

На правах рукописи



СТАРОДУБЦЕВ Дмитрий Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Научный руководитель: **Кулинич Юрий Михайлович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Колпахчян Павел Григорьевич**

доктор технических наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор кафедры «Электрическая тяга»

Стельмашук Сергей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится 16 декабря 2025 г. в 15 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета 44.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: Россия, 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д.47, главный корпус, аудитория 204.

С диссертацией, авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДВГУПС» (www.dvgups.ru) и на официальном сайте (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, просим направлять по адресу: 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, ФГБОУ ВО «ДВГУПС», учёному секретарю диссертационного совета 44.2.001.01, e-mail: diss@festu.khv.ru

Автореферат разослан «04» 11 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
44.02.001.01, к.т.н., доцент



О. А. Нератова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время на сети железных дорог России для перевозки грузов и пассажиров эксплуатируется электроподвижной состав переменного и постоянного тока, потребление электроэнергии которых превышает 78 % от общего потребления всей железнодорожной отрасли.

Одними из основных потребителей электроэнергии на электроподвижном составе переменного тока являются тяговые электродвигатели и вспомогательные электрические машины, к числу последних относятся мотор-компрессоры, мотор-вентиляторы, расщепители фаз, приводным двигателем которых является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Несмотря на продолжительное применение асинхронных двигателей в качестве привода вспомогательных машин, они по-прежнему остаются малоэнергоэффективными. Сейчас на электровозах переменного тока применяют прямой пуск асинхронного двигателя вспомогательных машин, получающих питание от фазорасщепителя. Основными причинами низкой энергетической эффективности такой системы питания являются несимметрия и пульсации напряжения в обмотке собственных нужд электровоза.

Существуют и другие способы включения вспомогательных машин, однако, несмотря на положительные свойства, они не нашли применение на электроподвижном составе из-за скачкообразного характера переходных процессов, протекающих в двигателе, повышенной величины перерегулирования, а также продолжительного времени переходных процессов во время пуска.

Диссертационная работа является актуальной в связи с задачей повышения энергетической эффективности вспомогательного электропривода электроподвижного состава и необходимостью его регулирования производительности на протяжении всего времени работы.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационная работа выполнена на основе результатов научных работ отечественных и зарубежных учёных, которые занимались вопросами улучшения энергетической эффективности асинхронных двигателей: В.М. Филиповский, В.В. Литовченко, Ю.М. Кулинич, Г.И. Однокопылов, П.Г. Колпахчан, М.Ю. Пустоветов, Ю.Н. Калачев, А.М. Худонов, И.В. Музылева, О.Б. Шонин, А.С. Алексеев, А.Н. Пахомов, А.А. Федоренко, А.А. Зарифьян, Е.П. Попов, А.А. Бакланов, А.М. Рутштейн, С.В. Стельмашук, О.Л. Рапопорт, А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Усольцев, А.Н. Савоськин, А.Д. Лиходедов, В.В. Григорьев, В.Н. Фащенко, Д.О. Маломижев, В.В. Рудаков, а также другими учёными и специалистами.

Объектом исследования является асинхронный электродвигатель, используемый в качестве приводного двигателя вспомогательных машин электроподвижного состава электровоза переменного тока серии 2(3)ЭС5К.

Предметом исследования являются средства и методы повышения энергетической эффективности и качественных показателей работы асинхронных электродвигателей вспомогательного электропривода.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности и улучшение качества регулирования асинхронных электродвигателей вспомогательного электропривода электроподвижного состава переменного тока.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическая модель асинхронного электропривода мотор-вентиляторной установки.
2. Разработана система модального управления для двигателя вспомогательного электропривода.
3. Выполнено имитационное моделирование работы системы вспомогательного электропривода.
4. Оценена энергетическая и экономическая эффективность от внедрения системы модального управления вспомогательным электроприводом.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Синтезирован модальный регулятор для управления асинхронным вспомогательным электроприводом с вентиляторной нагрузкой.
2. Обоснованно применение асинхронных двигателей меньшей мощности в качестве приводных двигателей мотор-вентиляторных установок электровоза.
3. Разработана модель асинхронного двигателя с динамической индуктивностью в пространстве состояний.

Практическая значимость работы:

1. Полученные результаты могут являться методической базой для синтеза систем управления асинхронными электродвигателями, работающими в режиме «старт-стоп».
2. Разработанная математическая модель асинхронного электродвигателя с динамической индуктивностью позволяет с большей достоверностью исследовать электромагнитные процессы, протекающие в нем.
3. Применение предлагаемых в работе систем питания и управления позволило сократить время действия пусковых токов, а также уменьшить пульсации в переходных режимах работы асинхронного электродвигателя.

Личный вклад соискателя. Автору принадлежат работы по выполнению математического моделирования системы модального управления вспомогательным электроприводом электроподвижного состава, разработке математической модели асинхронного электродвигателя с динамической индуктивностью, синтезу модального регулятора, определению работоспособности системы модального управления, обоснованию возможности применения модального управления электродвигателем меньшей мощности в качестве приводного двигателя мо-

тор-вентиляторной установки электроподвижного состава, технико-экономической оценке реализации на электроподвижном составе модальной системы управления.

Методы исследования. Результаты, полученные в работе, основаны на корректном использовании теории автоматического управления и решении дифференциальных уравнений, выполнении физического эксперимента, описании модели асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат $d - q$ и теории пространства состояний. Проведение математического моделирования осуществлялось с использованием отечественной среды моделирования *SimInTech*. Физический эксперимент осуществлялся в электромашинном цехе депо «Дальневосточное» ООО «ЛокоТех-Сервис» на асинхронном двигателе серии НВА-55.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель асинхронного электродвигателя с вентиляторной нагрузкой и модальным управлением;
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований асинхронного электродвигателя с системой модального управления

Достоверность научных положений и результатов, представленных в работе, обоснована теоретически и подтверждена результатами математического моделирования разработанной системы модального управления.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на: Всероссийской научно-практической конференции творческой молодёжи с международным участием "Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности АТР" г. Хабаровск, 20 апреля 2023 г., ДВГУПС; Четырнадцатой Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона» г. Иркутск, 19 октября 2023 г., ИрГУПС; VII международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: Развитие в условиях глобальных изменений потоков» г. Ростов-на-Дону, 2 февраля, 2023 г., РГУПС; XXVI краевом конкурсе молодых ученых г. Хабаровск, 22 января 2024 г., ТОГУ; Всероссийской научно-практической конференции творческой молодёжи с международным участием "Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности АТР" г. Хабаровск, 18 апреля 2024 г., ДВГУПС; VIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» г. Омск, 14 – 15 ноября 2024 г.; XXVII краевом конкурсе молодых ученых г. Хабаровск, 17 января 2025 г., ТОГУ; заседаниях и научно-технических семи-нарах кафедры «Транспорт железных дорог» ДВГУПС в 2022 – 2025 гг.

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 7 статьях, рецензируемых научных изданиях ВАК Минобрнауки России, и в 1 патенте на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований и приложений. Текст диссертации изложен на 143 страницах, содержит 62 рисунка, 13 таблиц и пять приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность повышения энергетической эффективности вспомогательного электропривода электроподвижного состава переменного тока. Сформулирована научная новизна, практическая значимость темы исследования. Представлены цель и задачи диссертационного исследования, а также описаны методы их проведения.

В первой главе рассмотрены системы пуска вспомогательного электропривода электроподвижного состава переменного тока, описаны методы повышения их энергетической эффективности. Сформулированы цели и задачи научного исследования.

На электроподвижном составе железных дорог серий 2ЭС5К, 3ЭС5К, ЭП1М и др. для питания вспомогательного электропривода применяют систему с конденсаторными или электромашинными преобразователями, а также схемы со статическими полупроводниковыми преобразователями собственных нужд.

Система с электромашинными преобразователями основана на включении в цепь питания вспомогательного электропривода фазорасщепителя (пускового двигателя). Основными недостатками схемы питания электродвигателей от фазорасщепителя являются несимметрия формы и повышенные пульсации напряжения, получаемого на его выходе. К недостаткам также можно отнести и то, что фазорасщепитель запущен на протяжении всего времени работы вспомогательных машин и, тем самым, создает полезную работу только в момент пуска двигателя и в переходных режимах работы, из-за чего снижается энергоэффективность применения такой системы питания.

Работа фазорасщепителя зависит от формы напряжения, получаемой от обмотки собственных нужд (ОСН). Ранее учеными Российского университета транспорта (МИИТ) были исследованы схемы питания и получены кривые напряжений на ОСН, представленные на рис. 1, для следующих вариантов работы электроподвижного состава:

1. При работе электровоза у тяговой подстанции с напряжением в контактной сети 27,5 кВ;
2. При работе электровоза на середине фидерного участка с напряжением контактной сети 25 кВ;
3. При работе электровоза на участке консольного питания с напряжением сети 19 кВ.

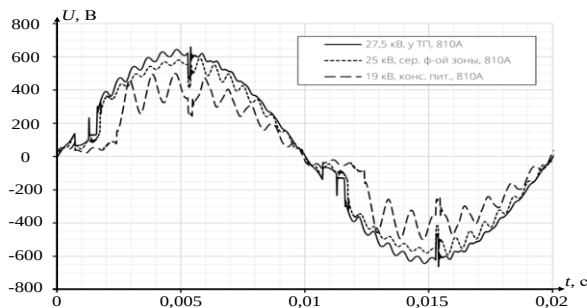


Рис. 1 – Форма напряжения на ОСН

Из анализа рисунка видно, что на обмотке собственных нужд кривая напряжения имеет пульсации, а ее форма изменяется в зависимости от схемы питания электровоза. Это напряжение вызывает пульсирующее изменение тока статора двигателя.

теля.

Кроме этого, при движении поезда по перегону часто наблюдается снижение напряжения в контактной сети менее 21 кВ. В случаях движения электровоза по участку с консольным питанием возможно снижение напряжения до 16 – 19 кВ. Такое снижение напряжения в контактной сети приводит к неравномерности фазных напряжений и токов, поступающих на асинхронный вспомогательный электропривод, что приводит к возникновению токов обратной последовательности, которые вызывают повышенный нагрев фаз и преждевременное старение изоляции статорной обмотки, что, в свою очередь, способствует увеличению времени пуска электродвигателей и выходу их из строя.

Для повышения качества питающего вспомогательные машины напряжения и их надежности применяют схему индивидуального питания, основанную на подключении двигателя к трехфазному автономному инвертору напряжения (АИН). В настоящее время в отечественной и зарубежной практике имеется большой опыт применения систем питания от статических преобразователей собственных нужд, работа которых основана на преобразовании параметров, получаемых с источника питания, в необходимые для потребителей. Примерами применения системы стал подвижной состав серий ЭП20, 2ЭС4К, 2ЭС5, 2ЭС10, ЭВС1 и ЭВС2. Такая система питания позволяет устранить недостатки, связанные с повышенными пульсациями и несимметрией питающего напряжения.

В свою очередь построение системы питания вспомогательного электропривода с возможностью регулирования напряжения питания электропривода в зависимости от режима работы электроподвижного состава позволит уменьшить их энергопотребление и продлить срок службы.

На сегодняшний день разработано несколько систем управления асинхронными электродвигателями, основными из которых являются система скалярного и векторного управления. В результате анализа систем управления асинхронными двигателями установлены их достоинства и недостатки, согласно которым для улучшения качества питающего асинхронные электродвигатели напря-

жения, оптимизации энергетических показателей в пусковых и переходных режимах работы и повышения их надежности в работе предлагается применять схему питания асинхронных электродвигателей от статических преобразователей собственных нужд с использованием модальной системы управления, которая устраняет недостатки скалярной и векторной системы путем задания требуемых показателей качества.

Во второй главе представлена математическая модель асинхронного электродвигателя с вентиляторной нагрузкой. В качестве объекта управления принят асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии НВА-55С, мощностью 55 кВт, применяемый в качестве приводного электродвигателя вспомогательного электропривода. В качестве нагрузки на валу электродвигателя – вентиляторная установка ЦВ 9-37,6-7,6, используемая в электровозе 2(3)ЭС5К для охлаждения электрического оборудования. Согласно этому математическая модель системы будет состоять из двух основных структурных блоков: модели электродвигателя и модели вентиляторной нагрузки.

Математическая модель асинхронного электродвигателя в системе координат $d - q$, вращающейся с угловой скоростью ω , описывается системой уравнений обобщенной электрической машины, приведенной к форме Коши для упрощения последующих расчетов (1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{u_{sd}}{L_s} - \frac{1}{T_s} i_{sd} + \frac{K_r \psi_r}{L_s T_r}; \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{u_{sq}}{L_s} - \frac{1}{T_s} i_{sq} - \frac{K_r z_p}{L_s} \omega_r \psi_r; \\ \frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r} (L_m i_{sd} - \psi_r); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3}{2J} z_p K_r i_{sq} \psi_r - M_c, \end{array} \right. \quad (1)$$

Индуктивности рассеяния обмоток статора L_{os} и ротора L_{or} , а также индуктивность намагничивания L_m в модели двигателя принимаются постоянными величинами. Момент инерции J асинхронного электродвигателя для модели был определен экспериментально с помощью метода падающего груза. На рис. 2 в соответствии с (1) представлена структурная схема модели электродвигателя.

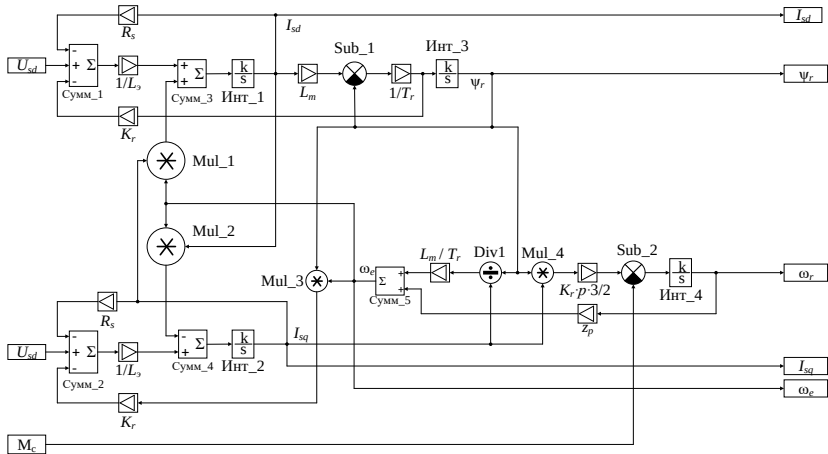


Рис. 2 – Структурная схема математической модели электродвигателя НВА-55С

На вход модели поступают сигналы проекции напряжений статора U_{sd} и U_{sq} на оси вращающейся системы координат $d-q$, а также значение момента сопротивления M_c на валу двигателя.

На выходе модели формируются сигналы потокоцепления ротора ψ_r , частоты вращения ротора ω_r и составляющих тока статора I_{sd} и I_{sq} .

Для проверки адекватности работы модели элетродвигателя в электромашинном цехе депо «Дальневосточное» ООО «ЛокоТех-Сервис» была собрана установка для измерения частоты вращения вала асинхронного электродвигателя серии НВА-55С, представленная на рис. 3.

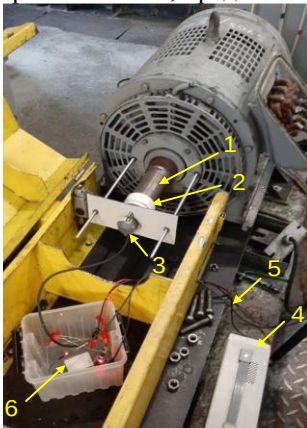


Рис. 3 – Установка для измерения частоты вращения вала двигателя

На вал электродвигателя 1 через переходную самоцентрирующуюся втулку 2 закреплен энкодер 3 серии DKS40-R5J02048, получаемый питание от блока питания 4. Сигнал с энкодера через провода 5 поступает на микроконтроллер 6 STM32F103C8T6. Для передачи данных от микроконтроллера на компьютер использовался USB-TTL-модуль на базе микросхемы CH340E. Для считывания сигналов с выхода микроконтроллера применялась программа *Termite*.

Проверка адекватности данных, получаемых с энкодера, проводилась эмпирическим путем на стационарной установке, представленной на рис. 4.

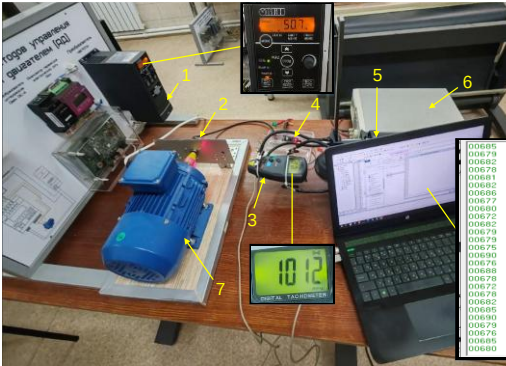


Рис. 4 – Установка для проверки достоверности данных, полученных с выхода энкодера:

1 – преобразователь частоты; 2 – энкодер; 3 – цифровой тахометр DT6234B; 4 – микроконтроллер; 5 – ноутбук; 6 – источник питания; 7 – асинхронный двигатель АИР80В6

Проверка достоверности заключается в определении погрешности данных, полученных с энкодера при разных частотах питающего напряжения, и сравнении их с расчетным значением синхронной частоты вращения асинхронного двигателя. Для проверки достоверности, поступающих с энкодера данных были также получены значения частоты с цифрового тахометра DT6234B, с погрешностью измерения 0,05%, при нескольких частотах преобразователя частоты. По результатам эксперимента погрешность измерений составила 1,04 %, что

свидетельствует о высокой точности измерений энкодером.

На рис. 5 представлены кривые частоты вращения вала ротора электродвигателя ω_r , полученные при моделировании 1 и натурном эксперименте 2. Из анализа рисунка следует, что кривые имеют одинаковое время переходного процесса $t_{пп}$. Частота вращения в установившемся режиме работы $\omega_{r,уст.}$ в модели 1 также совпадает с экспериментальными данным 2, однако сам характер переходных процессов на интервале $0 < t_{пп}$ существенно отличается. В этой связи разработанная модель асинхронного электродвигателя не адекватно описывает электромагнитные процессы в переходных режимах и требует дальнейшей доработки.

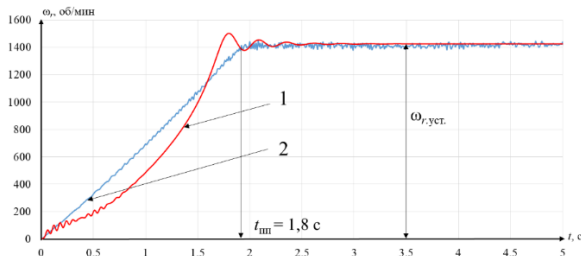


Рис. 5 – Кривые частоты вращения ротора модели и реального электродвигателя:

1 – кривая частоты вращения модели асинхронного двигателя; 2 – кривая частоты вращения ротора реального двигателя.

Для упрощения расчетов при моделировании работы асинхронного электродвигателя величину индуктивности намагничивания принимают постоянной величиной. Однако электродвигатели работают в пределах всей нелинейной кривой намагничивания, включая зону насыщения, то зависимость магнитного потока от тока статора $\Phi = f(I_s)$ также является нелинейной. Соответственно индуктивность намагничивания L_m при работе электродвигателя будет переменной величиной, зависящей от тока статора. Для повышения точности моделирования работы асинхронного электродвигателя в переходных режимах работы принято решение заменить статическую индуктивности намагничивания L_m ее динамической характеристикой L_m^d . Для этого в модель асинхронного электродвигателя был включен блок таблицы «From table». Рассчитанное в модели значение тока статора I_s поступает на вход этого блока, в котором в табличной форме представлен массив соответствующих значений индуктивности намагничивания L_m . На его выходе формируется сигнал динамической индуктивности намагничивания L_m^d , рассчитываемой по формуле

$$L_m^d = L_m(I_s) + \frac{dL_m(I_s)}{di_s} \cdot I_s = \frac{w \cdot S \cdot B}{I_s} + \frac{dL_m(I_s)}{di_s} \cdot I_s, \quad (2)$$

где $dL_m(I_s)/di_s$ – динамическая составляющая индуктивности намагничивания.

Структурная схема уточненной модели асинхронного электродвигателя с учетом динамической индуктивности L_m^d представлена на рис. 6.

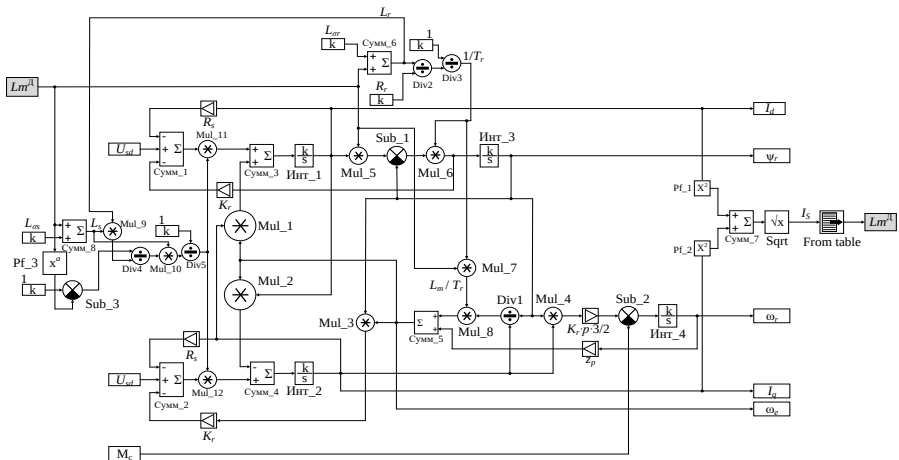


Рис. 6 – Структурная схема уточненной модели асинхронного электродвигателя

На рис. 7 показаны кривые частот вращения ротора ω_r , полученные с помощью уточненной математической модели 2 (рис. 7) и реального асинхронного электродвигателя 1.

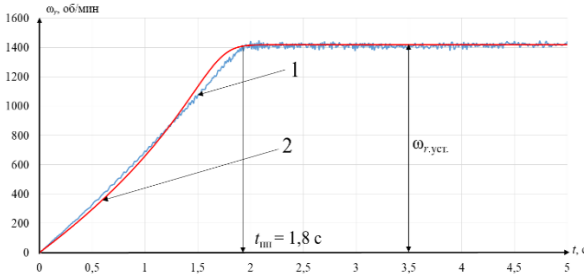


Рис. 7 – Кривые частоты вращения ротора уточненной модели и реального электродвигателя

Из рисунка видно, что кривые частоты вращения ротора ω_r в переходном и установившемся $\omega_{r.уст.}$ режимах работы реального электродвигателя и математической модели совпадают по характеру и времени переходного процесса. Коэффициент множе-

ственной детерминации кривых R^2 составил 0,996, что свидетельствует о адекватности отображения электромагнитных процессов. В этой связи применение уточненной математической модели асинхронного электродвигателя может быть рекомендовано для разработки системы управления асинхронным электродвигателем, а также моделированию нагрузки на валу.

В основу математической модели блока вентиляторной нагрузки положены основные рабочие характеристики мотор-вентиляторной установки, описываемые системой уравнений (3). К ним относят величину подачи Q , статическое давление вентилятора p , потребляемую вентилятором мощность N_6 , момент сопротивления на валу двигателя M_c , а также потребляемую мощность мотор-вентиляторной установки P_v , работающей от приводного асинхронного электродвигателя.

$$\begin{cases} Q = Q_{ном} \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \\ p = p_{ном} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \\ N_6 = \frac{Q \cdot p}{1000 \cdot \eta_6}; \\ M_c = \frac{Q \cdot p}{\omega_r \cdot \eta_6}; \\ P_v = \frac{N_v}{\eta_{дв} \cdot \eta_{пр}}. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 8 представлена структурная схема модели вентиляторной нагрузки.

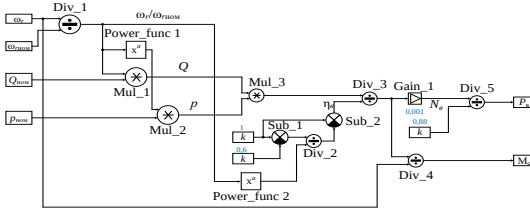


Рис. 8 – Структурная схема модели вентиляторной нагрузки

На выходе модели формируются сигналы момента сопротивления M_c и потребляемой мощности мотор-вентиляторной установки P_v с приводным асинхронным электродвигателем, которая представлена на рис. 9.

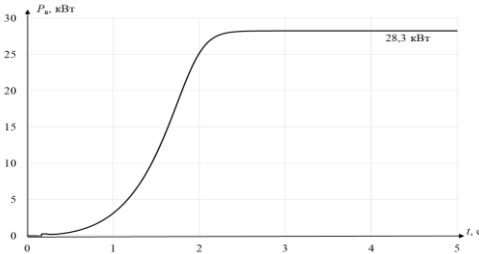


Рис. 9 – Кривая потребляемой мощности мотор-вентиляторной установки

На вход модели поступают сигналы номинальной частоты вращения ротора $\omega_{r,ном}$ и текущего значения частоты вращения ротора ω_r асинхронного электродвигателя, номинальной величины подачи вентилятора $Q_{ном}$ и номинального статического давления $p_{ном}$.

Из анализа рис. 9 следует, что мотор-вентиляторная установка с приводным асинхронным электродвигателем мощностью 55 кВт в номинальном режиме работы потребляет мощность $P_v = 28,3$ кВт.

Для проверки полученного результата проведен расчет требуемой мощности приводного двигателя для номинальной работы мотор-вентиляторной установки.

$$P_{дв} = \frac{K_z \cdot Q_{ном} \cdot p_{ном}}{1000 \cdot \eta_v \cdot \eta_{пр}}, \quad (4)$$

где K_z – коэффициент запаса, отн. ед. Для вентиляторов мощностью более 5 кВт принимается в диапазоне от 1,1 до 1,15.

$$P_{дв} = \frac{1,1 \cdot 4,4167 \cdot 3360}{1000 \cdot 0,6 \cdot 0,92} = 29,3 \text{ кВт}$$

Из анализа выполненного моделирования и поверочного расчета следует, что в существующих системах вентиляции приводной асинхронный электродвигатель выбирают практически в два раза большей мощности, чем требуется для работы вентиляторного агрегата. КПД приводного электродвигателя, работающего при мощности 28,3 кВт, составляет 60 %. Согласно этому, КПД мотор-вентиляторной установки составит

$$\eta_{\text{мв}} = \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{дв}} = 0,6 \cdot 0,92 \cdot 0,61 = 0,337$$

где $\eta_{\text{в}}$ – КПД вентилятора; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи, значение которого равно 0,92; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД приводного электродвигателя.

Поскольку одной из причин завышения мощности приводного асинхронного электродвигателя являются несимметрия питающего напряжения и большие колебания тока статора при пуске и в переходных режимах работы, для улучшения качества питающего асинхронные электродвигатели напряжения, оптимизации энергетических показателей и повышения надежности предлагается использовать системы индивидуального питания с возможностью управления асинхронным электродвигателем, что позволит применять менее мощные асинхронные машины в качестве приводов мотор-вентиляторных установок.

В третьей главе описан процесс синтеза модального регулятора, представлена система мотор-вентиляторной установки с модальным управлением и приведена упрощенная схема практического применения модальной системы управления в цепях вспомогательного электропривода электровоза.

Для повышения энергетической эффективности, оптимизации энергетических показателей работы асинхронных электродвигателей и повышения качества питающего напряжения в работе предлагается использовать модальную систему управления асинхронным двигателем.

Система модального управления представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования (САР), описываемую стандартной системой уравнений динамики САР (4) и основывается на применении теории пространства состояний с использованием принципов модального регулирования.

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX \end{cases}, \quad (5)$$

где $\dot{X}$ – производная переменных пространства состояний; A – матрица коэффициентов состояния объекта; B – матрица коэффициентов управления; C – матрицы коэффициентов выхода по состоянию системы.

Работа системы основана на обеспечении заданного распределения корней λ_n характеристического уравнения системы, то есть каждая составляющая свободного движения системы соответствует отдельному корню λ_n или паре комплексно-сопряженных корней, которые зависят от коэффициентов характеристического уравнения системы. Согласно этому суть модального управления заключается в целенаправленном изменении этих коэффициентов с помощью безынерционных обратных связей.

Поскольку объектом управления является асинхронный электродвигатель, имеющий в своей структуре внутренние перекрестные связи, то для применения модального управления необходимо знать его текущее состояние. Под состоянием системы понимают минимальное количество значений переменных величин системы X , однозначно определяющих положение (состояние) системы в

любой момент времени. Для этого асинхронный двигатель описан в соответствии с системой дифференциальных уравнений (5) в пространстве состояний, структурная схема которого (рис. 10) представляет собой конфигурацию из трех основных матриц: матрицы коэффициентов состояния A , матрицы коэффициентов управления B и матрицы коэффициентов выхода по состоянию системы C .

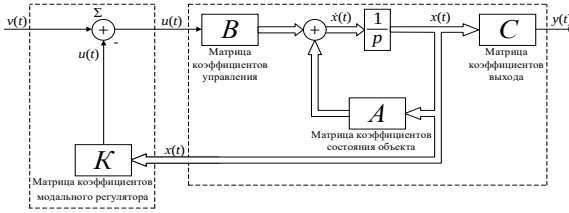


Рис. 10 – Структурная схема САР с модальным регулятором

В математическую основу собственных матриц коэффициентов состояния системы A и коэффициентов управления B асинхронного двигателя положена система уравнений (1) приведенная к матричной форме

$$A = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{K_r}{L_{\text{эвб}} T_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_s} & -\frac{K_r z_p}{L_{\text{эвб}}} \omega_r & -\frac{K_r z_p}{L_{\text{эвб}}} \psi_r \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{3z_p K_r}{2J} \psi_r & \frac{3z_p K_r}{2J} i_{sq} & 0 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} \frac{K_{\text{инв}}}{L_{\text{эвб}}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{\text{инв}}}{L_{\text{эвб}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Поскольку в модели электродвигателя управление осуществляется по двум каналам: по каналу потокосцепления ротора ψ_r и каналу частоты вращения ротора ω_r , то синтез системы управления выполняется относительно каждого контура управления на базе одноканальной структуры модального управления координатами состояний. При таком построении САР обеспечиваются заданные параметры качества регулирования в динамических режимах работы.

Для составления матриц коэффициентов состояний объекта A и управления B каждого канала управления асинхронным двигателем необходимо разделить матрицы из уравнения (5) соответственно на два канала управления.

Для канала управления потокосцеплением ротора ψ_r :

$$A_{\psi_r} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_s} & \frac{K_r}{T_r L_{\text{эвб}}} \\ \frac{L_m}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{vmatrix} \quad B_{\psi_r} = \begin{vmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{K_{\text{инв}}}{L_{\text{эвб}}} \\ 0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

Для канала управления частотой вращения ротора ω_r :

$$A_{\omega_r} = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{24} \\ a_{42} & a_{44} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_3} & -\frac{K_r z_p}{L_{\text{ЭКВ}}} \cdot \psi_r \\ \frac{3z_p K_r}{2J} \cdot \psi_r & 0 \end{vmatrix} \quad B_{\omega_r} = \begin{vmatrix} b_{22} \\ b_{32} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{K_{\text{ИНВ}}}{L_{\text{ЭКВ}}} \\ 0 \end{vmatrix} \quad (8)$$

Согласно полученным при моделировании вентиляторной нагрузки данным, мотор-вентиляторная установка потребляет мощность 28,3 кВт, поэтому для синтеза модального регулятора выбран асинхронный электродвигатель серии 4А180М4У3 мощностью 30 кВт, моделирование работы которого выполнялось на основе уточненной модели асинхронного электродвигателя.

Синтез модельного регулятора состоит из нескольких этапов. На первой операции определяется характеристический полином исходной системы. Для этого рассчитываются численные значения, входящие в матрицу A и B каждого канала управления.

Далее определяются корни матрицы A каждого канала управления. Поскольку асинхронный двигатель описывается системой уравнений n -го порядка, то характеристические полиномы каждого канала управления исходной системы будут иметь такой же порядок

$$d(p) = p^n - d_{n-1}p^{n-1} + \dots + d_1p + d_0, \quad (9)$$

Следующим шагом оценивается управляемость исходного объекта. Согласно утверждению Р. Калмана, объект управления – асинхронный электродвигатель, является полностью управляемым, если ранг матрицы управляемости U , равен порядку объекта управления n . Исходя из этого составляем матрицу управляемости исходного объекта и определяем ее ранг.

$$U = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad \text{rank } U = n, \quad (10)$$

Выполнив условие управляемости, составляются матрицы объекта A и управления B в каноническом (нормальном) базисе. Из полученных значений корней характеристического уравнения каждого канала управления составляются матрицы канонического вида, в последнюю строку которой записываются корни в обратном порядке и с противоположными знаками.

$$A_k = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -d_0 & -d_1 \end{vmatrix} \quad B_k = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (11)$$

Далее составляются матрицы управляемости в каноническом виде, и обратная матрица управляемости исходной не замкнутой системы:

$$U_k = \begin{bmatrix} B_k & A_k B_k & A_k^2 B_k & \dots & A_k^{n-1} B_k \end{bmatrix} \quad U_i = U^{-1}. \quad (12)$$

В соответствии с полученными значениями матриц управляемости в обычном и каноническом виде рассчитывается матрица преобразования:

$$P = U_k \cdot U^{-1}. \quad (13)$$

Желаемый характеристический полином выбирается из следующего равенства:

$$D(\lambda) = \lambda^n + A_{n-1}\Omega\lambda^{n-1} + \dots + A_1\Omega^{n-1}\lambda + \Omega^n. \quad (14)$$

В САР характер переходных процессов определяется значениями коэффициентов желаемого характеристического полинома. Структура САР с обратной связью по координатам состояния позволяет задавать необходимые значения среднегеометрического корня Ω , который определяет время переходного процесса и коэффициенты формы кривой $A_{n-1} - A_1$, тем самым обеспечивая заранее заданные показатели переходного процесса.

В зависимости от требуемых показателей качества регулирования и порядка объекта управления выбирается требуемый (желаемый) стандартный характеристический полином и соответствующий ему график переходного процесса. В качестве желаемых полиномов замкнутой САР могут использоваться различные стандартные характеристические полиномы 1 – 8 порядка. Для синтеза в модальном регуляторе каждого канала управления используются стандартные полиномы Баттерворта и биномиальные полиномы Ньютона соответствующего порядка. Для канала управления частотой вращения ротора ω_r выбран биномиальный полином Ньютона второго порядка, а для канала управления токосоцеплением ротора ψ_r принят полином Баттерворта также второго порядка.

Выбрав желаемый характеристические полиномы, необходимо определить значение среднегеометрического корня, от которого зависит время переходного процесса.

$$\Omega = \frac{t_{\text{пн}}^*}{t_{\text{пн}}}, \quad (15)$$

где $t_{\text{пн}}^*$ – время переходного процесса желаемой передаточной функции, $t_{\text{пн}}$ – требуемое время переходного процесса.

Под временем переходного процесса желаемой передаточной функции $t_{\text{пн}}^*$ понимается момент времени, когда переходная кривая попадает в область Δ , находящуюся в пределах 0,1 – 0,5 от единичного установившегося значения $h(t)$.

Желаемое время переходного процесса $t_{\text{пн}}$ подбирается в зависимости от требуемых показателей качества переходного процесса. Для синтеза модального регулятора желаемое время переходного процесса $t_{\text{пн}}$ было принято равным 1 и 4 с.

Формирование в каноническом виде вектора параметрических отклонений (невязок) k коэффициентов обратных связей a_i желаемого характеристического полинома и характеристического полинома исходной системы d_i для каждого канала управления выполняется согласно уравнению:

$$k = [a_0 - d_0 \quad a_1 - d_1 \quad \dots \quad a_{n-1} - d_{n-1}] \quad (16)$$

После выполнения всех операций для каждого канала управления определяются коэффициенты обратных связи модального регулятора K , от значений которых зависят качественные показатели переходных процессов:

$$K = k \cdot P, \quad (17)$$

Выполнив все этапы синтеза модального регулятора для каждого канала управления были получены следующие значения коэффициентов модального регулятора, которые устанавливаются в соответствующие усилители $K_1 - K_4$:

Для канала управления потокосцеплением ротора ψ_r : $K_1 = 0,00076$; $K_2 = 4,5093$.

Для канала управления частотой вращения ротора ω_r : $K_3 = 0,333$; $K_4 = 126,23$.

На рис. 11 представлено графическое расположение корней исходной разомкнутой системы и корней системы с модальным управлением.

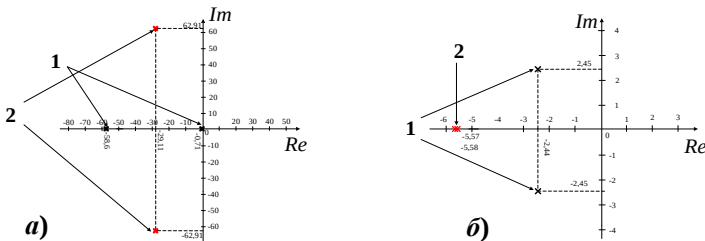


Рис. 11 – Графическое расположение корней разомкнутой системы (а) и системы с модальным управлением (б):

1 – корни канала потокосцепления ротора; 2 – корни канала частоты вращения ротора

Из рисунка следует, что все корни системы лежат левее мнимой оси Im и имеют отрицательную вещественную часть. Согласно корневому критерию устойчивости, система является устойчивой. Однако, при применении модальной системы управления корни характеристического уравнения системы изменили свое положение на графике. Так, у корней уравнения канала частоты вращения ротора ω_r , отсутствует мнимая часть, что позволяет устранить перерегулирование, а в канале потокосцепления ротора ψ_r , наоборот, появилась мнимая

часть, добавляющая перерегулирование, которое способствует уменьшению времени протекания переходных процессов в системе.

На рис. 12 представлена структурная схема мотор-вентиляторной установки с модальным регулятором.

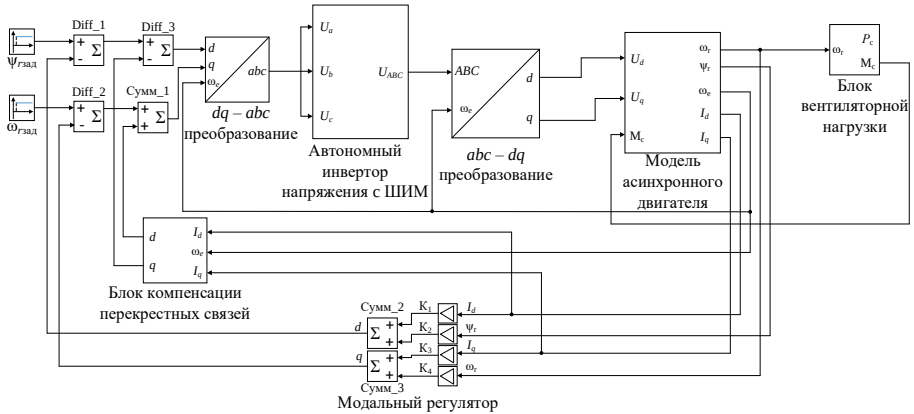


Рис. 12 – Структурная схема мотор-вентиляторной установки с модальным регулятором

Входными сигналами в системе являются заданные значения потокосцепления ротора $\psi_{rзд}$ и частоты вращения ротора $\omega_{rзд}$, численные значения которых соответственно равны 0,89 Вб и 1450 об/мин.

Напряжения U_d и U_q поступает на вход модели асинхронного двигателя. Также на вход модели поступает сигнал с выхода блока вентиляторной нагрузки, моделирующий момент сопротивления M_c на валу асинхронного двигателя.

Поскольку модель асинхронного электродвигателя имеет перекрестные связи, которые не позволяют модальному регулятору взаимодействовать с каждым каналом управления отдельно, поэтому для исключения этого влияния в структурную схему модели мотор-вентиляторной установки добавлен блок компенсации перекрёстных связей (БКПС).

На выходе модели асинхронного электродвигателя формируются сигналы потокосцепления ротора ψ_r , частоты вращения вала ротора ω_r , угловой скорости вращения магнитного поля ротора ω_e , составляющие тока статора I_d и I_q .

Модальный регулятор в модели представлен двумя сумматорами «Сумм_2», «Сумм_3» и усилителями $K_1 - K_4$, в которых заданы коэффициенты, полученные при его синтезе. Усилители K_1 и K_2 , сумматор «Сумм_2» и соответствующий им вычитатель «Diff_1» образуют цепь обратной связи модального регулятора по каналу потокосцепления ротора ψ_r . Аналогично обратная связь по частоте вращения ротора выполняется с помощью усилителей K_3 и K_4 , сумматора «Сумм_3» и вычитателя «Diff_2».

Результаты работы модели мотор-вентиляторной установки с модальным регулятором представлены на рис. 13.

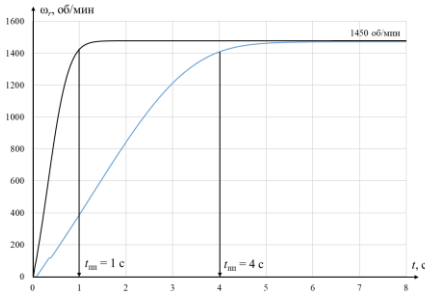


Рис 13 – График частоты оборотов ротора мотор-вентиляторной установки с модальным регулятором

Из рис. 13 следует, что время переходного процесса совпадает по величине с уменьшенным и увлеченным значением, выбранном при синтезе модального регулятора $t_{пп}$. Установившееся значение частоты вращения ротора асинхронного двигателя с модальным регулятором 1450 об/мин совпадает заданным значением $\omega_{гзад}$.

Из характера кривых следует, что при необходимости изменения качественных показателей работы асинхронного электродвигателя, а именно увеличение и уменьшение времени переходного процесса, выбранного при синтезе, система управления без перерегулирования реализует номинальную частоту вращения двигателя.

Результатом поверочного расчета подачи воздуха $Q_{ном}$ при пониженной мощности асинхронного электродвигателя (30 кВт), установлено, что выбранный электродвигатель мощностью 30 кВт, с модальной системой управления реализует соответствующую руководству по эксплуатации номинальную величину подачи воздуха. Согласно этому предлагаемый в качестве приводного электродвигателя мотор-вентиляторной установки, способен реализовать необходимую производительность Q и давление воздуха p , а также предлагаемый приводной асинхронный электродвигатель, мощностью 30 кВт работает при той же мощности, равной 29,6 кВт, что соответствует его номинальной нагрузке. КПД мотор-вентиляторной установки составит

$$\eta_{МВ} = \eta_{в} \cdot \eta_{п} \cdot \eta_{дв} = 0,6 \cdot 0,92 \cdot 0,902 = 0,498$$

Согласно выполненному расчету, применение модальной системы управления приводным двигателем мощностью 30 кВт и энергоэффективных систем питания позволяет увеличить КПД мотор-вентиляторной установки на 16,1 %.

В качестве объекта для практического внедрения модального управления вспомогательным электроприводом электроподвижного состава переменного тока был принят электровоз 2(3)ЭС5К «Ермак». На рис. 14 представлена упрощенная схема цепей вспомогательных машин электровоза с внедренной системой модального управления.

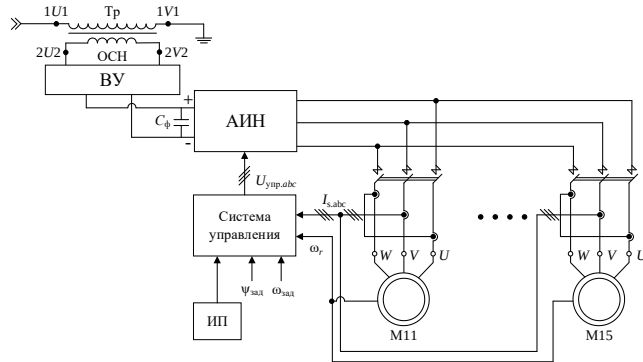


Рис. 14 – Упрощенная схема цепей вспомогательных машин секции электровоза с модальным управлением

Тяговый трансформатор электровоза ТР формирует на обмотке собственных нужд (ОСН) однофазное напряжение, которое поступает на вход выпрямительной установки (ВУ). На ее выходе формируется однофазное постоянное напряжение U_d . Для уменьшения пульсаций напряжения U_d в ее структуру включен сглаживающий емкостной фильтр C_ϕ .

Выпрямленное напряжение U_d поступает на вход блока автономного-инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией (АИН с ШИМ), на выходе которого формируется трехфазное переменное напряжение U_{abc} .

Для регулирования этого напряжения в систему включены блоки управления «Система управления», работа которых основана на модальном управлении.

На вход блока «Система управления» поступают заданные значения сигналов потокосцепления ротора $\psi_{зад}$ и частоты вращения ротора $\omega_{зад}$, сигналы токов статора I_{sabc} и действующее значение частоты вращения ротора ω_r . На выходе блока формируются сигналы напряжения $U_{упр,abc}$, которые регулируют открытие и закрытие IGBT-транзисторов в АИН. Питание система управления получает от индивидуального источника питания ИП. Каждый асинхронный электродвигатель получает питание от индивидуального АИН, что позволяет управлять всеми машинами независимо друг от друга.

В четвертой главе оценена энергетическая эффективность применения модального регулятора.

Для определения энергетической эффективности применения модального управления сравнивались кривые тока статора I_s при разных значениях времени переходного процесса, выбранного при синтезе модальной системы управления, а также потребляемой мощности моделей асинхронного электродвигателя мощностью 55 кВт с питанием от пускового двигателя и с применением модального регулятора.

На рис. 15 представлены графики кривых тока статора, полученных с помощью математических моделей мотор-вентиляторной установки с применением модального регулятора 1, 3 и пускового двигателя 2.

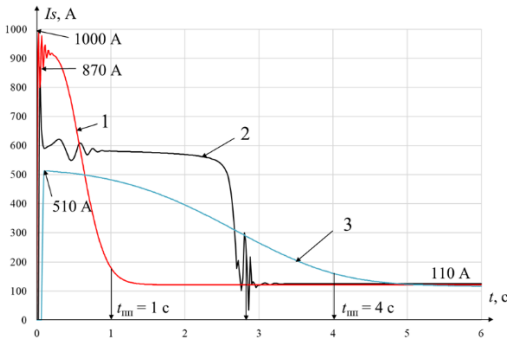


Рис. 15 – Кривые тока статора математических моделей мотор-вентиляторной установки:

1, 3 – кривая тока статора мотор-вентиляторной установки мощностью 55 кВт с модальным регулятором и временем переходного процесса равным 1 с. и 4 с. соответственно; 2 – кривая тока статора мотор-вентиляторной установки мощностью 55 кВт с пусковым двигателем

вентиляторной установки достигло номинального значения 110 А. Таким образом применение предлагаемой системы управления приводит к уменьшению пусковых токов и пульсаций в динамических режимах работы асинхронного электродвигателя.

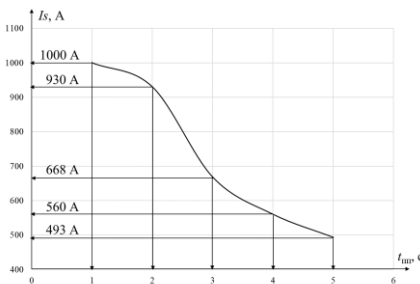


Рис. 16 – Зависимость пускового тока статора от времени переходного процесса

По характеру кривых на графике видно, что применение модального регулятора позволяет, задавая время переходного процесса, изменять величину пусковых токов статора.

Зависимость пускового тока статора I_s от времени переходного процесса t_{np} представлена на рис. 16, из анализа которого следует, что при изменении времени переходного процесса в диапазоне от 1 с до 5 с величина пускового тока статора I_s принимает значения от 1000 А до 493 А. Установившееся значение тока статора I_s во всех моделях мотор-вен-

Для определения экономической эффективности модального управления использованы данные о времени работы мотор-вентиляторной установки при поездке по участку «Ин – Хабаровск 2» с общим временем работы мотор-вентиляторной установки равным 9 ч, которая состоялась 8 августа 2024 г. Мотор-вентиляторная установка с приводным электродвигателем мощностью

55 кВт, получаемого питание от пускового двигателя, потребляет 64,386 кВт·ч электроэнергии. Поскольку мотор-вентиляторная установка работает в течении

всей поездки, то потребляемая ею мощность без модального регулятора составит 579,47 кВт. Расчетom установлено, что мощность потребляемая мотор-вентиляторной установкой с применением модальной системы управления при времени переходного процесса $t_{\text{пн}} = 1$ с, составляет 59,186 кВт·ч электроэнергии, а при $t_{\text{пн}} = 4$ с полная мощность составила 44,672 кВт·ч. Согласно этому потребленная мощность мотор-вентиляторной установкой за поездку с применением модальной системы управления составит 532,674 кВт и 402,048 кВт соответственно.

Исходя из выполненного расчета, мотор-вентиляторная установка с модальной системой управления потребляет на 8,08 % меньше электроэнергии при времени переходного процесса равного 1 с и на 30,62 % меньше при времени переходного процесса равного 4 с. В соответствии с этим, применение модального регулятора в системе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока является энергетически эффективным по сравнению с используемой в настоящее время схемой питания.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обосновано применение асинхронного электродвигателя меньшей мощности в качестве приводного двигателя вспомогательных машин на электроподвижном составе. Выполненный расчет показал, что для номинального режима работы мотор-вентиляторной установки в качестве приводного электродвигателя может быть применен электродвигатель мощностью 30 кВт. Его применение позволит уменьшить потребляемую электроэнергию и увеличить КПД установки.

2. Разработана обобщенная математическая модель асинхронного электродвигателя с динамической индуктивностью, вентиляторной нагрузкой и модальным регулятором.

3. Разработана система модального управления вспомогательным электроприводом электроподвижного состава переменного тока, позволяющая изменять время переходных процессов во время пуска асинхронных электродвигателей, уменьшить величину пусковых токов и пульсаций в переходных режимах работы асинхронного электродвигателя.

4. Выполнен расчет энергетической и экономической эффективности от внедрения системы модального управления в схему питания вспомогательных машин электровоза 2(3)ЭС5К. Согласно расчетам, применение системы модального управления при увеличении времени переходного процесса уменьшает величину пускового тока и снижает потребляемую электроэнергию на 30,62 %.

5. Полученные результаты могут являться методической базой для синтеза систем управления асинхронными электродвигателями, работающими в режиме «старт-стоп».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИС- СЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации (по специальности):

1. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К., **Стародубцев Д. А.** Оптимальное управление асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 1. С. 7
2. Шухарев С. А., **Стародубцев Д. А.** Перспективы развития систем энергосбережения вспомогательных машин на электроподвижном составе // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона, 2023. № 1 (34). С. 79–83.
3. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К., **Стародубцев Д. А.** Синтез цифрового регулятора одноконтурной системы автоматического регулирования // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона, 2023. № 2 (35). С. 69–74.
4. Кулинич Ю. М., **Стародубцев Д. А.** Модальное управление асинхронным двигателем в пространстве состояний // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона, 2023. № 3(36). С. 84–93.
5. Моделирование оптимального управления асинхронным приводом / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев, Д.А. **Стародубцев** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 83–93.
6. Повышение качества регулирования асинхронных двигателей с модальным управлением / Ю.М. Кулинич, Д.А. **Стародубцев** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 124–134.
7. Кулинич Ю.М., **Стародубцев Д.А.** Применение метода модального управления в асинхронном приводе // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, №4. С. 348–357.

Патент:

8. Пат. 2819147 Российская Федерация, МКП H02P 21/06 (2006.01). Устройство управления асинхронным двигателем / Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Духовников В.К., **Стародубцев Д.А.**; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – №2023100336; заявл. 10.01.2023 ; опубл. 14.05.2024, Бюл. №14.