е., поэтому максимальным количеством разрядов для целой части всех переменных ПЛИС-модели выбрано 3 бита. Переменные ПЛИС-модели АД изменяются в диапазоне 7-8 о.е, поэтому зададимся максимальным количеством разрядов для целой части всех переменных ПЛИС-модели – 4 бита. Для реализации общего подхода к решению данной задачи предлагается ограничить количество разрядов дробной части всех переменных. Используя подобный подход возможно уменьшить объём используемого пространства ПЛИС-модели. Если в дальнейшем потребуется более тонкая настройка ПЛИС-модели, можно определить количество разрядов для целых и дробных частей каждой из переменных в отдельности.

Для решения поставленной задачи дана оценка среднеквадратичного отклонения момента двигателя, вычисленного методом Эйлера в ПЛИС-модели от момента, вычисленного методом Рунге-Кутты на компьютере с шагом 1 мкс при различном количестве разрядов дробной части переменных. На рис. 4 показана ПЛИС-модель ДПТ НВ в среде LabVIEW FPGA, записанная на основе метода Эйлера (1). ПЛИС-модель АД составлена аналогичным образом. Рассматриваются критические варианты пуска: для ДПТ НВ – пуск двигателя при ступенчатой подаче на него напряжения, для АД – прямой пуск.

$$\begin{cases} x_1(nh+h) = x_1(nh) + h\frac{1-x_2(nh)-x_1(nh)}{T_1}, \\ x_2(nh+h) = x_2(nh) + h\frac{x_1(nh)}{T_2}. \end{cases} \quad (1)$$

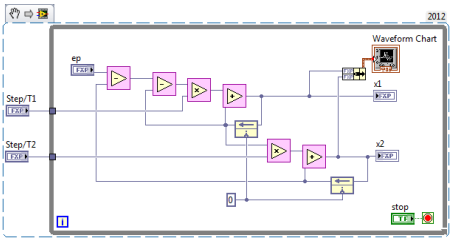
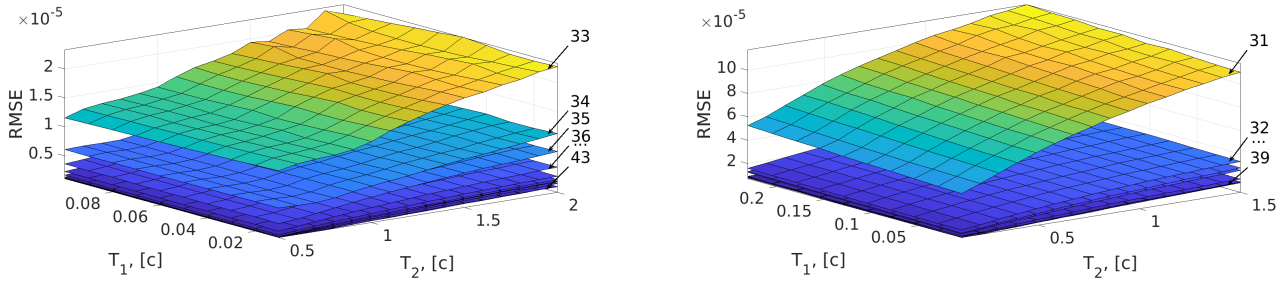


Рис. 4. ПЛИС-модель ДПТ НВ

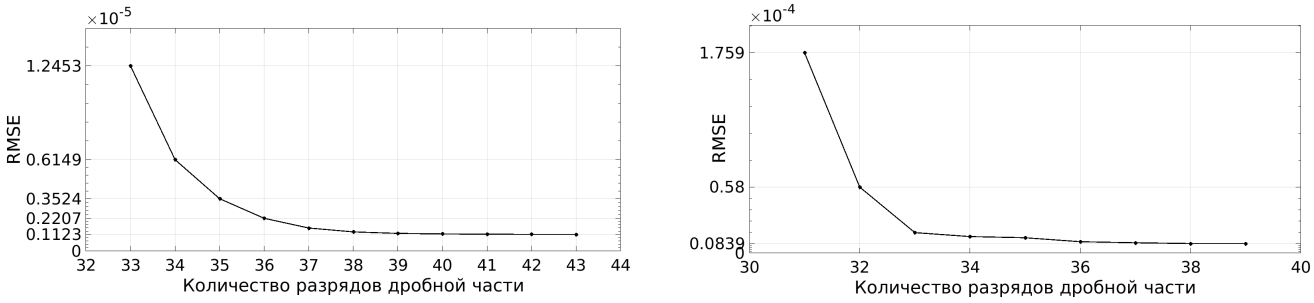
На рис. 5 демонстрируется семейство зависимостей среднеквадратичных отклонений моментов ДПТ НВ (рис. 5а) и АД (рис. 5б), полученных при имитации разгона двигателей, при различных комбинациях электромагнитной (T_1) и механической (T_2) постоянных времени в выбранном диапазоне.



а) б)

Рис. 5. Зависимости среднеквадратичного отклонения переменной момента от постоянных времени T_1 и T_2 при различном количестве разрядов дробной части данных ПЛИС-модели ДПТ НВ (*а*) и АД (*б*)

Для выбранных двигателей МБП-3Ш-Н и 4А200L6У3 зависимость среднеквадратичного отклонения от количества разрядов дробной части переменных ПЛИС-модели представлена на рис. 6. Здесь отклонение, к которому стремится диаграмма, представляет собой ошибку вычисления систем ДУ методом Эйлера.



а) б)

Рис. 6. Зависимости среднеквадратичного отклонения $RMSE$ переменной момента от количества разрядов дробной части данных ПЛИС-модели выбранных ДПТ НВ (*а*) и АД (*б*)

Представленные зависимости (рис. 5 и 6) демонстрируют, что для ПЛИС-моделей ДПТ НВ и АД можно определить «граничное число разрядов» для дробной части переменных модели, не повышающее точность по переменной момента – 35 разрядов для ДПТ НВ, при котором отклонение, не превышает $0,35 \cdot 10^{-5}$, и 32 разряда для АД, при котором отклонение не превышает $0,58 \cdot 10^{-4}$.

Для подтверждения того, что среднеквадратичные отклонения малы, получена зависимость среднего значения среднеквадратичных отклонений переменной момента от девиации всех параметров выбранных ДПТ НВ и АД. Результаты показывают, что предложенные разрядности для двигателей, можно признать приемлемыми, потому что для этих отклонений девиация параметров двигателей равна $0,0038\%$ и $0,0397\%$ соответственно, что существенно ниже девиации параметров, обусловленных неидеальностью производственного процесса двигателя.

Для проведения испытаний HiL-симуляторов выбраны системы электропривода ШИП-ДПТ и ТПН-АД. На примере системы ШИП-ДПТ наглядно демонстрируется работа транзисторных преобразователей с реализацией функции мёртвого времени в HiL-симуляторе. Система ТПН-АД уникальна тем, что для её реализации необходимо в модель реального времени принимать сигнал синхронизации СИФУ с реальной сетью для того, чтобы синхронизировать ПЛИС-модель питающей сети с реальной трёхфазной сетью. Для реализации в HiL-симуляторе выбраны модели преобразователей и двигателей с общепринятыми допущениями для того, чтобы принципиально продемонстрировать возможность реализации подобных систем. Общая блок-схема HiL-симулятора представлена на рис. 7.

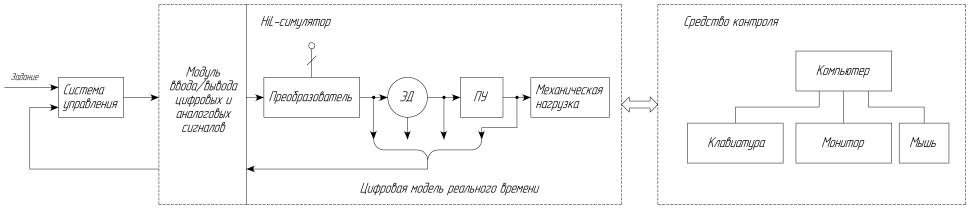
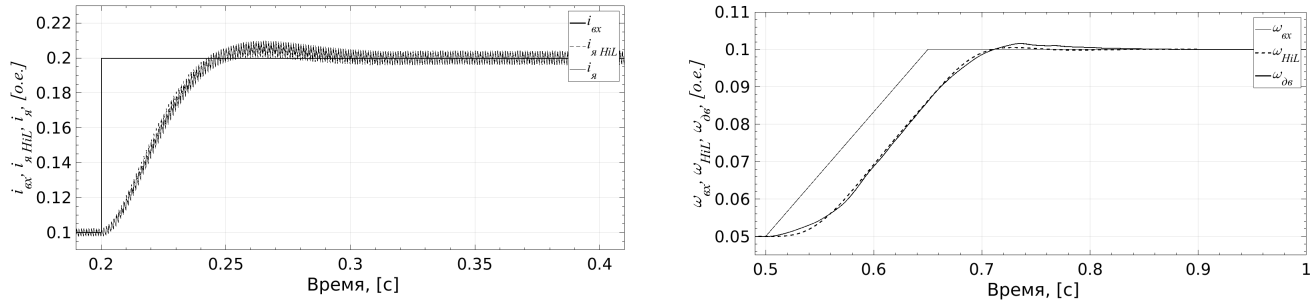


Рис. 7. Блок-схема HiL-симулятора

В работе в качестве примера системы управления электроприводом постоянного тока для испытания HiL-симулятора выбрана двухконтурная система управления скоростью якоря. На рис. 8 показана реакция реальной САР тока якоря и САР скорости на входной сигнал и результаты, полученные в HiL-симуляторе. Осциллограммы демонстрируют удовлетворительное воспроизведение переменных тока и скорости двигателя средствами HiL-симулятора.

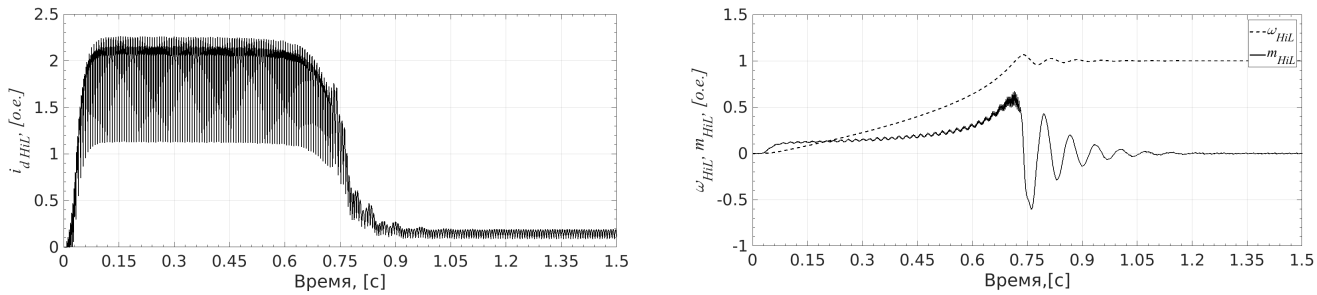


а) б)

Рис. 8. Реакция САР тока якоря (*а*) и САР скорости (*б*) ДПТ НВ на входное воздействие в сравнении с результатами работы HiL-симулятора

Системы управления электроприводом типа ТПН-АД, применяемые на практике, чаще всего выполняются в виде системы ограничения пускового тока. Такой метод управления и дал название системе ТПН-АД как «система плавного пуска» или «soft-start system». Испытание HiL-симулятора системы ТПН-АД проведено с двигателем 4А200L6У3. В системе реализовано управление с ограничением тока статора.

Осциллограммы тока двигателя, скорости и момента при пуске двигателя с ограничением тока изображены на рис. 9. Полученные диаграммы демонстрируют возможность отладки системы управления испытуемым электроприводом без обращения к реальному электромеханическому оборудованию.



а) б)

Рис. 9. Диаграммы тока (*а*), скорости и момента (*б*) АД в HiL-симуляторе ТПН-АД при пуске двигателя с ограничением тока

В третьей главе проведён анализ различных структур PHiL-симуляторов тока электропривода, показаны достоинства и недостатки каждой из приведённых структур. Симулятор тока, представленный на рис. 2, является наиболее универсальным для испытаний электроприводов, поскольку исключает необходимость точного подбора параметров реакторов. Данный тип PHiL-симуляторов можно реализовать несколькими способами, описанными в главе. В работе показана и описана структура распространённого PHiL-симулятора, отмечены её основные достоинства и недостатки. Для данной структуры введено обозначение ОСТР – PHiL-симулятор с сигналом ОС в систему управления испытуемого преобразователя по току реактора.

Предлагаемый в работе вариант реализации PHiL-симулятора исключает недостатки симулятора структуры ОСТР. Сигнал обратной связи по току для системы управления испытуемого преобразователя в этой структуре получают от HiL-симулятора, то есть используется вычисленное значение тока (см. рис. 10). В данном случае в сигнале обратной связи отсутствуют пульсации, обусловленные действием нагрузочного преобразователя. Следует отметить, что реализация предложенной структуры может потребовать серьёзных вмешательств в схему испытуемого преобразователя. Далее предлагаемую структуру будем обозначать как ОСТС – PHiL-симулятор с сигналом ОС по току в систему управления испытуемого преобразователя, полученный в HiL-симуляторе.

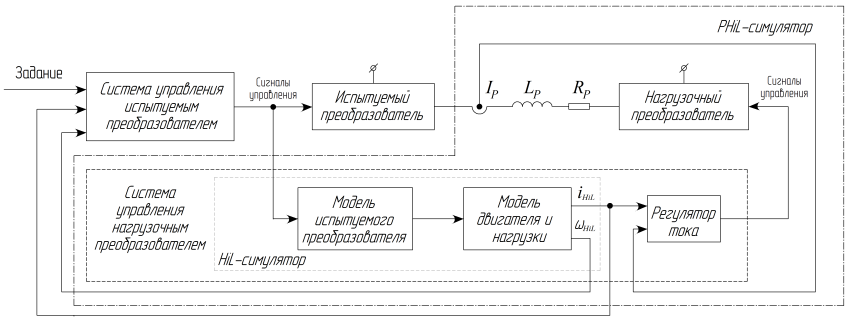


Рис. 10. Предлагаемая структура PHiL-симулятора тока типа ОСТС

Предлагаемый вариант (рис. 10) удобен для поэтапного испытания и наладки системы управления и преобразователя электропривода, включающего в себя следующие этапы: тестирование системы управления испытуемого преобразователя, испытание преобразователя с СУ при пониженном питающем напряжении и комплексное испытание преобразователя с СУ.

Также в главе предложены топологии силовых цепей PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока, реализованные на основе базовых элементов «транзисторная стойка – реактор» (рис. 11), проведён анализ работы PHiL-симулятора на примере электропривода постоянного тока. В среде Matlab/Simulink реализованы компьютерные модели силовых цепей симуляторов постоянного и переменного тока.

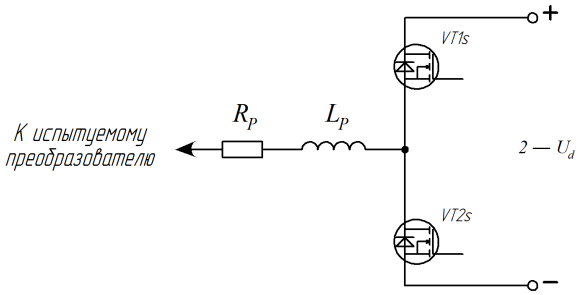


Рис. 11. Базовый элемент PHiL-симулятора

В четвёртой главе для реализации системы управления PHiL-симуляторами постоянного и переменного тока выбрана структура, которая строится на принципах последовательной коррекции объекта регулирования, как наиболее широко применяемая и методически освоенная система, позволяющая организовать регулирование тока нагрузочного преобразователя.

Система управления нагрузочным преобразователем в составе PHiL-симулятора построена по следующему принципу. Для каждого комплекта «транзисторная стойка – реактор» создана отдельная САР тока. На вход САР тока в качестве задания поступает цифровой аналог тока, вычисленный средствами HiL-

симулятора. Подобное решение удобно тем, что появляется возможность создавать раздельные контуры управления токами каждого реактора в составе PHiL-симулятора, что позволяет при имитации работы электропривода переменного тока реализовывать аварийные режимы, режимы асимметрии и т.д.

В качестве объекта регулирования в данной системе выступает реактор и транзисторная стойка, представленная в виде безынерционного звена $K_{\text{НП}}$. Передаточная функция объекта выглядит следующим образом: $W_{\text{об}}(p) = K_{\text{НП}} \dfrac{r_{\text{Р}}^{-1}}{T_{\text{Р}} p + 1}$.

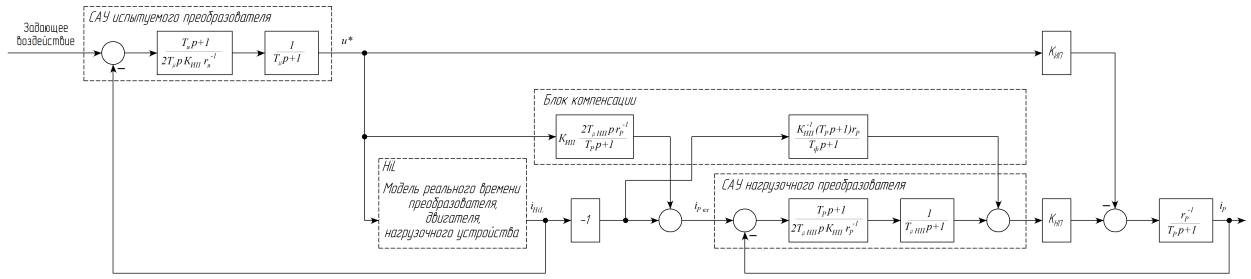
Для выбранной структуры системы управления синтезирован пропорционально - интегральный регулятор тока. В работе поставлена задача определения необходимого быстродействия САР тока нагрузочного преобразователя.

Предлагается два варианта выбора быстродействия САР тока нагрузочного преобразователя, определяемой некомпенсируемой постоянной времени $T_{\mu\ \text{НП}}$. Первый вариант – САР тока, способная воспроизводить мгновенные значения тока имитируемого электропривода. Анализ гармонического состава тока, определяемого частотой коммутации ключей испытуемого преобразователя, позволил определить быстродействие САР тока нагрузочного преобразователя, при котором обеспечено воспроизведение заданного спектра гармонических составляющих сигнала задания. При выбранном быстродействии для воспроизведения сигнала тока с частотой ШИМ, например, 1 кГц потребуется преобразователь с несущей частотой ШИМ нагрузочного преобразователя 100 кГц. В то же время, если речь пойдёт об испытании преобразователей с несущей частотой ШИМ 10 кГц и более, для построения PHiL-симуляторов, соответственно, потребуются преобразователи, способные работать с несущей частотой ШИМ много большей, чем 100 кГц. Следует отметить, что сегодня силовая электронная техника не достигла такого уровня.

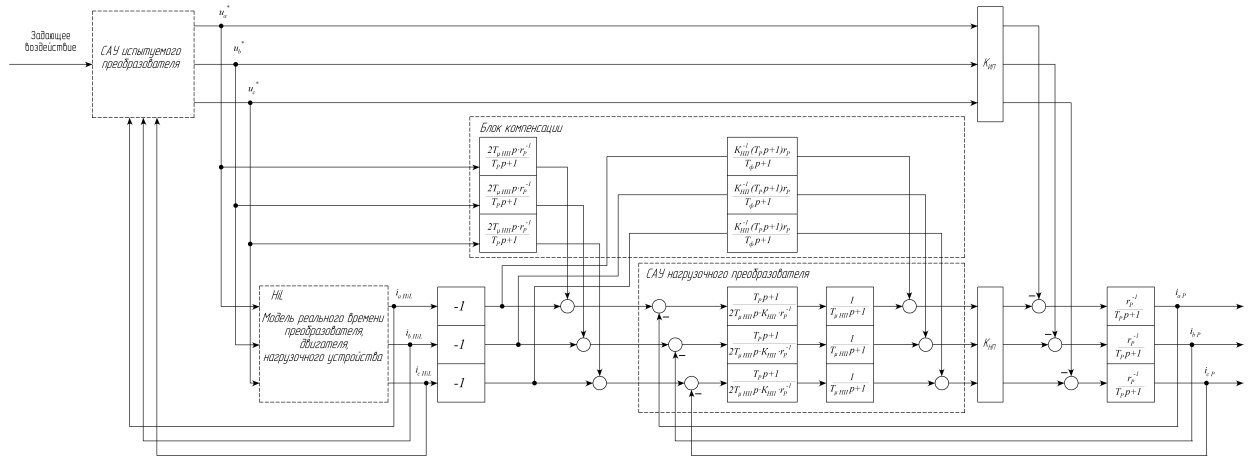
Поэтому предлагается применить второй вариант настройки САР тока нагрузочного преобразователя, способной воспроизводить основную полезную гармонику тока имитируемого электропривода. Для выбора быстродействия САР тока нагрузочного преобразователя в этом случае в работе получена зависимость зна-

чения величины некомпенсированной постоянной времени $T_{\mu\ \text{НП}}$ от параметров системы управления испытуемого преобразователя (некомпенсируемой постоянной времени испытуемого преобразователя T_μ и максимального допустимого тока $i_{\text{м}}$). Полученная система должна обеспечивать отклонение (ошибку) $x_{\text{уст}}$ между входным и выходным сигналами не превышающую заданную величину. Полученная зависимость записана следующим образом: $T_{\mu\ \text{НП}} = T_\mu \dfrac{x_{\text{уст}}}{2i_{\text{м}} e^{-\frac{\sqrt{2}}{2}} \sin\frac{\sqrt{2}}{2}}$.

На примере системы ШИП-ДПТ проведён анализ процессов, полученных в PHiL-симуляторе электропривода с замкнутой системой управления испытуемого преобразователя. На основе проведённого анализа предложено построение следящей САР тока нагрузочного преобразователя. Синтезирован блок компенсации возмущающего воздействия на САР тока нагрузочного преобразователя со стороны испытуемого преобразователя. Структурные схемы PHiL-симулятора со следящей САР тока нагрузочного преобразователя и с блоком компенсации показаны на рис. 12.



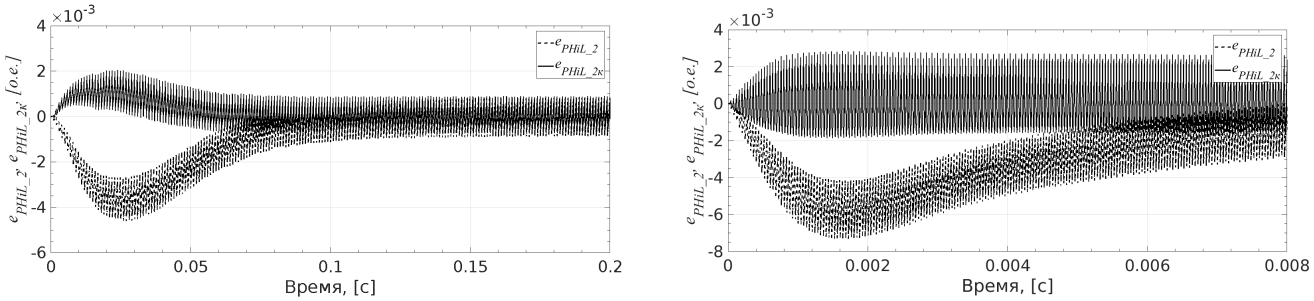
а)



б)

Рис. 12. Структура PHiL-симулятора электропривода постоянного (*а*) и переменного (*б*) тока с блоком компенсации структуры ОСТС

В главе проведено сравнение результатов моделирования, полученных в PHiL-симуляторах электроприводов постоянного и переменного тока структур ОСТР и ОСТС. Апробация полученных результатов проведена на комплексных компьютерных моделях PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока, а также на экспериментальном стенде PHiL-симулятора электропривода постоянного тока. На рис. 13 показаны диаграммы ошибок воспроизведения реакции САР тока в реакторе PHiL-симулятора электропривода постоянного (*а*) и переменного (*б*) тока структуры ОСТС без блока (e_{PHiL_2}) и с блоком компенсации ($e_{PHiL_2к}$). В качестве испытуемого электропривода переменного тока применялась система ПЧ-АД с векторной системой управления.



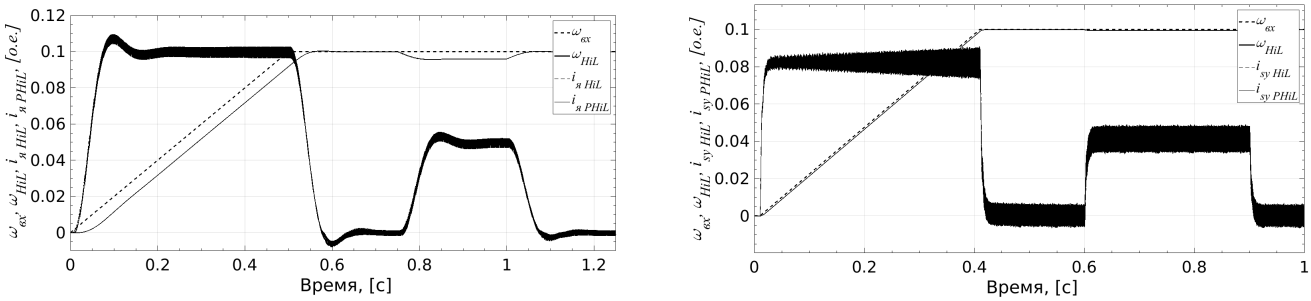
а) б)

Рис. 13. Ошибки воспроизведения реакции САР тока в реакторе симулятора электропривода постоянного (*а*) и переменного (*б*) тока структуры ОСТС без блока и с блоком компенсации

Применение следящей САР тока и предлагаемого блока компенсации позволило уменьшить среднеквадратичное отклонение ошибки воспроизведения тока двигателя в реакторах на 56,3% (с 0,0016 до 0,0007) и на 67,6% (с 0,0037 до 0,0012) для PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока соответственно в сравнении с PHiL-симулятором без следящей САР тока и без блока компенсации.

Для имитации «наброса» нагрузки в электроприводе на рис. 14 показана реакция вычисленной в HiL-симуляторе угловой скорости (ω_{HiL}) в замкнутой САР скорости ($\omega_{вх}$) с последующим ступенчатым набросом и сбросом нагрузки. На осциллограмме рис. 14а также демонстрируются вычисленный в HiL-симуляторе ток якоря ДПТ с НВ ($i_{я\ HiL}$) и ток в PHiL-симуляторе ($i_{я\ PHiL}$), определяющие момент двигателя. На рис. 14б также показана диаграмма активного тока ($i_{sy\ HiL}$)

АД, вычисленая в HiL-симуляторе при разгоне двигателя с последующим ступенчатым набросом и сбросом нагрузки и «y»-составляющая тока реактора $i_{sy\ PHiL}$.



а) б)

Рис. 14. Диаграмма вычисленных в HiL-симуляторе скорости и тока, формирующего момент двигателя, а также тока реактора в PHiL-симуляторе при пуске двигателя от ЗИ с последующим набросом и сбросом нагрузки для электропривода постоянного (а) и переменного (б) тока

Представленные осциллограммы демонстрируют возможность имитации переменных электропривода постоянного и переменного тока средствами PHiL-симулятора с достаточной достоверностью. Полученный инструмент иллюстрирует возможность проведения различного рода испытания преобразователей без необходимости обращения к электромеханическим аппаратным средствам.

В Заключении изложены итоги выполненного исследования, перспективы дальнейшей разработки темы. Исследования симуляторов для массово применяемых электроприводов, проведённые на основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, позволили сделать следующие выводы:

1. Анализ численных методов для параллельного решения ДУ позволил выбрать метод, при котором решение ДУ на ПЛИС обеспечивает требуемую точность вычисления. Для задач симуляции в реальном времени с шагом дискретизации 1 мкс целесообразно использовать метод Адамса-Бэшфорта 1-го порядка, то есть метод Эйлера. В свою очередь для HiL-симуляторов, работающих с шагом более 1 микросекунды, рациональнее пользоваться методами Адамса-Бэшфорта более высокого порядка, поскольку они обеспечивают более высокую точность.

2. Приведённые оценки по среднеквадратичным отклонениям переменных моделей двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя позволили подойти к рациональному выбору разрядности данных ПЛИС-моделей. Например, для

двигателя постоянного тока достаточно принять 35 разрядов для дробной части данных ПЛИС-модели, при котором среднеквадратичное отклонение по переменной момента не будет превышать $0,3523 \cdot 10^{-5}$. В свою очередь для ПЛИС-модели асинхронного двигателя достаточно принять 33 разряда для дробной части данных модели, что обеспечит среднеквадратичное отклонение по переменной момента, не превышающее $0,0839 \cdot 10^{-4}$. Полученные отклонения можно признать вполне приемлемыми, потому что при данных отклонениях девиация параметров двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя равна $0,0038\%$ и $0,0397\%$ соответственно, что существенно ниже девиации параметров, обусловленных неидеальностью производственного процесса двигателей. Если потребуется более тонкая настройка ПЛИС-модели, можно определить количество разрядов для целых и дробных частей каждой из переменных в отдельности.

3. Анализ структур PHiL-симуляторов тока показал основные достоинства и недостатки существующих решений. Предложена структура симулятора тока с сигналом управления по выходу системы управления испытуемого преобразователя с сигналом ОС в систему управления испытуемого преобразователя от модели реального времени. Предложенная структура исключает пульсации, обусловленные действием нагрузочного преобразователя. При пошаговом испытании электроприводов подобная структура удобна тем, что исключает дополнительные переключения сигналов обратной связи в контроллере испытуемой системы.

4. Для того, чтобы охватить массово используемые системы электроприводов предложены топологии силовых цепей PHiL-симуляторов на основе однотипных базовых комплектов «транзисторная стойка – реактор»: ТП-Д, ШИП-ДПТ, ТПН-АД и ПЧ-АД. Анализ работы PHiL-симулятора на примере электропривода ШИП-ДПТ продемонстрировал возможность реализации двигательного и генераторного режимов работы электрической машины.

5. Анализ существующих систем управления электроприводами позволил выбрать структуру системы управления PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока. На основе проведённого анализа построенной си-

стемы управления получена зависимость быстродействия САР тока нагрузочного преобразователя от быстродействия САР тока испытуемого преобразователя для PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока. Полученная зависимость позволяет выбрать быстродействие системы управления PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока.

6. Анализ системы управления нагрузочного преобразователя, проведённый на компьютерной модели, показал, что для улучшения качества воспроизведения токов двигателя в реакторе PHiL-симулятора нужно реализовать следящую САР тока нагрузочного преобразователя и компенсировать возмущающее воздействие на САР тока нагрузочного преобразователя со стороны испытуемого преобразователя. Результаты компьютерного моделирования подтверждены экспериментальными данными и демонстрируют уменьшение ошибки воспроизведения тока двигателя в реакторах PHiL-симуляторов при использовании предлагаемого блока со следящей САР тока и компенсацией возмущающего воздействия. В предлагаемой структуре PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока среднеквадратичное отклонение ошибки воспроизведения тока двигателя в реакторах уменьшилось на 56,3% и на 67,6% соответственно в сравнении с PHiL-симулятором без блока компенсации.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с разработкой моделей реального времени комплексных имитируемых объектов; с определением параметров реакторов PHiL-симуляторов электроприводов; с увеличением быстродействия системы управления нагрузочного преобразователя PHiL-симуляторов электроприводов постоянного и переменного тока.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК

1. Мудров М.В. Программно-аппаратный комплекс для моделирования электроприводов в реальном времени / Зюзев А.М., Нестеров К.Е., **Мудров М.В.** // Электротехника. — 2014. — № 9. — 56—62. 0, 26 п.л. / 0, 15 п.л.

2. Mudrov M.V. The software-hardware simulator of the electric drive / Ziuzev A.M., Nesterov K.E., **Mudrov M.V.** //. — 2014 16th European Conference on Power Electronics, Applications, EPE-ECCE Europe 2014, 2014. — 6911018. 0, 26 п.л. / 0, 16 п.л. (Scopus).
3. Мудров М.В. Состояние и перспективы использования аппаратно-программных симуляторов электротехнических комплексов / А. М. Костыгов [и др.] // Электротехника. — 2015. — № 6. — 8—12. 0, 19 п.л. / 0, 11 п.л.
4. Мудров М.В. Аппаратно-программные симуляторы электротехнических комплексов / Зюзев А.М., **Мудров М.В.**, Нестеров К.Е. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016. — № 2. — 58—62. 0, 19 п.л. / 0, 11 п.л.
5. Mudrov M.V. PHIL-system for electric drives application / Ziuzev A.M., **Mudrov M.V.**, Nesterov K.E. //. — 2016 9th International conference on power drives systems, ICPDS 2016, 2016. — 7756687. 0, 15 п.л. / 0, 09 п.л. (Scopus).
6. Mudrov M.V. Electric drive system power simulator / Ziuzev A.M., **Mudrov M.V.**, Nesterov K.E. //. — 2016 18th European Conference on Power Electronics, Applications, EPE-ECCE Europe 2016, 2016. — 7695484. 0, 34 п.л. / 0, 2 п.л. (Scopus).
7. Mudrov M.V. FPGA-based Hardware-in-the-Loop system bits capacity evaluation based on induction motor model / Ziuzev A.M., **Mudrov M.V.**, Nesterov K.E. //. — 2017 17th IEEE International conference on environment & engineering & 2017 1st IEEE Industrial & commertial power systems Europe, EEEIC / I & CPS EUROPE, 2017. — 7977827. 0, 19 п.л. / 0, 11 п.л. (Scopus).
8. Mudrov M.V. Hardware-in-the-Loop system numerical methods evaluation based on brush DC-motor model / **M. V. Mudrov** [и др.] //. — 2017 International Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment, OPTIM 2017 & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, ACEMP, 2017. — 428—433. 0, 26 п.л. / 0, 16 п.л. (Scopus).
9. Mudrov M.V. Asynchronous electric drive Power-Hardware-in-the-Loop system / **M. V. Mudrov** [и др.] //. — 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018, 2018. — 1—5. 0, 19 п. л. / 0, 11 п. л. (Scopus).
10. Mudrov M.V. Power Electrical drive Power-Hardware-in-the-Loop system / **M. V. Mudrov** [и др.] //. — 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, 2018. — 8571801. 0, 26 п.л. / 0, 16 п.л. (Scopus).
11. Mudrov M.V. Electric drives Power-Hardware-in-the-Loop system structures / **M. V. Mudrov** [и др.] //. — 2018 20th European Conference on Power Electronics, Applications, EPE-ECCE Europe 2018, 2018. — 8515564. 0, 26 п.л. / 0, 16 п.л. (Scopus).

Патенты

12. Пат. на полезную модель № 169123 Рос. Федерация. Устройство для испытаний полупроводниковых преобразователей энергии / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров, **М. В. Мудров** ; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2016128017 ; заявл. 11.07.2016 ; опубл. 03.03.2017.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

13. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2014660942. ПЛИС модель-симулятор вентильного электродвигателя / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров, **М. В. Мудров** ; патентообладатель ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2014618880 ; заявл. 03.09.2014 ; опубл. 20.10.2014.

14. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2014660944. ПЛИС модель-симулятор трёхфазного тиристорного преобразователя напряжения / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров, **М. В. Мудров** ; патентообладатель ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2014618877 ; заявл. 03.09.2014 ; опубл. 20.10.2014.
15. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2014660946. ПЛИС модель-симулятор двигателя постоянного тока с независимым возбуждением / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров, **М. В. Мудров** ; патентообладатель ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2014618878 ; заявл. 03.09.2014 ; опубл. 20.10.2014.
16. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2014661060. ПЛИС модель-симулятор трёхфазного транзисторного инвертора напряжения / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров, **М. В. Мудров** ; патентообладатель ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2014618875 ; заявл. 03.09.2014 ; опубл. 22.10.2014.
17. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2014661267. ПЛИС модель-симулятор асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат / А. М. Зюзев [и др.] ; патентообладатель ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2014618828 ; заявл. 03.09.2014 ; опубл. 28.10.2014.
18. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 20146610721. ПЛИС модель-симулятор асинхронного электродвигателя в трёхфазной системе координат / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров, **М. В. Мудров** ; патентообладатель ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». — № 2015618552 ; заявл. 17.09.2015 ; опубл. 18.01.2016.

Другие публикации

19. Мудров М.В. Опыт разработки экспериментального комплекса для исследования систем электроприводов переменного тока / Зюзев А.М., Нестеров К.Е., **Мудров М.В.** //. — Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, 2014. — 548—551. 0, 15 п.л. / 0, 09 п.л. (РИНЦ).
20. Мудров М.В. Аппаратно-программные симуляторы электротехнических комплексов / А. М. Зюзев [и др.] //. — Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции ”Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015)”, 2015. — 159—162. 0, 15 п.л. / 0, 09 п.л. (РИНЦ).

Подписано в печать ___.___.2019 Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ №.___

Отпечатано в Типографии «А-Принт»

620049, г. Екатеринбург, пер. Лобачевского 1.