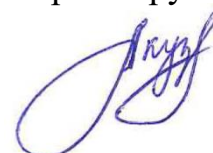


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



Кузнецов Алексей Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА
ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6
В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Фролов Николай Олегович

Екатеринбург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИХ СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ.....	10
1.1 Анализ эксплуатируемого парка электроподвижного состава постоянного тока и анализ статистических данных их эксплуатационной надежности	10
1.2 Переходные процессы в электрических цепях электровозов постоянного тока.....	22
1.3 Математическое описание переходных токовых процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока	27
1.4 Выводы по главе 1.....	35
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ	36
2.1 Построение имитационной модели тягового электродвигателя постоянного тока.....	36
2.2 Сведения по тепловым испытаниям тяговых электродвигателей на стенде взаимной нагрузки	44
2.3 Результаты моделирования схемы взаимного нагружения	46
2.4 Построение имитационной модели схемы последовательного возбуждения электровоза 2ЭС6	48
2.5 Выводы по главе 2.....	61
3 УЛУЧШЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОВАЗА 2ЭС6 ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ	63
3.1 Построение имитационной модели схемы независимого возбуждения электровоза 2ЭС6	63

3.2 Совершенствование элементов преобразователя собственных нужд	75
3.3 Анализ результатов по повышению эффективности регулирования тока в силовой цепи электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы за счет увеличения напряжения возбуждения тяговых двигателей	79
3.4 Выводы по главе 3.....	83
4 ФИЛЬТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	85
4.1 Построение математической модели пассивного фильтра низких частот ..	85
4.2 Построение математической модели активного фильтра низких частот	96
4.3 Анализ результатов по повышению эффективности регулирования тока в силовой цепи электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы за счет активной фильтрации сетевого напряжения	103
4.4 Выводы по главе 4.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одной из сфер развития ОАО «РЖД» является развитие локомотивного хозяйства. Задачами развития этого направления, изложенными в Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года, являются:

– рост объемов перевозок на 40 – 60 %, в том числе увеличение веса грузовых поездов до 14200 т, улучшение качественных показателей грузовых электровозов;

– достижение экономии эксплуатационных расходов, в том числе за счет повышения надежности и эффективности локомотивов.

Достижение вышеприведенных задач подразумевает эксплуатацию локомотивов в предельных режимах их работы. Увеличение веса грузовых поездов требует развития локомотивами достаточной мощности для обеспечения графика движения поездов, что без увеличения напряжения в контактной сети реализуется за счет токовых перегрузок в силовых цепях локомотива. Данный фактор приводит к снижению надежности эксплуатации подвижного состава.

Преодоление повышенных уклонов профиля пути в процессе движения подвижного состава также являются причиной токовых перегрузок. Так, максимальный уклон на перегоне Сабик – Сарга Свердловской железной дороги составляет 13 ‰. Данный фактор относится к особенностям рельефа местности, который ухудшает условия эксплуатации локомотивов.

Помимо стационарных токовых перегрузок вследствие увеличения веса поезда локомотивы подвержены неустановившимся режимам работы из-за скачкообразного изменения напряжения в контактной сети. Подобные режимы эксплуатации приводят к изменению электрической, магнитной, механической энергии тяговых электродвигателей. Вследствие того, что постоянная времени электрических и магнитных переходных процессов отличается от постоянной времени механических переходных процессов на несколько порядков, то дан-

ная разница приводит к энергетическим дисбалансам в тяговых электродвигателях, вызывающим значительные броски токов двигателей относительно их предельного значения. Поэтому для снижения токовых бросков необходимо в первую очередь ограничивать электрические и магнитные переходные процессы в тяговых электродвигателях.

Парк грузовых электровозов ОАО «РЖД» имеет в основном коллекторный тяговый электропривод. На сегодняшний день парк грузовых электровозов обновляется локомотивами нового поколения, обеспечивающими работу коллекторных тяговых электродвигателей в режиме последовательного и независимого возбуждения. Превышение предельных значений токов тяговых электродвигателей коллекторного типа приводят к перебросу электрической дуги и дальнейшему развитию кругового огня по коллектору.

В связи с этим исследования, направленные на совершенствование токовых переходных процессов в силовой цепи электровозов постоянного тока с коллекторным тяговым электроприводом, считаются актуальной задачей, требующей детальной проработки вопроса.

Объект исследования. Силовые цепи электровоза постоянного тока с коллекторным тяговым электроприводом.

Предмет исследования. Неустановившиеся режимы работы электровоза, вызванные изменением напряжения в контактной сети.

Область исследования. Совершенствование подвижного состава.

Степень разработанности темы. Исследования в области улучшения переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока тесно связаны с математическим моделированием электропривода и анализа переходных характеристик. Значительный вклад в развитие данной области внесли следующие ученые: Н. Н. Андросов [1, 2], М. Г. Дурандин, А. М. Дядьков [3], М. З. Жиц [4], А. А. Зарифьян, В. И. Зонов, И. П. Исаев [5], А. Л. Лозановский [6, 7], А. С. Мазнев [8, 9], Д. К. Минов [10], Г.-А. М. Нафиков, О. А. Некрасов [11], Д. И. Попов, В. Д. Радченко, В. Е. Розенфельд [12],

Р. Рюденберг [13], Н. Н. Сидоров, Е. А. Третьяков, В. Д. Тулупов [14, 15], В. П. Янов [16] и др.

Исследованию в области круговых огней посвящены работы В. Д. Авилова [17, 18], В. С. Александрова, О. Б. Брона, А. С. Курбасова [19], М. Д. Находкина [20] и др.

Вопросами активной фильтрации входного напряжения занимались А. С. Анучин, И. С. Ефремов, Ю. К. Розанов [21], Н. А. Ротанов, В. Е. Скобелев, Б. С. Сергеев, П. Хоровиц, У. Хилл и др.

Тема диссертационного исследования соответствует пункту 4 паспорта научной специальности 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки): «Совершенствование подвижного состава».

Цель и задачи. Цель работы состоит в улучшении токовых переходных процессов в цепи тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы, вызванных изменением напряжения на токоприемнике.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- исследовать работу системы управления электровозов постоянного тока с тяговыми электродвигателями последовательного и независимого возбуждения в неустановившемся режиме путём математического описания токовых переходных процессов в силовых цепях;
- обосновать изменение величины напряжения в цепи обмоток возбуждения тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 и усовершенствовать элементы преобразователя собственных нужд;
- разработать схему фильтра входного напряжения электровоза, позволяющего сглаживать отклонения напряжения в контактной сети.

Научная новизна заключается в следующем:

- предложена имитационная модель тягового электропривода электровоза постоянного тока с независимым возбуждением тяговых электродвигателей, позволяющая рассчитывать броски тока в неустановившихся режимах работы.

Отличительной особенностью данной модели является питание статического преобразователя от контактной сети;

– на основе результатов моделирования токовых переходных процессов в силовых цепях тяговых двигателей электровоза 2ЭС6, вызванных изменением напряжения на токоприёмнике, обосновано увеличение напряжения каналов питания обмоток независимого возбуждения тяговых электродвигателей за счёт изменения параметров элементов преобразователя собственных нужд;

– показано, что в неустановившихся режимах работы целесообразно использовать в системе управления электровоза 2ЭС6 схему активного сетевого фильтра, снижающего влияние изменения напряжения контактной сети на токовые характеристики тяговых двигателей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– имитационная модель тягового электропривода электровоза 2ЭС6, верифицированная результатами тепловых испытаний тяговых электродвигателей, позволяет оценивать броски тока якоря и тока возбуждения в неустановившихся режимах работы, вызванных отклонениями напряжения на токоприёмнике;

– увеличение напряжения возбуждения двигателей для основного режима работы электровоза 2ЭС6 при отклонении напряжения в контактной сети не более 200 В позволило снизить максимальные значения тока якоря и тока возбуждения;

– применение активного фильтра в силовой цепи электровоза 2ЭС6 при отклонениях напряжения в контактной сети более 200 В позволило ограничить броски тока якоря и тока возбуждения тяговых двигателей до уровня предельных значений.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории электротехники, теории электрической тяги, теории автоматического управления и основы математического моделирования. При математическом моделировании силовых цепей электровоза 2ЭС6 использовалась среда *MATLAB/Simulink*. Экспериментальная часть включала в себя ис-

следования на испытательном стенде тяговых электродвигателей по схеме взаимной нагрузки с последующей обработкой экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

– имитационная модель тягового электропривода электровоза с двигателями независимого возбуждения для исследования временных токовых характеристик в неустановившихся режимах работы, вызванных изменением напряжения на токоприемнике;

– обоснование увеличения напряжения в цепи возбуждения тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 для повышения эффективности регулирования тока в силовой цепи в неустановившихся режимах работы;

– схемотехнические решения для преобразователя собственных нужд и активного сетевого фильтра с обмоткой подмагничивания для электровоза 2ЭС6, направленные на снижение бросков тока при отклонениях напряжения в контактной сети.

Степень достоверности результатов обеспечивается корректностью исходных математических положений, использованием современного программного обеспечения и подтверждается сходимостью результатов моделирования тяговых электродвигателей электровоза с результатами тепловых испытаний. Расхождение расчетных и экспериментальных характеристик в неустановившемся режиме находится в пределах 10 %.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на конференциях и семинарах: Всероссийская научная конференция «Техника и технологии наземного транспорта» (Екатеринбург, 2018); XII Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» (Самара, 2019); Всероссийская научно-техническая конференция «Транспорт Урала-2019» (Екатеринбург, 2019); XIII Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» (Самара, 2020); Всероссийская научно-техническая конференция «Транспорт Урала-2020» (Екатеринбург, 2020); XII Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и техноло-

гии обслуживания подвижного состава» (Ростов-на-Дону, 2020); IV Международная научно-практическая конференция «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (Омск, 2020).

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на расширенном заседании кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС (Екатеринбург, 2022 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе один патент на полезную модель. Пять статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК к публикации результатов диссертации, кроме того, одна – в издании *Scopus*.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, который состоит их 127 наименований, приложений. Общий объем работы составляет 123 страниц, включает 88 рисунков и 11 таблиц.

1 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИХ СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ

1.1 Анализ эксплуатируемого парка электроподвижного состава постоянного тока и анализ статистических данных их эксплуатационной надежности

Железнодорожный транспорт играет важную роль в развитии страны. На сегодняшний день доля железнодорожного транспорта в структуре грузооборота транспортной системы страны занимает 45,9 % [22]. Такой высокий показатель объясняется перевозкой промышленных и сельскохозяйственных грузов на большие расстояния с учетом регулярности движения независимо от погоды и времени года [23].

Значительный вклад в развитие железнодорожного транспорта внесли электрические двигатели. Использование этих двигателей обусловлено не только их высокой энергоэффективностью, но и лучшими экологическими показателями, в отличие от двигателей внутреннего сгорания [24]. Так, в 2019 году компанией ОАО «РЖД» было достигнуто снижение выбросов углекислого газа на 43,9 % – до 38,5 млн. т углекислого газа к уровню 1990 года при сопоставимых объемах перевозок [25].

Применение электрических двигателей на подвижном составе началось с 1879 года [26]. Первый электровоз был построен Вернером Сименсом совместно с механиком Хальске.

В настоящий момент почти все локомотивы эксплуатируются на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД». Свердловская железная дорога является одним из первых участков, на котором началось развитие железнодорожного транспорта. Она состоит из 5 регионов обслуживания (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Сравнение регионов обслуживания Свердловской железной дороги

Регион обслуживания	Год создания	Крупные станции	Эксплуатируемые локомотивы	Депо приписки
Екатеринбургский	1878	Екатеринбург-Пассажирский, Екатеринбург-Сортировочный, Богданович, Шаля, Дружинино	ВЛ10, ВЛ11, 2ЭС6, 2ЭС10	ТЧ5 (Свердловск-Сортировочный)
Пермский	1946	Кабельная, Пермь I, Пермь II, Верещагино, Лысьва, Чусовская, Соликамск, Кунгур	ВЛ11, 2ЭС6, 2ЭС10	ТЧ17 (Пермь – Сортировочный)
Тюменский	1957	Тюмень, Тобольск, Демьянка, Ишим	ВЛ10, ВЛ11, 2ЭС6, 2ЭС10	ТЧ7 (Войновка)
Сургутский	1978	Новый Уренгой, Сургут, Нижневартовск, Ноябрьск, Надым	2ТЭ10М	ТЧ18 (Сургут)
Нижнетагильский	2003	Нижний Тагил, Смычка, Гороблагодатская, Серов, Качканар, Невьянск, Алапаевск	ВЛ11, ТЭП70, 2ТЭ116	ТЧ1 (Смычка)

Строительство Свердловской железной дороги началось в 1878 году. Первоначально эксплуатировались паровозы серии О «Овечка», Э, Л «Лебедянка», СО.

С развитием дизельной тяги начали эксплуатироваться тепловозы. Широкое применение нашли такие серии тепловозов, как ТЭЗ, ТЭМ2, ТУ4, ТГК2, ТГМ4, ТУ6А, ТГМ6, ТУ7, ТЭМ18ДМ, ТЭП70

После электрификации Екатеринбургского региона на участке начали эксплуатироваться электровозы ВЛ10 и ВЛ11. Позднее добавились электровозы 2ЭС6 и 2ЭС10. Технические характеристики представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики электровозов Екатеринбургского региона

Электровоз	$F_{к\infty}$, кН	V_{∞} , км/ч	$F_{кч}$, кН	$V_{ч}$, км/ч	$m_{л}$, т	$l_{л}$, м
ВЛ10	313,9	51,2	387,5	48,7	184	33
ВЛ11/8	332,1	51,4	399,3	48,8	184	33
2ЭС4К	440	53,5	492	51,9	192	35
2ЭС6	415,9	52,1	451,3	51	200	34
2ЭС10	538	55	570	50	200	34

Рассматриваемый в диссертационном исследовании один из наиболее тяжелых участков Сабик – Сарга относится к Екатеринбургскому региону, расчетный подъем составляет 11 ‰ ($l = 300$ м).

Весовые нормы для участка Сабик – Сарга приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Весовые нормы для участка Сабик – Сарга

Электровоз	Критическая весовая норма, т	Унифицированная весовая норма, т
ВЛ11 в/и	4000	6300
1,5ВЛ11 в/и	6000	
2ВЛ11 в/и	7800	
2ЭС6	4800	
2х2ЭС6	8000	
2ЭС10	6300	
3ЭС10	7200	

Таким образом, таблица 1.3 наглядно показывает, насколько увеличивается весовая норма при увеличении мощности электровозов.

Увеличение мощности электровозов во многом определяется увеличением мощности тяговых электродвигателей. В настоящее время электродвигатели применяются на всех магистральных электровозах.

Учитывая простоту управления коллекторным приводом, применялись начали электрические машины именно этого типа. В советский период были созданы электровозы разных поколений на базе коллекторного привода – не только электровозы постоянного тока, такие как ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15, но и даже электровозы переменного тока ВЛ60, ВЛ80, ВЛ85 ввиду несложности проектирования силового неуправляемого выпрямителя [27, 28].

Управление асинхронным приводом обеспечивается силовым преобразователем, ключи которого формируют требуемый уровень напряжения определенной частоты [29]. Почти все отечественные электровозы, имеющие асинхронный тяговый привод, оборудованы двигателем и системой управления зарубежного производства, и это отражается на стоимости как тягового электрооборудования, так и всего электровоза в целом. В соответствии с этим электро-

возы с коллекторным приводом имеют меньшую стоимость, а обслуживание отечественного тягового оборудования обходится дешевле [30]. К тому же, совершенствование силовой схемы электровоза в части регулирования возбуждения двигателей увеличивает тяговые свойства электровоза, что приводит к улучшению экономических показателей [31].

С другой стороны, асинхронный двигатель вследствие отсутствия на нем коллектора имеет меньшие размеры, а также полностью не нуждается в обслуживании одного из критических узлов тягового электродвигателя – коллектора [32]. Сравнение различных показателей коллекторного и асинхронного привода представлено в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение показателей коллекторного и асинхронного привода

Показатели	Привод	
	Коллекторный	Асинхронный
Стоимость	+	-
Реализация мощности	-	+
Стоимость обслуживания	+	-
Частота обслуживания	-	+

Вследствие того, что коллекторный и асинхронный двигатели не имеют ярко выраженных относительных преимуществ, на современных грузовых магистральных электровозах постоянного тока применяются и коллекторный (электровозы 2ЭС6, 2ЭС4К), и асинхронный приводы (электровоз 2ЭС10).

Основные функции электровоза во многом обеспечиваются безотказной работой тягового электрооборудования. Схема силовых цепей предусматривает включение таких элементов, как тяговые электродвигатели, тяговые аппараты, защитные компоненты, силовые кабели [33, 34]. Основная нагрузка сосредотачивается на тяговых электродвигателях как концентраторах высокой удельной мощности.

Тяговые электродвигатели оказываются подвергнутыми высоким электрическим, механическим, магнитным нагрузкам [35]. Поэтому такие показатели, как долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость

электродвигателей определяют в дальнейшем надежность всего тягового электрооборудования электровоза в целом [36].

В первую очередь, тип электродвигателей определяет взаимодействие элементов электрической схемы с тяговой сетью, особенность отбора мощности из контактной сети, что непосредственно отражается на концепции схемы силовой цепи [37].

На электровозах постоянного тока с коллекторным приводом тяговые электродвигатели подключаются непосредственно к контактной сети, что приводит к изменению тока якоря и тока возбуждения при любом изменении напряжения в контактной сети (рисунок 1.1).

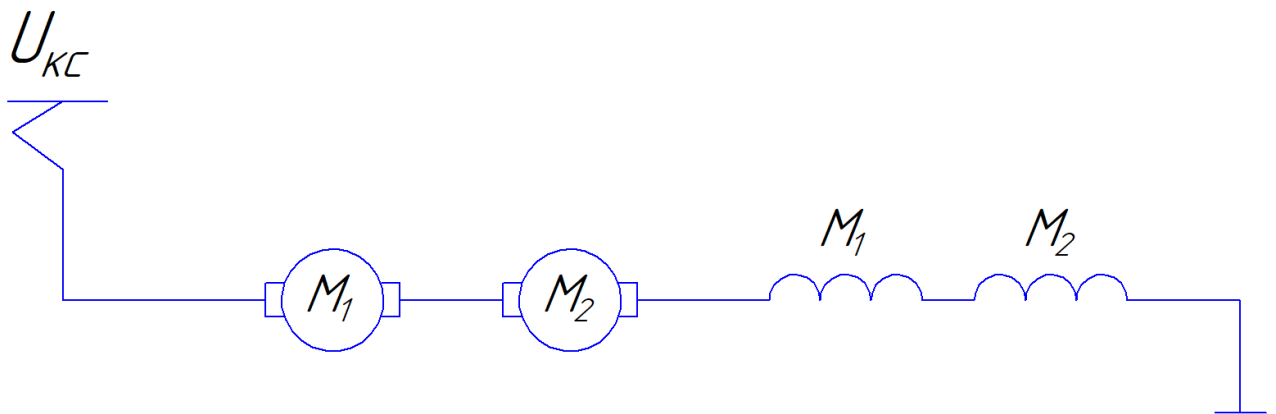


Рисунок 1.1 – Особенность подключения коллекторных тяговых электродвигателей в тяговую сеть

Так, при расшифровке регистратора параметров микропроцессорной системы управления и диагностики электровоза серии 2ЭС6 [38] получен уровень колебаний и отклонений напряжения в контактной сети, представленный на рисунке 1.2.

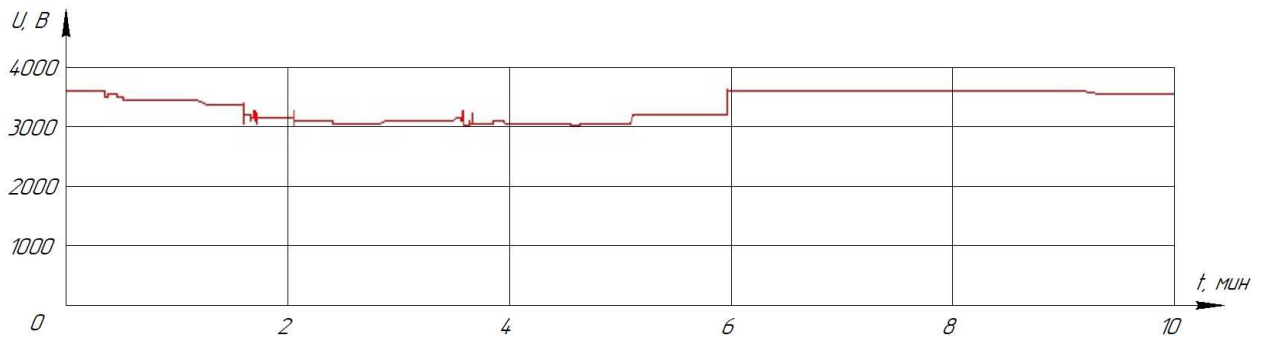


Рисунок 1.2 – Уровень колебаний и отклонений напряжения в контактной сети

На электровозах с асинхронным приводом двигатели оказываются потенциально разомкнутыми от контактной сети силовыми управляемыми ключами инвертора $UZ1$, $UZ2$. Высокочастотные коммутации этих ключей создают помехи, которые влияют на уровень питающего напряжения тяговых электродвигателей. Применяемый в силовой цепи LC -фильтр низких частот обеспечивает подавление наводящихся помех от работы инверторов.

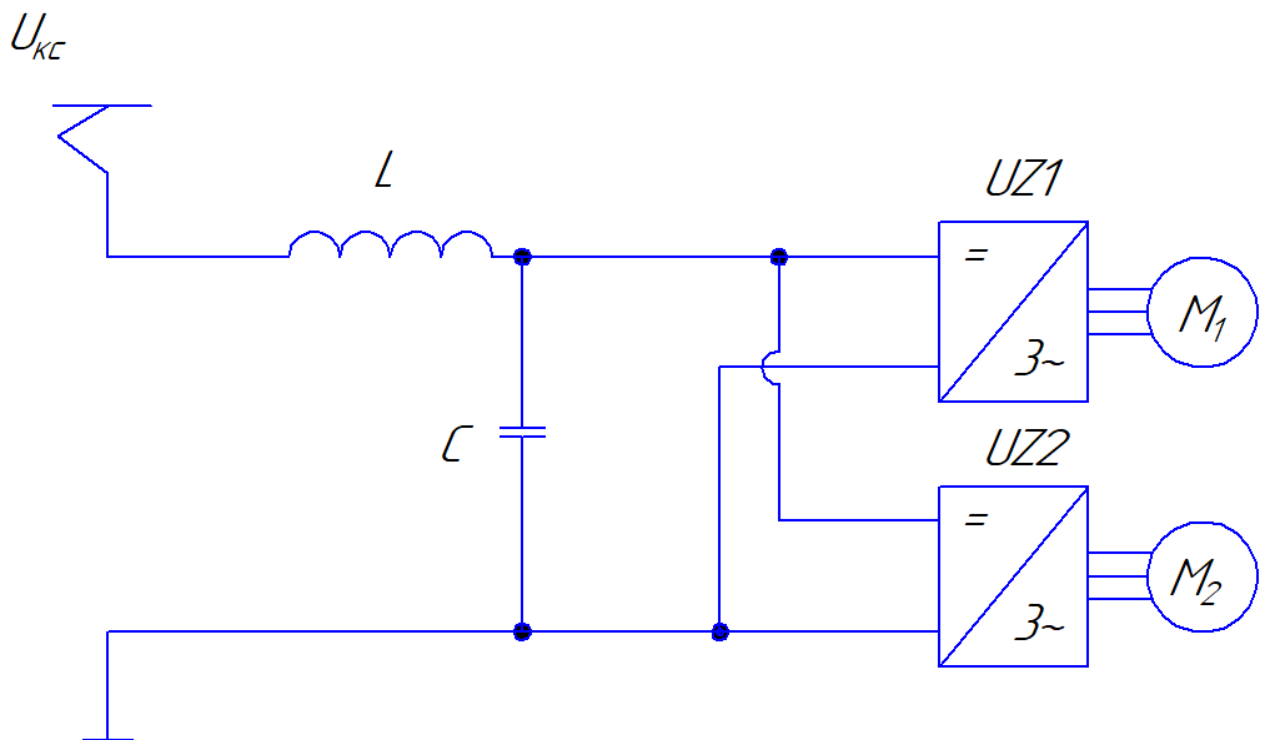


Рисунок 1.3 – Особенность подключения асинхронных тяговых электродвигателей в тяговую сеть

Тяговые электродвигатели постоянного тока по принципу возбуждения обмотки главных полюсов подразделяются на двигатели с последовательным возбуждением и независимым возбуждением, а также, как совокупность этих двух видов, на смешанное возбуждение [39]. Для объективного анализа видов возбуждения рассмотрены два принципиально различающихся между собой – последовательное и независимое возбуждение, составляющие которых в дальнейшем формируют промежуточные согласно-смешанное и встречно-смешанное возбуждение. Схемы возбуждения приведены на рисунках 1.4 – 1.5.

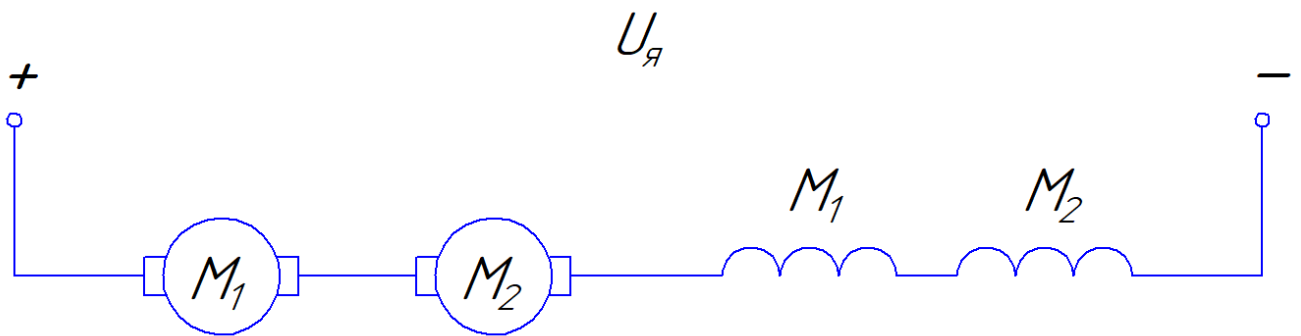


Рисунок 1.4 – Упрощенная схема возбуждения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

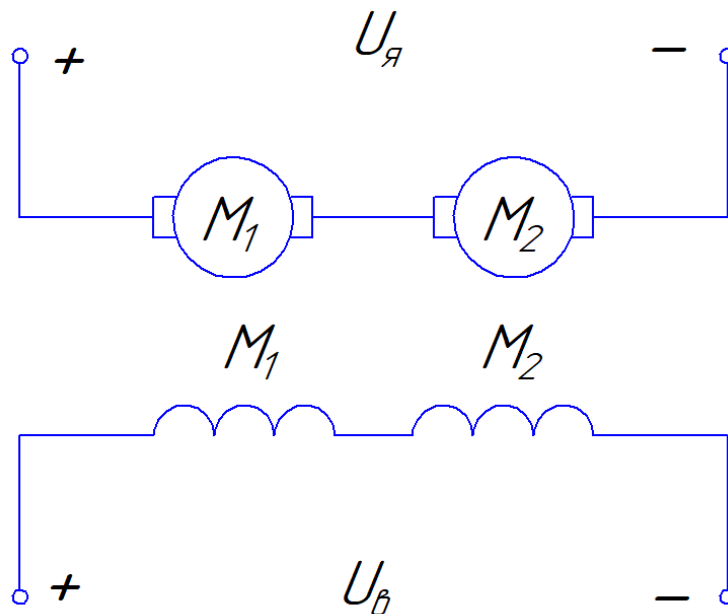


Рисунок 1.5 – Упрощенная схема возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Двигатели с последовательным и независимым возбуждением имеют свои преимущества и недостатки [40]. Сравнение их свойств представлено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Свойства тяговых двигателей с последовательным и независимым возбуждением

Свойства	ТЭД с последовательным возбуждением	ТЭД с независимым возбуждением
Регулировочные свойства	-	+
Распределение нагрузки при параллельной работе	+	-
Работа двигателя без нагрузки на валу	-	+
Качество переходных процессов	+	-
Работа в генераторном режиме	-	+

Согласно таблице 1.5, в режиме эксплуатации могут возникнуть такие ситуации, при которых в одном случае желательны свойства последовательного возбуждения, в другом – свойства независимого. Поэтому оптимальным вариантом является двигатель постоянного тока со смешанным возбуждением.

Одним из первых электровозов постоянного тока с коллекторным приводом смешанного возбуждения является электровоз 2ЭС6 [41]. Особенность смешанного возбуждения этого электровоза заключается в том, что ток возбуждения в полной мере регулируется независимым источником питания, поэтому в дальнейшем вид возбуждения электровоза 2ЭС6 принят как независимый. Силовая схема позволяет эксплуатировать этот электровоз как в режиме последовательного, так и в режиме независимого возбуждения, что приводит к улучшению процесса реализации силы тяги. Благодаря этому электровоз способен вести поезд массой 8000 тонн на участках с равнинным профилем пути (до 6 %) и поезд массой 5000 тонн на участках с горным профилем (до 10 %) [42]. Подобные условия эксплуатации неизбежно сказываются на тяговых электродвигателях.

Статистика отказов электрической части тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 за 2020 и 2021 года показала, что коллекторно-щеточный аппарат является одним из отказываемых узлов двигателя (рисунок 1.6) [43]. При этом за 2021 год пришлось больше неисправностей, чем за 2020 год.

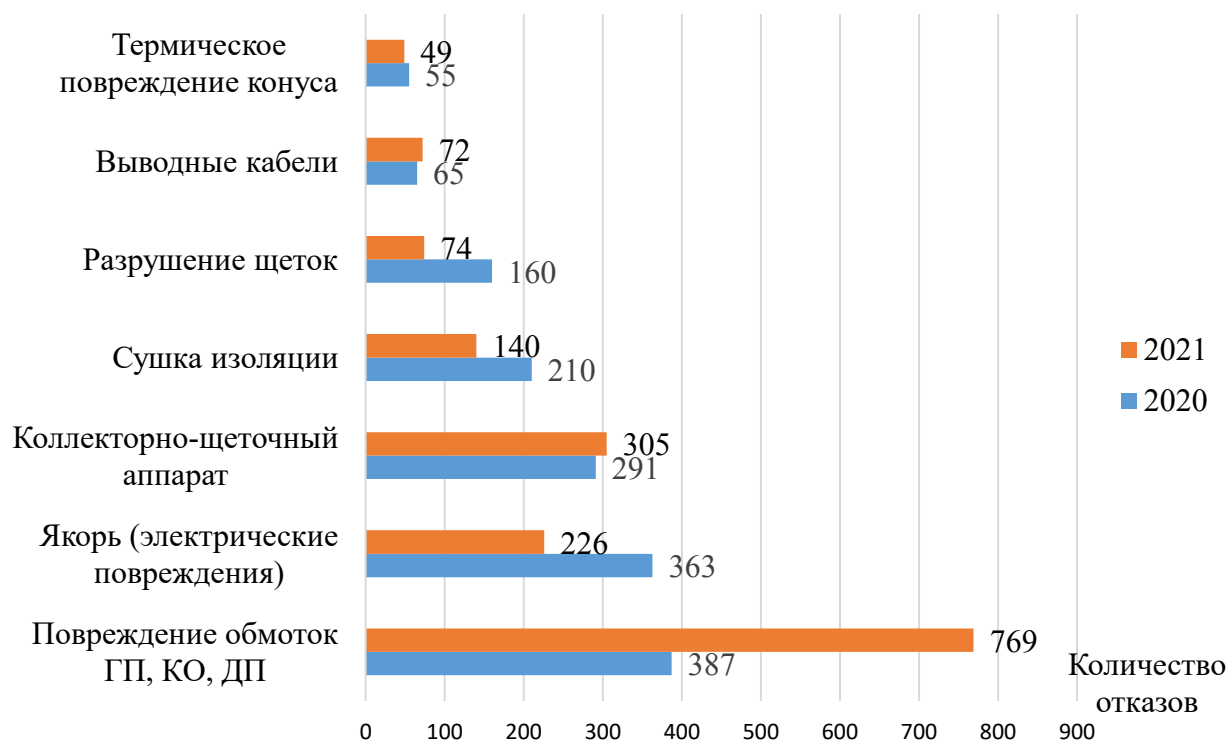


Рисунок 1.6 – Статистика отказов электрической части тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 за 2020 и 2021 года

На коллекторно-щеточный аппарат пришлось 67 неисправностей, связанных с перебросом электрической дуги по коллектору и перебросу круговых огней [43].

Большую часть причин переброса электрической дуги составляет потенциальное искрение на коллекторе, термическое повреждение коллектора и снижение сопротивления изоляции (рисунок 1.7).

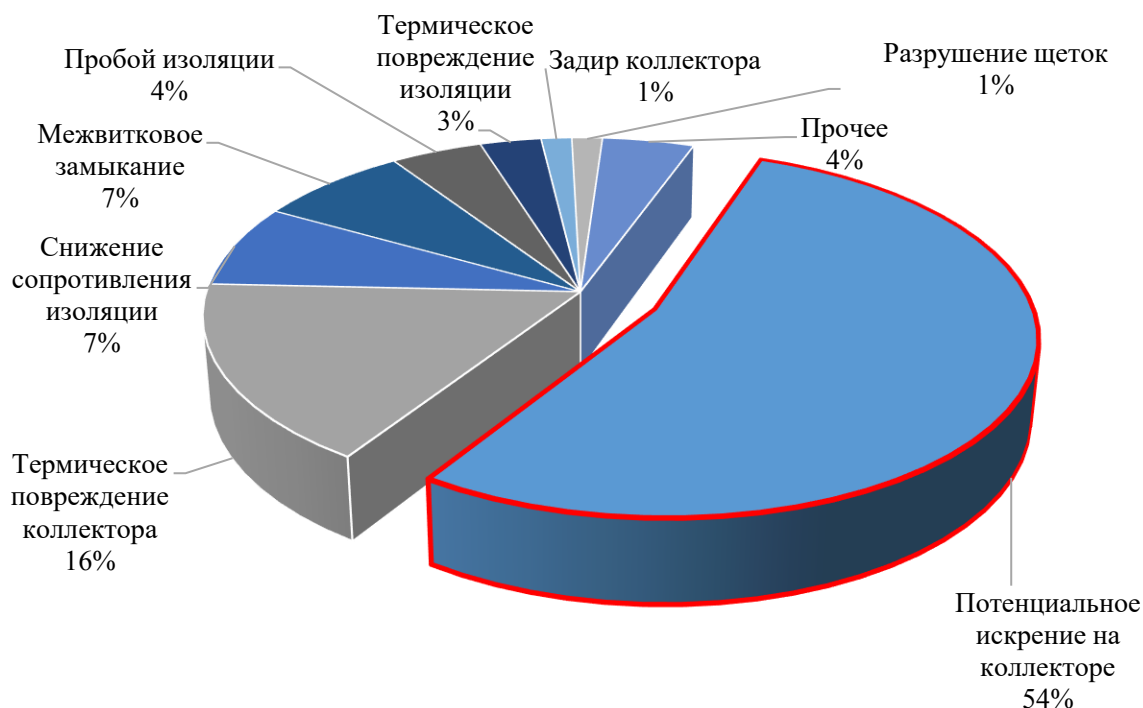


Рисунок 1.7 – Распределение количества отказов, связанных с перебросом электрической дуги по коллектору, в зависимости от причин возникновения данного переброса

Согласно рисунку 1.7, наиболее частая причина переброса электрической дуги – развитие устойчивого потенциального искрения на коллекторе (54 % случаев). Данный отказ напрямую связан с особенностью конструкции коллекторных машин.

С момента создания электрических машин постоянного тока с применением коллектора в качестве преобразователя электрической энергии встал вопрос о его потенциальной устойчивости. Александров В. С. и Брон О. Б. проводили исследования в области круговых огней [44]. Результатом их работы является заключение, что первоначальной причиной любого переброса дуги и кругового огня по коллектору является:

- искрение между пластинами коллектора (потенциальное искрение);
- искрение под краями щетки (коммутационное искрение).

При достижении межламельного напряжения более 35...45 В возникает пробой коллекторных пластин [45]. Согласно [46], учитывая незначительное падение напряжения от активного сопротивления якорной обмотки, межла-

мельные напряжения ΔU_k вдоль коллекторной дуги распределены точно так же, как и индукция в воздушном зазоре вдоль полюсной дуги τ

$$\Delta U_k(x) = (2 \cdot i_a \cdot r_{\text{пр}} + 2 \cdot B_\delta(x) \cdot V_a \cdot l_a) \cdot \frac{p}{a}, \quad (1.1)$$

где i_a – ток параллельной ветви, А;

$r_{\text{пр}}$ – сопротивление параллельной ветви, Ом;

$B_\delta(x)$ – индукция в воздушном зазоре, Тл;

V_a – скорость вращения якоря, м/с;

l_a – длина якоря, м;

p – число пар полюсов;

a – число пар параллельных ветвей.

Особенностью грузовых электровозов является их эксплуатация при повышенных токовых нагрузках [47]. В таком режиме магнитное поле якоря намагничивает зону набегающего края главного полюса в режиме работы «Двигатель» и зону сбегающего края главного полюса в режиме работы «Генератор» [48] (рисунок 1.8).

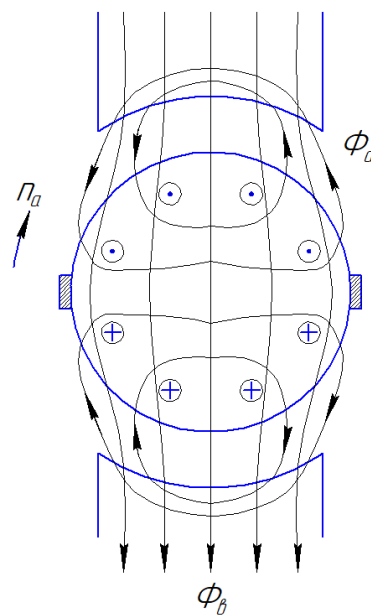


Рисунок 1.8 – Эскиз магнитной цепи машины постоянного тока для режима «Двигатель»

Это приводит к резкому увеличению наклона суммарной магнитодвижущей силы реакции якоря (МДС реакции якоря) и, соответственно, индукции в воздушном зазоре, что вызывает увеличение межламельных напряжений и повышает риск возникновения искрения.

Опыт эксплуатации электровоза 2ЭС6 показал, что существуют определённые проблемы с надёжностью компонентов силовой цепи [49].

Электровоз 2ЭС10, в отличие от 2ЭС6, имеет асинхронный привод. Тяговый электродвигатель не имеет коллектора, следовательно, надёжность данного узла по сравнению с электровозами постоянного тока значительно выше [50].

В связи с этим рассмотрена статистика отказов всего тягового электрооборудования 2ЭС10. Распределение количества отказов за 2020 год представлено на рисунке 1.9 [51].

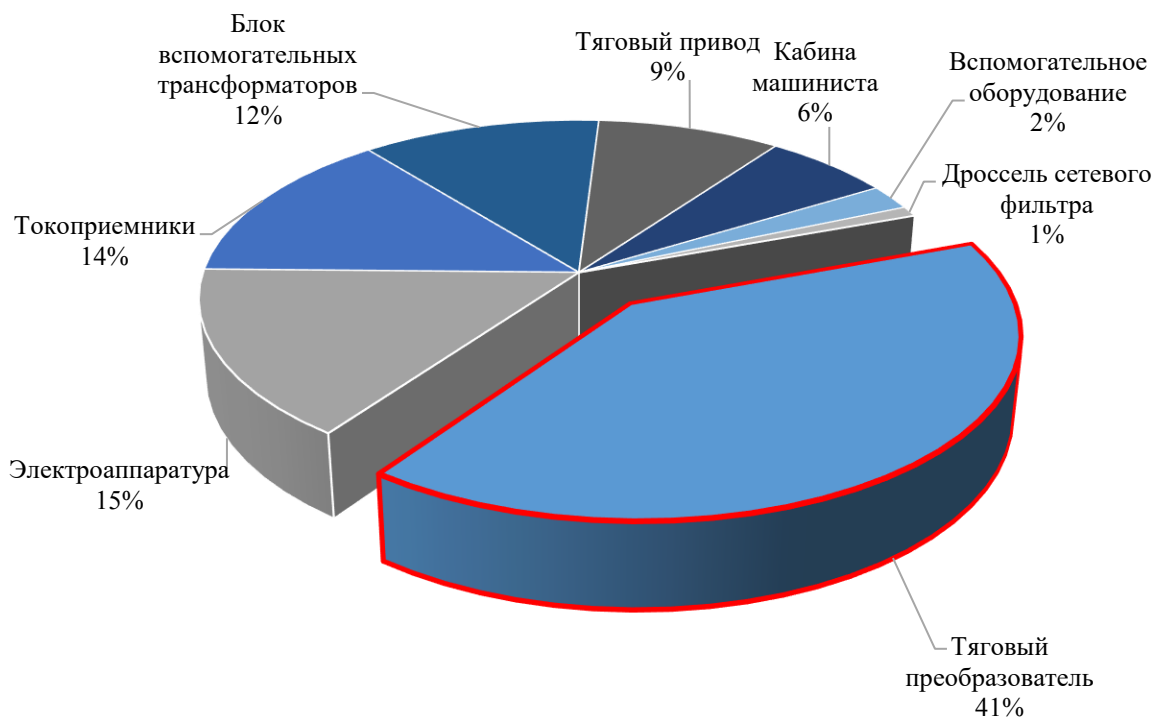


Рисунок 1.9 – Распределение количества отказов компонентов силовой цепи электровоза 2ЭС10

В соответствии с рисунком 1.8, наиболее высокий процент отказов элементов силовой цепи электровоза 2ЭС10 имеет тяговый преобразователь. Основная причина выхода из строя – повышенные броски тягового тока вслед-

ствие высокочастотных коммутаций силовых ключей. Уменьшение этих бросков снизит уровень отказов тягового преобразователя 2ЭС10.

Для изучения характеристик тягового тока в электрических цепях электровозов постоянного тока необходимо привести критерии переходной характеристики.

1.2 Переходные процессы в электрических цепях электровозов постоянного тока

Переходный процесс характеризуется изменением выходной величины при изменении входных данных и имеет динамический характер. Так, в системах автоматического управления качество регулирования оптимально определяется по поведению выходной величины $h(t)$ при подаче на один из входов системы типового тестового воздействия – единичной ступенчатой функции $1(t)$ [52]. Переходная характеристика позволяет оценивать качество регулирования не только в статических, но и в динамических режимах.

Силовая схема электровозов постоянного тока содержит как активные сопротивления, так и индуктивные и емкостные. Эти сопротивления представляют собой накопители магнитной и электрической энергии (рисунок 1.10).

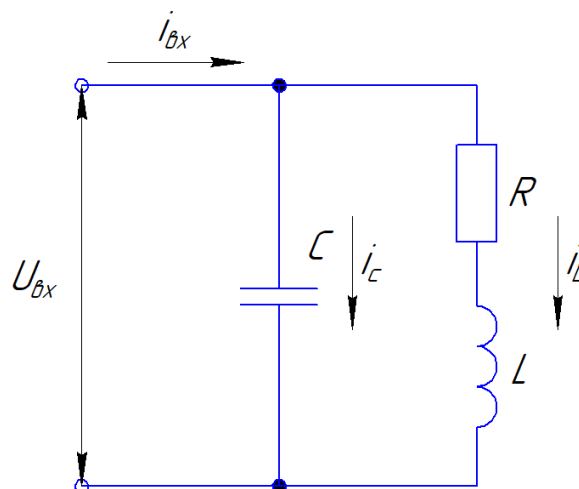


Рисунок 1.10 – Схема приведения силовой схемы электровоза постоянного тока

Наличие в силовой цепи накопителей энергии приводит к тому, что общая энергия цепи не изменяется скачкообразным образом, так как не существует источников питания с бесконечной энергией.

Вследствие этого, изменение энергетического состояния системы не может произойти мгновенно, в противном случае от источника потребовалась бы бесконечно высокая энергия. Ученые Облизина С. В. и Федоров В. Ф. в своих трудах [53] вводят понятие амплитуды составляющих по начальным условиям. При этом учитывается условие неизменности в катушке индуктивности протекаемого тока и неизменности напряжения на обкладках конденсатора при переключениях.

Теория токовых переходных процессов во многом развилась благодаря таким ученым, как В. К. Римский, И. Н. Белов, В. С. Мелентьев, В. П. Берзан, В. И. Пацюк. Предметом их исследования являются электрические цепи с распределенными и сосредоточенными параметрами. Ими были исследованы аналитические и численные подходы к анализу переходных и установившихся процессов [54]. Особое внимание заслуживает учет электрических и магнитных потерь на характер изменения свободной составляющей напряжения и тока в короткозамкнутых линиях.

И. Н. Беловым и Д. П. Андриановым была внедрена методика определения параметров электропривода в неустановившихся режимах работы [55]. Данная методика способна оценивать мгновенные изменения как электрических параметров электропривода, так и механических.

В. С. Мелентьев разработал методы определения параметров различных переходных процессов по их отдельным мгновенным значениям [56]. Классификация методов по таким признакам как принцип построения измерительной цепи, параметры измерительного процесса позволили все методы разделить на шесть групп, предлагается новый подход к синтезу таких методов.

Основным математическим методом решения дифференциальных уравнений дифференциальных звеньев принят операторный метод Лапласа, позво-

ляющий дифференциальные уравнения представлять алгебраическими уравнениями

$$L(x(t)) \rightarrow X(p), \quad (1.2)$$

$$L(dx(t)/dt) \rightarrow pX(p). \quad (1.3)$$

В. И. Иванов, В. Р. Киреев, В. Ф. Шаталов в своих работах рассматривали решение задачи определения порядка переходных функций токов и напряжений путем исследования сократимости рациональной дроби, являющейся Лапласовым изображением переходных функций [57]. Предложены рекомендации по использованию результатов их работы в решении задачи анализа электрических цепей с целью минимизации порядка переходных функций.

Таким образом, дифференциальные уравнения для входного напряжения $U_{\text{вх}}$ и входного тока $I_{\text{вх}}$ в операторах Лапласа для схемы, представленной на рисунке 1.10, имеют вид:

$$U_{\text{вх}} = I_L \cdot R + L \cdot I_L \cdot p, \quad (1.4)$$

$$I_{\text{вх}} = I_L + C \cdot U_{\text{вх}} \cdot p, \quad (1.5)$$

где I_L – ток в ветви с индуктивностью и резистором, А;

R – сопротивление активного элемента, Ом;

L – индуктивность дросселя, Гн;

C – емкость конденсатора, Ф;

p – оператор Лапласа.

Система уравнений (1.4 – 1.5) содержит два оператора p , следовательно, общий вид передаточного отношения описывается выражением

$$k_0 \cdot p^2 \cdot X_{\text{вых}}(p) + k_1 \cdot p \cdot X_{\text{вых}}(p) + k_2 \cdot X_{\text{вых}}(p) = K_{\text{ст}} \cdot X_{\text{вх}}(p) \quad (1.6)$$

где k_0, k_1, k_2 – коэффициенты дифференциального звена;

$K_{ст}$ – коэффициент передачи звена в статическом режиме;

$X_{вых}(p)$ – значение выходного сигнала звена;

$X_{вх}(p)$ – значение входного сигнала звена.

Квадратное уравнение (1.6) в зависимости от положительности дискриминанта, определяющегося коэффициентами k_0 , k_1 , k_2 , описывает либо апериодическое звено 2-го порядка, либо колебательное звено [58]. Переходная характеристика этих звеньев от подачи единичной ступенчатой функции приведена на рисунке 1.11.

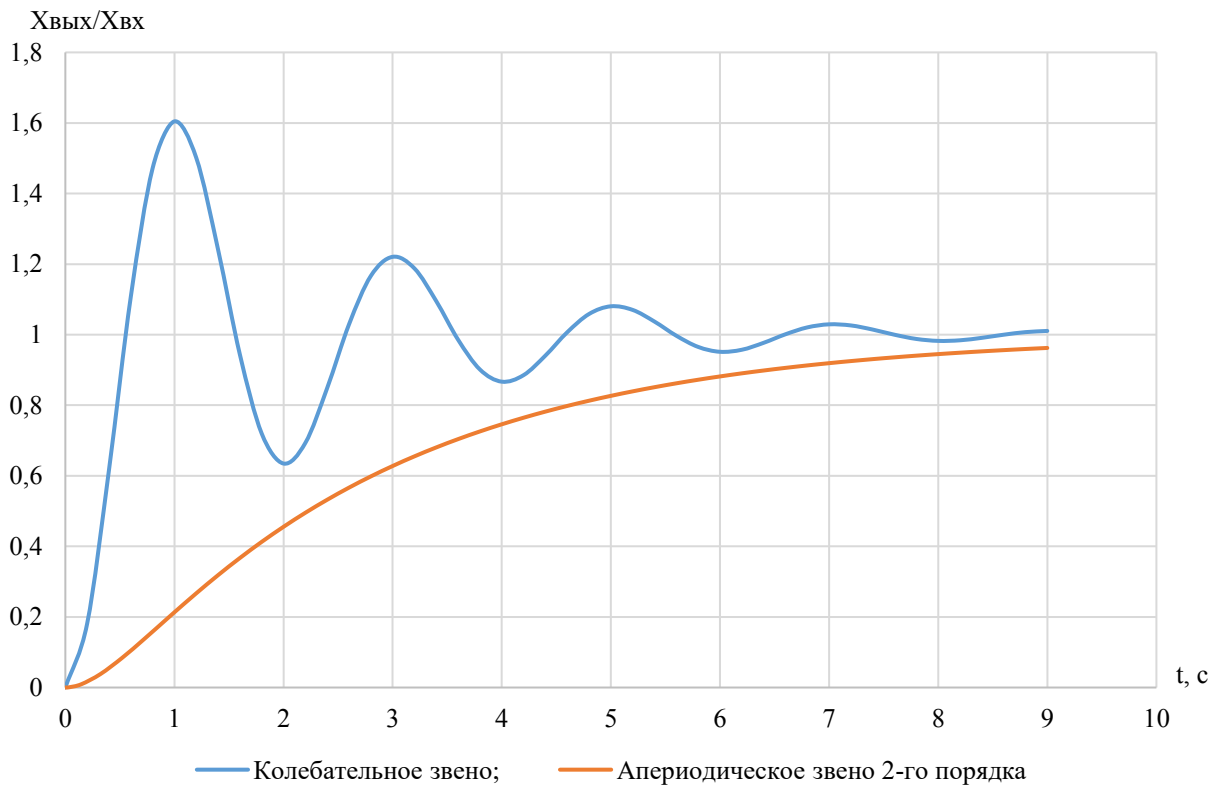


Рисунок 1.11 – Переходная характеристика колебательного звена и апериодического звена 2-го порядка

Согласно рисунку 1.11, колебательное звено, достигая единичного значения в более короткий промежуток времени, имеет большее быстродействие. Перерегулирование выходного значения позволяет уменьшить время переходного процесса.

В соответствии с этим, соответственно, производится подбор коэффициентов регуляторов (ПИ-регуляторы, ПИД-регуляторы) в соответствии с требуемыми критериями переходной характеристики:

- критерий быстродействия;
- критерий устойчивости.

Одним из важных критериев быстродействия является время регулирования $t_{уст}$ – время окончания переходного процесса переходной характеристики $h(t)$ с установленной практической точностью $\pm X_{уст}$ (отклонение h_{∞} до 5%) [59]. Определяется по моменту времени, когда переходная характеристика последний раз пересекает границу окончания переходного процесса (рисунок 1.12).

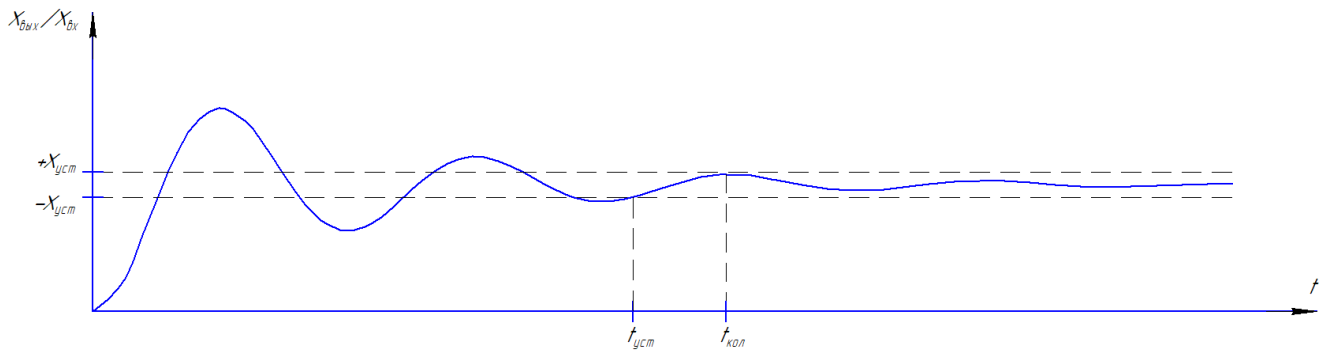


Рисунок 1.12 – Критерии быстродействия переходной характеристики

Дополнительно вычисляется колебательность $\nu_{кол}$ – номер пика синусоиды, при котором переходная характеристика лежит в пределах практической точности.

М. В. Складчиков, Н. С. Никорюк разработали способ формирования переходных процессов электрической цепи с заданными динамическими показателями и требуемой точностью [60].

В. С. Мелентьевым рассматриваются методы определения параметров различных переходных процессов по их отдельным мгновенным значениям [61]. Особенность этих методов в том, что время измерения не зависит от постоянной времени цепи, поэтому реализация методов обеспечивает высокое быстродействие.

К критериям устойчивости относят величину и время пикового значения переходной характеристики h_{max} и t_{max} , время перерегулирования $t_{пер}$, при котором переходная характеристика впервые достигает установившегося значения (рисунок 1.13).

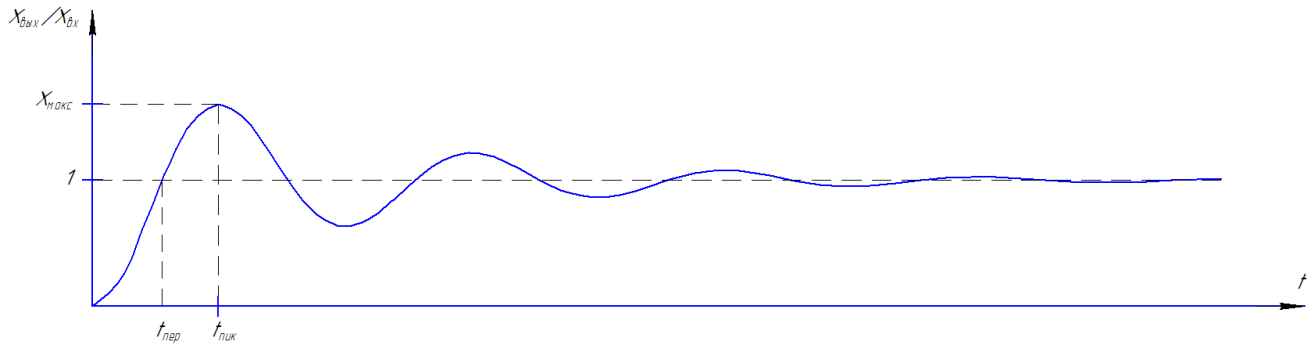


Рисунок 1.13 – Критерии устойчивости переходной характеристики

Расчет переходных характеристик электропривода постоянного тока требует дифференциального описания работы силовой цепи электровозов постоянного тока.

1.3 Математическое описание переходных токовых процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока

Для электрооборудования электровоза характерно постоянное изменение его параметров в процессе эксплуатации [62]. В процессе вождения поездов у машинистов возникает необходимость в регулировании скорости, силы тяги, ограничения токов тяговых электродвигателей, различных схемных переключений [63]. К тому же, при эксплуатации электровозов изменяются условия движения поезда: колебания и отклонения напряжения в контактной сети, непостоянный профиль пути, переменное сопротивление движению поезда, изменяющаяся сила сцепления между рельсом и колесной парой локомотива, вызы-

вающая боксования колесных пар [64]. Поэтому для электровозов характерен неустановившийся режим работы.

Электровоз 2ЭС6 способен реализовывать как последовательное возбуждение обмоток возбуждения двигателей, так и независимое. При последовательном возбуждении через обмотки возбуждения и обмотки якоря протекает общий ток, поэтому эти токи равны. Независимое возбуждение подразумевает включение в цепь обмоток возбуждения независимого источника питания, поэтому имеется возможность регулировать ток возбуждения. Вид возбуждения тяговых электродвигателей определяет в дальнейшем запись дифференциальных уравнений работы тягового электропривода.

В режиме параллельного соединения двигателей электровоза 2ЭС6 образуется четыре параллельные ветви по два последовательно включенных двигателя в каждой ветви, при этом количество тележек и количество параллельных ветвей совпадают. Поэтому дифференциальные уравнения работы тягового электропривода составлены для одной тележки. Силовая цепь одной тележки электровоза 2ЭС6 для режима последовательного возбуждения двигателей приведена на рисунке 1.14.

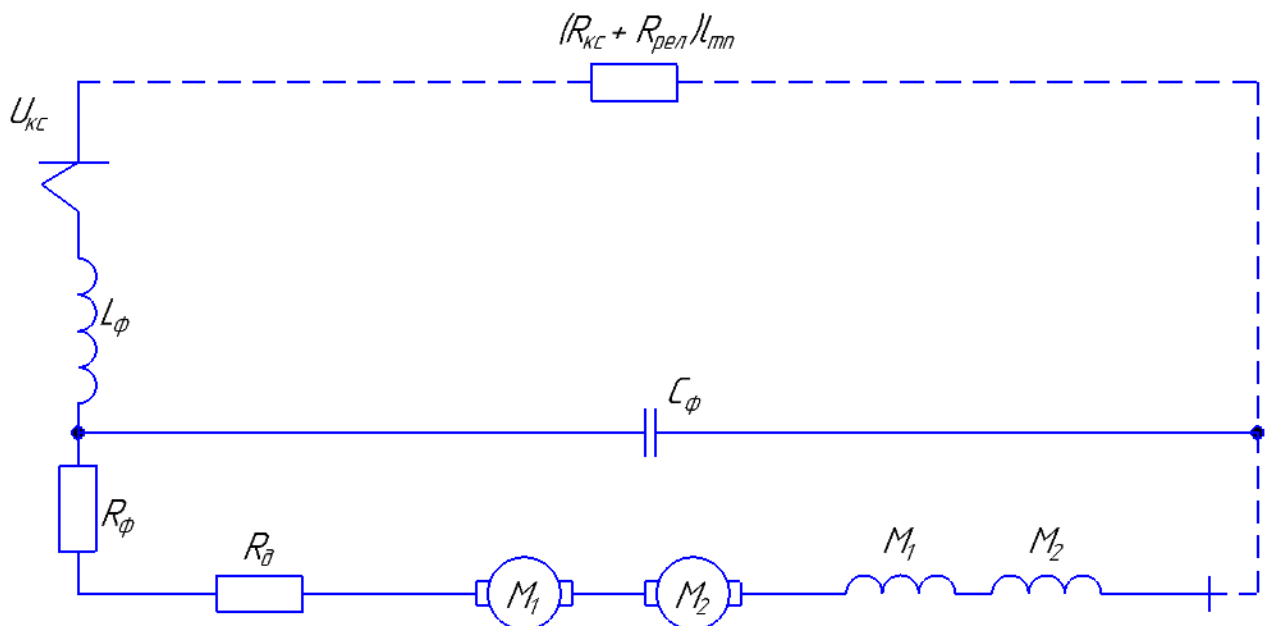


Рисунок 1.14 – Силовая цепь одной тележки электровоза 2ЭС6 для режима последовательного возбуждения двигателей

Процессы электромеханического преобразования энергии в тяговых электродвигателях основываются на описании параметров электропривода различными фундаментальными теориями;

- теория электрических цепей с применением законов Кирхгофа [65];
- теория магнитных полей с применением уравнений Максвелла [66];
- комбинированный подход, при котором учитываются и законы Кирхгофа, и законы Максвелла [67].

Описание электромеханических процессов в коллекторном электроприводе приводится с помощью уравнений Кирхгофа [68]. Токовые переходные процессы для силовой цепи электровоза 2ЭС6 в режиме последовательного возбуждения тяговых электродвигателей описываются системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{кc}} - Nc_n n_a \Phi - [R_{\phi} + R_{\text{д}} + NR_a + NR_{\text{гп}} + (R_{\text{кc}} + R_{\text{рел}}) \cdot l_{\text{гп}}] \cdot I_a - \\ - [L_{\phi} + NL_a + NL_{\text{гп}} + (L_{\text{кc}} + L_{\text{рел}}) \cdot l_{\text{гп}}] \cdot \frac{dI_a}{dt} = 0; \\ I_a = I_{\text{в}}, \end{array} \right. \quad (1.7)$$

где $U_{\text{кc}}$ – напряжение в контактной сети, В;

N – количество тяговых электродвигателей в одной ветви;

c_n – конструкционная постоянная двигателя;

n_a – частота вращения якоря, об/мин;

R_{ϕ} – сопротивление фильтра радиопомех, Ом;

$R_{\text{д}}$ – сопротивление пусковых резисторов, Ом;

R_a – суммарное сопротивление обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, Ом;

$R_{\text{гп}}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$R_{\text{кc}}$ – сопротивление контактной сети на 1 км пути, Ом/км;

$R_{\text{рел}}$ – сопротивление рельсовой цепи на 1 км пути, Ом/км;

$l_{\text{гп}}$ – расстояние от электровоза до тяговой подстанции, км;

I_a – ток якоря тяговых электродвигателей, А;

L_{ϕ} – индуктивность фильтра радиопомех, Гн;

L_a – суммарная индуктивность обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, Гн;

$L_{гп}$ – индуктивность обмотки возбуждения, Гн;

$L_{кc}$ – индуктивность контактной сети на 1 км пути, Гн/км;

$L_{рел}$ – индуктивность рельсовой цепи на 1 км пути, Гн/км;

I_B – ток возбуждения тяговых электродвигателей, А.

Система уравнений (1.7) не учитывает протекания вихревых токов в тяговых электродвигателях ввиду трудно определяемой величины сопротивления контуров протекания вихревых токов.

Силовая цепь одной тележки электровоза 2ЭС6 для режима независимого возбуждения двигателей приведена на рисунке 1.15.

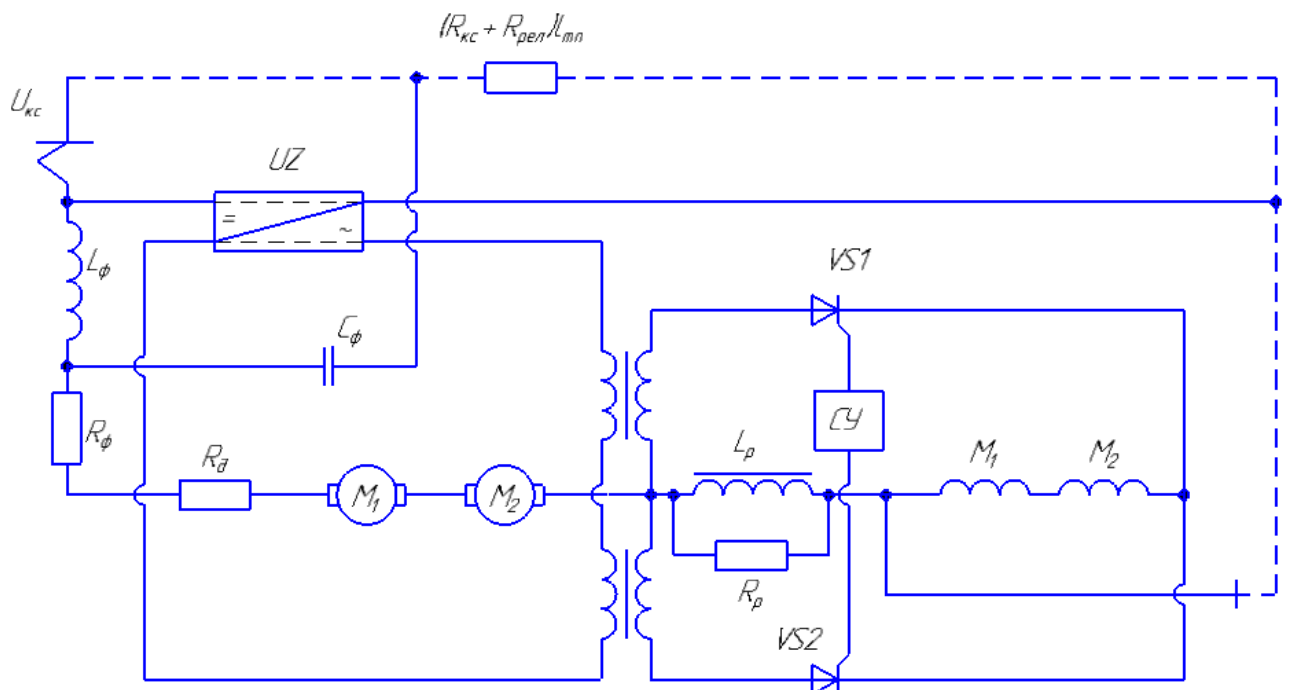


Рисунок 1.15 – Силовая цепь одной тележки электровоза 2ЭС6 для режима независимого возбуждения двигателей

Токвые характеристики для силовой цепи электровоза 2ЭС6 в режиме последовательного возбуждения тяговых электродвигателей описываются системой уравнений (1.8)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U_{\text{кв}} - Nc_n n_a \Phi - [R_{\phi} + R_{\text{д}} + NR_a + (R_{\text{кв}} + R_{\text{рел}}) \cdot l_{\text{тп}}] \cdot I_a - \\
 - [L_{\phi} + NL_a + (L_{\text{кв}} + L_{\text{рел}}) \cdot l_{\text{тп}}] \cdot \frac{dI_a}{dt} - R_p \cdot [I_a \cdot (1-K) - I_{\text{в0}}] - \\
 - L_p \frac{d[I_a \cdot (1-K) - I_{\text{в0}}]}{dt} = 0; \\
 U_{\text{сп}} - (2R_{\text{тп}} + R_{\text{тп}}) \cdot (I_a \cdot K + I_{\text{в0}}) - (2L_{\text{тп}} + L_{\text{тп}}) \frac{d(I_a \cdot K + I_{\text{в0}})}{dt} - \\
 - R_p [I_{\text{в0}} - I_a \cdot (1-K)] - L_p \frac{d[I_{\text{в0}} - I_a \cdot (1-K)]}{dt} = 0; \\
 K = \frac{R_p}{R_p + 2R_{\text{сн}}},
 \end{array} \right. \quad (1.8)$$

где R_p – сопротивление реактора, Ом;

K – коэффициент компаундирования;

$I_{\text{в0}}$ – составляющая тока возбуждения, создаваемая независимым источником питания, А;

L_p – индуктивность реактора, Гн;

$U_{\text{сп}}$ – значение выпрямленного напряжения вторичной обмотки трансформатора преобразователя собственных нужд, В;

$R_{\text{тп}}$ – сопротивление вторичной обмотки трансформатора преобразователя собственных нужд, Ом.

Система уравнений (1.8), аналогично системе (1.7), не учитывает протекания в тяговых электродвигателях вихревых токов.

Электровоз 2ЭС10 имеет асинхронный тяговый электропривод и в этом состоит принципиальное отличие от электровоза 2ЭС6, имеющего коллекторный привод. Питание данного асинхронного привода реализуется тяговым инвертором, формирующим синусоидальное напряжение требуемой амплитуды и частоты [69]. На электровозе 2ЭС10 реализовано поосное регулирование, то есть каждый тяговый электродвигатель питается от своего преобразователя. Данный фактор позволяет реализовывать максимальную силу тяги на колесе. Принципиальная схема питания тяговых двигателей одной тележки электровоза 2ЭС10 приведена на рисунке 1.16.

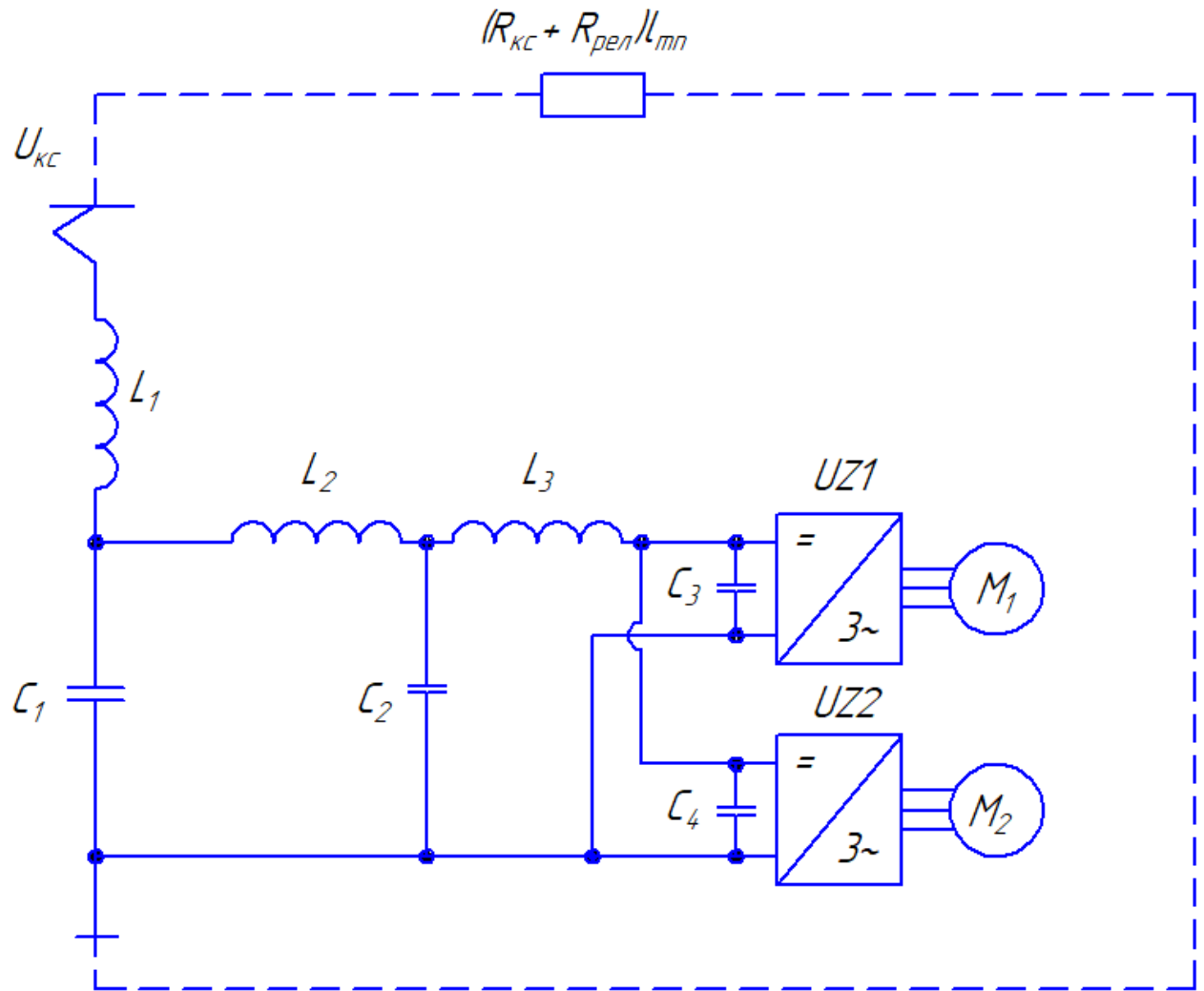


Рисунок 1.16 – Схема питания тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС10

Описание электромеханических процессов в асинхронном приводе требует комбинированного подхода с уравнениями Кирхгофа и уравнениями Максвелла. Токвые характеристики в силовой цепи электровоза 2ЭС10 описываются системой уравнений (1.9) [70].

$$\begin{aligned}
 & U_A - I_A \cdot R_A - \frac{d\Psi_A}{dt} = 0; \\
 & 0 - I_a \cdot R_a - \frac{d\Psi_a}{dt} = 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \\ M_{aA} \cos \gamma & M_{aB} \cos(\gamma - \frac{2}{3} \pi) & M_{aC} \cos(\gamma + \frac{2}{3} \pi) \\ M_{bA} \cos(\gamma + \frac{2}{3} \pi) & M_{bB} \cos \gamma & M_{bC} \cos(\gamma - \frac{2}{3} \pi) \\ M_{cA} \cos(\gamma - \frac{2}{3} \pi) & M_{cB} \cos(\gamma + \frac{2}{3} \pi) & M_{cC} \cos \gamma \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

$$\begin{pmatrix} M_{Aa} \cos \gamma & M_{Ab} \cos(\gamma + \frac{2}{3} \pi) & M_{Ac} \cos(\gamma - \frac{2}{3} \pi) \\ M_{Ba} \cos(\gamma - \frac{2}{3} \pi) & M_{Bb} \cos \gamma & M_{Bc} \cos(\gamma + \frac{2}{3} \pi) \\ M_{Ca} \cos(\gamma + \frac{2}{3} \pi) & M_{Cb} \cos(\gamma - \frac{2}{3} \pi) & M_{Cc} \cos \gamma \\ L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{pmatrix}$$

где U_A – фазное напряжение, подаваемое на статорную обмотку фазы A , В;

I_A – ток, протекающий по статорной обмотке фазы A , А;

R_A – сопротивление статорной обмотки фазы A , Ом;

Ψ_A – потокосцепление, создаваемое статорной обмоткой фазы A , Вб;

L_A – индуктивность статорной обмотки фазы A , Гн;

M_{AB} – взаимоиנדуктивность статорных обмоток фазы A и B , Гн;

γ – угол между осями статорной обмотки фазы A и роторной обмотки фазы a , рад.

Первое уравнение системы (1.9) описывает баланс напряжений асинхронного двигателя в статорной обмотке для фазы A при ее питании напряжением

U_A , второе уравнение описывает баланс напряжений в условной фазе a роторной обмотки, при этом на нее не подается прямого напряжения, взаимодействие осуществляется магнитными полями статора и ротора, поэтому в начале этого уравнения нулевое напряжение.

Расчет таких дифференциальных уравнений требует множества итераций, что реализуется либо написанием программного комплекса, либо использованием существующей среды для моделирования и программирования.

Д. А. Даденков, И. С. Лузянин разработали программный комплекс для изучения токовых переходных процессов в электродвигателях [71]. Представлена программа и методика испытания, алгоритм программы и ее блок-схема. Однако, данный комплекс не учитывает вихревые токи, как один из показателей неустановившегося режима работы.

В. А. Соболевым исследованы токовые переходные процессы в электрической цепи с применением программного комплекса *Multisim 10.1* [72]. Приведены осциллограммы напряжений и тока для линейной цепи и доказано, что компьютерная программа может успешно использоваться в учебном процессе при изучении темы «Токовые характеристики электрических цепей для неустановившегося режима». Однако для моделирования электроприводов необходима более прикладная среда разработки.

М. А. Малышев в своей работе рассматривал способы настройки контуров скорости и тока асинхронного электропривода [73]. Моделирование системы управления электропривода осуществлялось в модельно-ориентированной среде разработки *Matlab/Simulink*, все результаты отображаются в осциллограмме.

Данная программа будет использована для моделирования электроприводов электровозов 2ЭС6 и 2ЭС10.

1.4 Выводы по главе 1

1. Развитие электровозостроения на сегодняшний день в зависимости от вида тягового привода имеет два направления – электровозы с коллекторным и асинхронным тяговым приводом. Сравнение показателей коллекторного и асинхронного привода, используемого на электровозах нового поколения, выявило, что оба привода имеют преимущества и недостатки.

2. Анализ силовых цепей электровоза 2ЭС6 выявил, что основная нагрузка сосредотачивается на тяговых электродвигателях как концентраторах высокой удельной мощности, в связи с этим повышение надежности данного узла силовой цепи является ключевой задачей исследования. В ходе анализа статистики отказов тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 выявлено, что за 2021 год пришлось 67 неисправностей, связанных с перебросом электрической дуги по коллектору и возникновению круговых огней. 54 % данных неисправностей возник по причине потенциального искрения на коллекторе. Приведена целесообразность совершенствования электрооборудования электровоза 2ЭС6 в части улучшения токовых переходных процессов в неустановившихся режимах работы.

3. Для построения имитационной модели силовой цепи электровоза 2ЭС6 было проведено математическое описание электрических переходных процессов для последовательного и независимого возбуждения в виде систем дифференциальных уравнений. Данные уравнения являются основой расчетных моделей силовой цепи.

4. Задачи дальнейшего исследования:

- построить имитационную модель тягового электродвигателя;
- верифицировать данную модель на основе результатов тепловых испытаний;
- построить имитационную модель силовой цепи электровоза 2ЭС6 с последовательным возбуждением тяговых электродвигателей.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ

2.1 Построение имитационной модели тягового электродвигателя постоянного тока

Как было приведено ранее, опыт эксплуатации электровозов 2ЭС6 выявил, что тяговые электродвигатели являются наиболее часто отказываемым узлом, особенно это выражено при работе в неустановившихся режимах. Для исследования характеристик тягового тока в электрической цепи электровозов постоянного тока необходимо моделирование силовой цепи, ключевым компонентом которой является тяговый электродвигатель.

Испытания двигателей, подтверждение их характеристик, а также измерение параметров работы осуществляется на стендах взаимного нагружения [74]. Схема стенда включает в себя две электрические машины, которые соединены электрически и механически (рисунок 2.1).

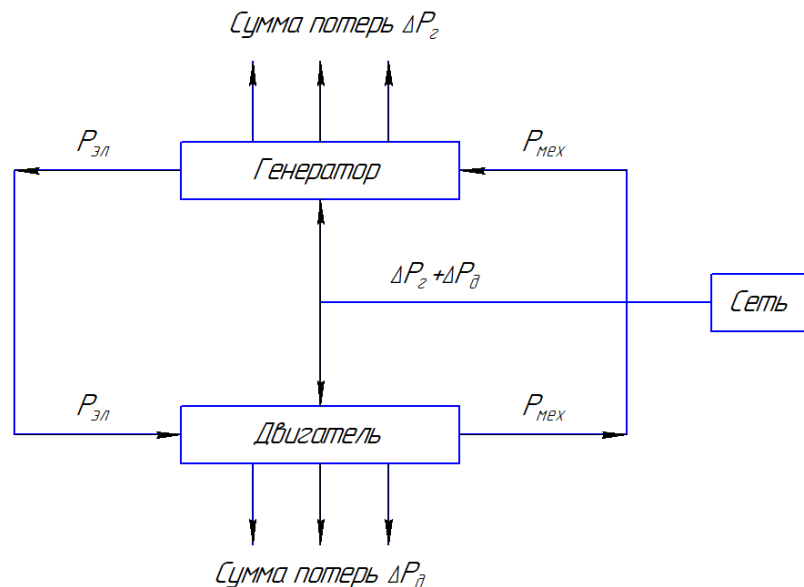
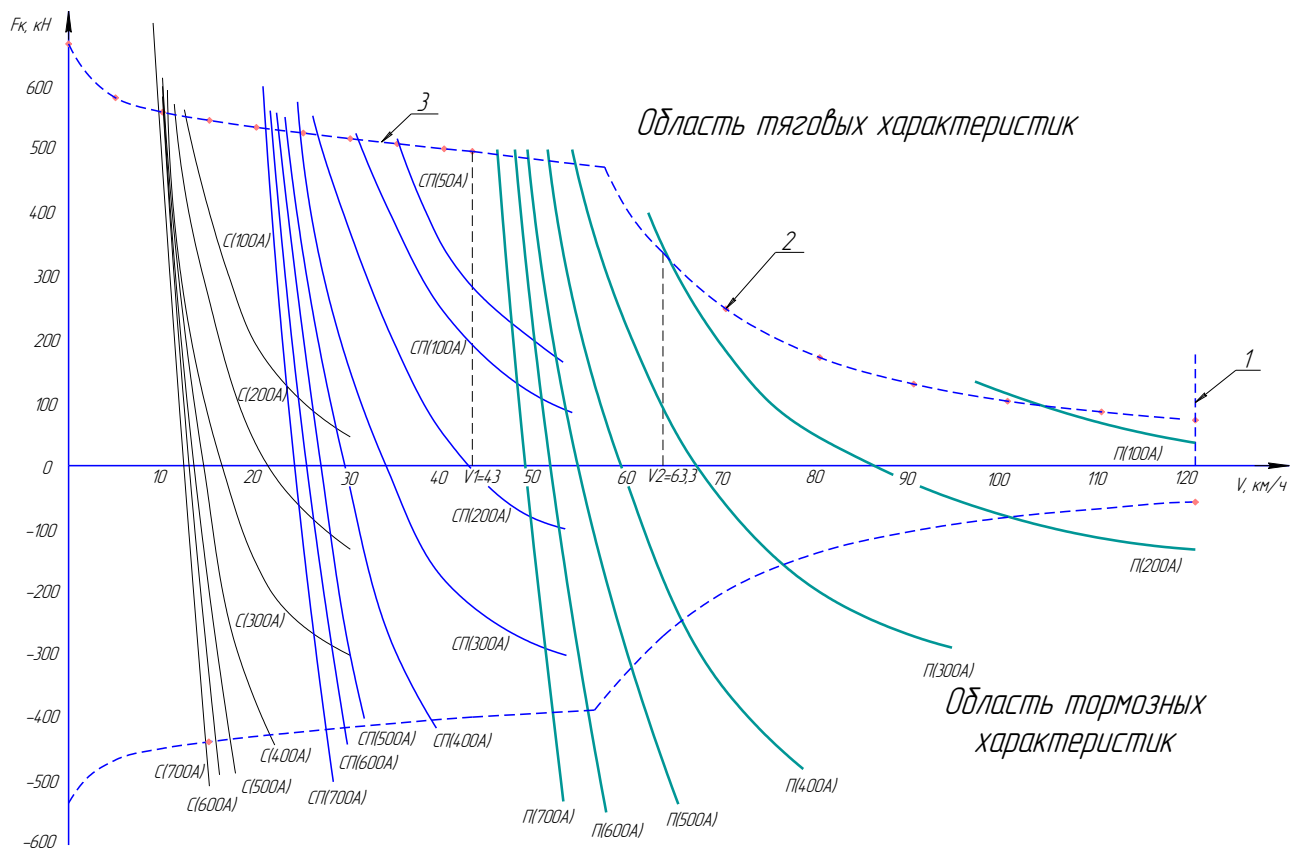


Рисунок 2.1 – Схема энергетического обмена при испытании по методу взаимного нагружения

Наличие в системе «Двигатель – Генератор» электрических, механических и магнитных потерь не способствует к автономной работе системы. Вследствие этого в схему взаимного нагружения вводятся дополнительные источники питания:

- вольтдобавочный преобразователь (ВДП) – источник питания, создающий условия для протекания тока в цепи испытуемых машин;
- линейный преобразователь (ЛП) – источник питания, создающий условия для вращения электрических машин [74].

Схема электровоза 2ЭС6, как было приведено ранее, способна обеспечивать работу тяговых электродвигателей в одном из режимов возбуждения. В режиме независимого возбуждения возможна реализация широкого диапазона силы тяги, вследствие чего данный режим является основным (рисунок 2.2).



- 1 – ограничение по конструкционной скорости электровоза; 2 – ограничение по мощности тягового электродвигателя; 3 – ограничения по силе сцепления колес с рельсами

Рисунок 2.2 – Тяговые характеристики электровоза 2ЭС6

При неисправностях преобразователя собственных нужд алгоритм электровоза 2ЭС6 предусматривает переход в режим последовательного возбуждения, то есть электровоз эксплуатируется в поле тяговых характеристик, реализуя наиболее рациональные из них [75].

Схема взаимного нагружения тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 с независимым питанием обмоток возбуждения представлена на рисунке 2.3 [76].

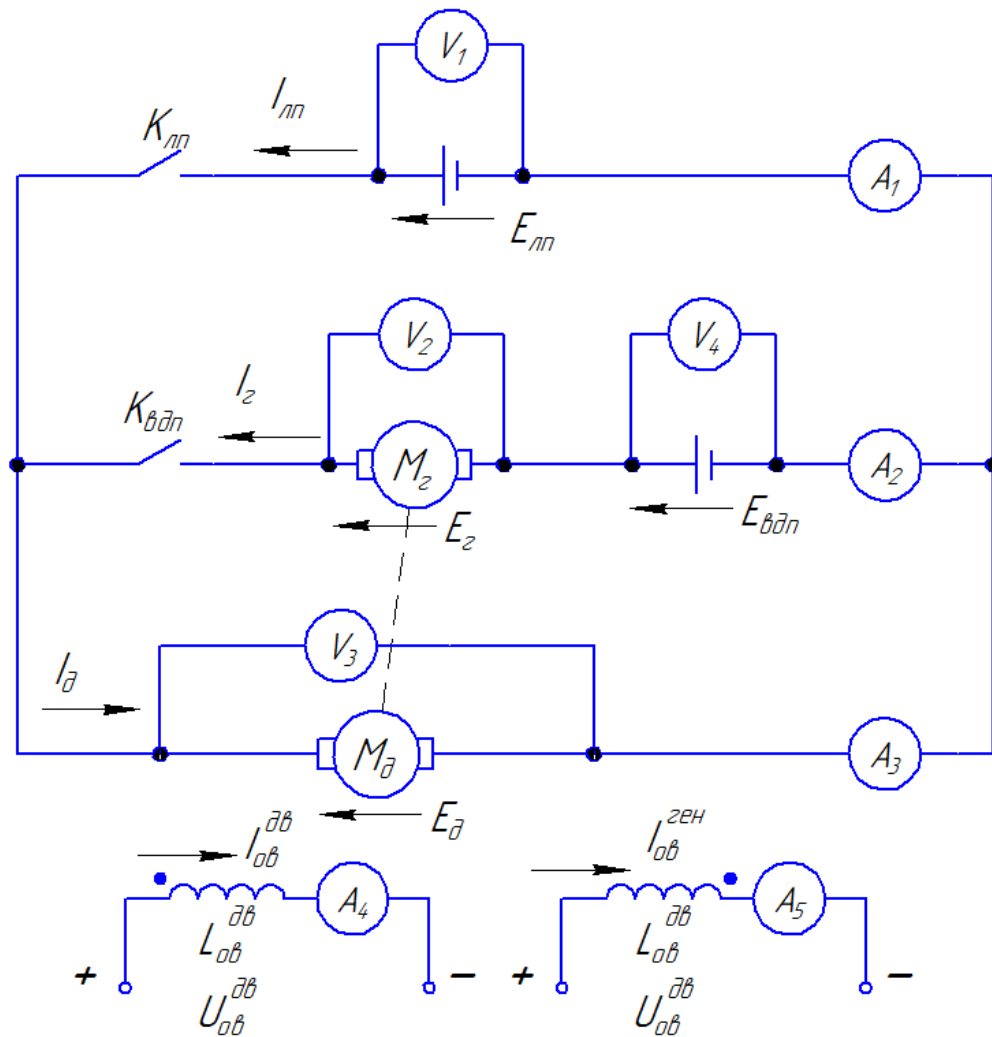


Рисунок 2.3 – Схема взаимного нагружения тяговых электродвигателей с независимым питанием обмоток возбуждения

Уравнения Кирхгофа для схемы взаимного нагружения в динамическом режиме [77] представлены уравнениями (2.1 – 2.2)

$$I_{\text{д}} = I_{\text{Г}} + I_{\text{ЛП}}, \quad (2.1)$$

$$E_{\text{ВДП}} + E_{\text{Г}} - I_{\text{Г}} \cdot R_{\text{Г}} - L_{\text{Г}} \cdot \frac{dI_{\text{Г}}}{dt} - E_{\text{д}} - I_{\text{д}} \cdot R_{\text{д}} - L_{\text{д}} \cdot \frac{dI_{\text{д}}}{dt} = 0, \quad (2.2)$$

где $I_{\text{д}}$ – ток якоря двигателя, А;

$I_{\text{Г}}$ – ток якоря генератора, А;

$I_{\text{ЛП}}$ – ток ЛП, А;

$E_{\text{ВДП}}$ – ЭДС вольтодобавочного преобразователя, В;

$E_{\text{Г}}$ – ЭДС генератора, В;

$R_{\text{Г}}$ – общее сопротивление обмотки якоря ($R_{\text{я}}$), дополнительных полюсов ($R_{\text{ДП}}$) и компенсационной обмотки ($R_{\text{КО}}$) генератора, Ом;

$L_{\text{Г}}$ – общая индуктивность обмотки якоря ($L_{\text{я}}$), дополнительных полюсов ($L_{\text{ДП}}$) и компенсационной обмотки ($L_{\text{КО}}$) генератора, Гн;

$E_{\text{д}}$ – ЭДС двигателя, В;

$R_{\text{д}}$ – сумма сопротивлений $R_{\text{я}}$, $R_{\text{КО}}$ и $R_{\text{ДП}}$ двигателя, Ом;

$L_{\text{д}}$ – общая индуктивность $L_{\text{я}}$, $L_{\text{КО}}$ и $L_{\text{ДП}}$ двигателя, Гн.

Вследствие идентичности параметров и характеристик испытуемых машин соответствующие сопротивления обмоток и их индуктивности также совпадают (2.3 – 2.4)

$$R_{\text{Г}} = R_{\text{д}}, \quad (2.3)$$

$$L_{\text{Г}} = L_{\text{д}}. \quad (2.4)$$

Якорная цепь электрической машины состоит из обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки. Схема замещения представлена на рисунке 2.4.

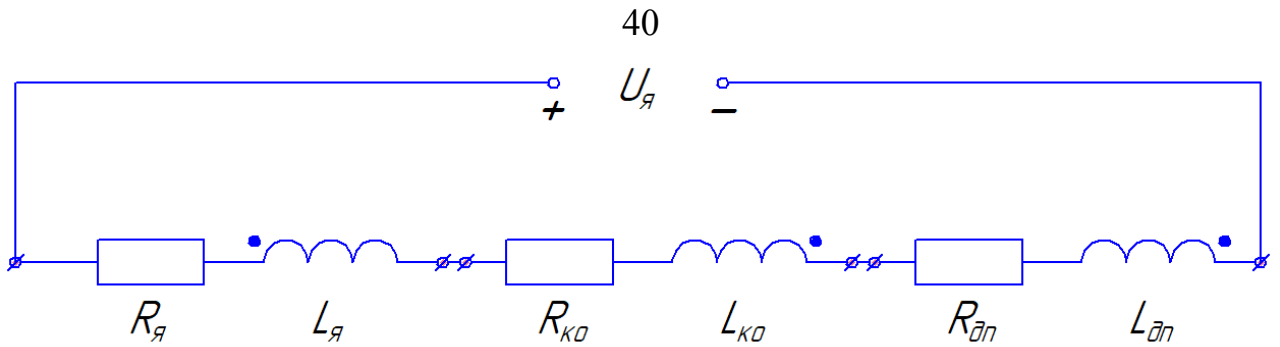


Рисунок 2.4 – Схема цепи якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки тягового электродвигателя

В соответствии рисунком 2.4, суммарное сопротивление якорной цепи электрической машины определяется уравнением (2.5)

$$R_{д} = R_{я} + R_{ко} + R_{дп}. \quad (2.5)$$

Вследствие наличия потоков рассеяния в обмотках машины и нелинейного характера кривой намагничивания, расчет общей индуктивности невозможно определить по аналогии с уравнением (2.5) [78]. Общая индуктивность в данном случае определяется в соответствии с магнитными характеристиками согласно паспортным данным тягового электродвигателя ЭК-810Ч [79].

Преобразуя знак производной d/dt в оператор Лапласа p , выразим из уравнения (2.2) ток генератора, учитывая уравнения (2.1), (2.3 – 2.5)

$$I_{г} = \frac{E_{вдп} + E_{г} - E_{д} - I_{лп} \cdot (R_{я} + R_{ко} + R_{дп}) - I_{лп} \cdot (L_{я} - L_{ко} - L_{дп}) \cdot p}{R_{г} + L_{г} \cdot p + R_{д} + L_{д} \cdot p}. \quad (2.6)$$

Ток ЛП изначально характеризуется как один из показателей питания системы «Двигатель – Генератор», дискретно выдавая определенные значения тока, поэтому влияние индуктивности якорной цепи не оказывает на него влияния. Следовательно, последним слагаемым числителя уравнения (2.6) $I_{лп} \cdot (L_{я} - L_{ко} - L_{дп}) \cdot p$ можно пренебречь.

Из выражения (2.6) путем алгебраических преобразований была получена передаточная функция схемы, представленной на рисунке 2.3, для задания тока генератора в разрабатываемую модель

$$\frac{W_{\text{вых}}(p)}{W_{\text{вх}}(p)} = \frac{I_{\Gamma}}{E_{\text{вдп}} + E_{\Gamma} - E_{\text{д}} - I_{\text{лп}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}})} = \frac{1}{p \cdot (L_{\Gamma} + L_{\text{д}}) + (R_{\text{д}} + R_{\Gamma})}. \quad (2.7)$$

Передаточная функция выражения (2.7) определяет звено как апериодическое 1-го порядка.

Ток двигателя, согласно уравнению (2.1), превышает ток генератора на величину тока ЛП.

Значения магнитного потока с учетом конструкционной постоянной машины определяются согласно магнитным характеристикам тягового электро-двигателя ЭК-810Ч, представленным на рисунке 2.5 [80].

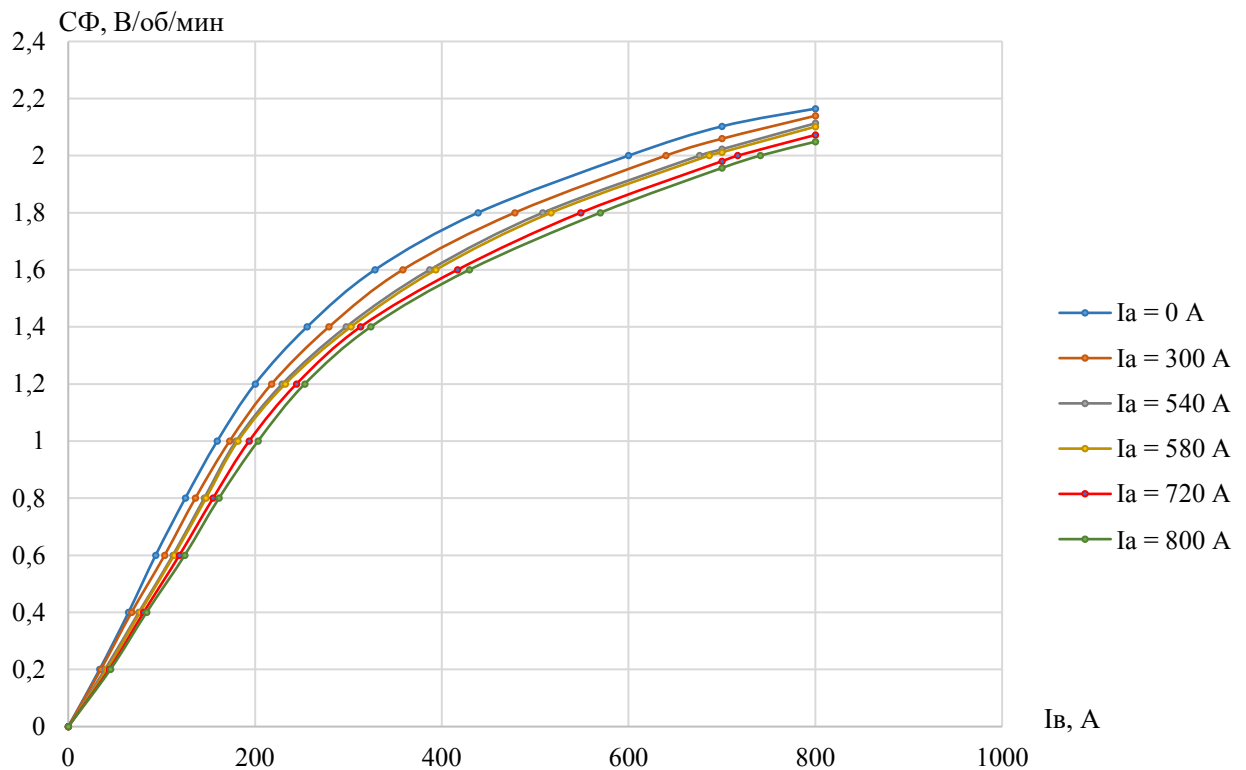


Рисунок 2.5 – Магнитные характеристики тягового электродвигателя ЭК-810Ч

Электромагнитный момент якоря, использующийся в разрабатываемой модели, описывается выражением

$$M_{эм} = c_m \cdot \Phi \cdot I_a \quad (2.8)$$

где c_m – конструкционная постоянная машины;

Φ – основной магнитный поток в тяговом электродвигателе, Вб.

Формирование момента на валу двигателя общая система электрических машин приводится в движение, при этом вал генератора осуществляет функцию нагрузки для двигателя. Помимо тормозного момента генератора, система «Двигатель-Генератор» имеет потери моментов ΔM , вызванные трением в подшипниках и сопротивлением воздушной среды. Поэтому уравнение движения испытываемых машин имеет вид:

$$M_d - M_r - 2 \cdot \Delta M = 2 \cdot J_y \cdot \frac{d\omega_y}{dt}, \quad (2.9)$$

где M_d – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

M_r – электромагнитный момент генератора, Н·м;

J_y – момент инерции якоря, кг·м²;

ω_y – угловая частота вращения якорей, рад/с.

Записав уравнение (2.9) в операторах Лапласа p , получим выражение

$$M_d - M_r - 2 \cdot \Delta M = 2 \cdot J_y \cdot \omega_y \cdot p. \quad (2.10)$$

Коэффициент «2» в выражениях (2.9) и (2.10) объясняется наличием в обеих машинах (двигатель и генератор) одинакового моментов сопротивления и моментов инерции якоря.

Выражение (2.10) позволяет определить путем алгебраических преобразований передаточную функцию системы «Двигатель-Генератор» для задания частоты вращения в разрабатываемую модель

$$\frac{W_{\text{ВЫХ}}(p)}{W_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{\omega_{\text{я}}}{M_{\text{д}} - M_{\text{г}} - 2 \cdot \Delta M} = \frac{1}{2 \cdot J_{\text{я}} \cdot p}. \quad (2.11)$$

Передаточная функция в выражении (2.11) определяет звено как интегральное.

Вращение проводников якоря в магнитном поле создаёт в них ЭДС, определяющуюся выражением

$$E = c_n \cdot \Phi \cdot n_a, \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) описывает как электродвижущую силу двигателя, так и электродвижущую силу генератора, входящие в уравнение (2.2), поэтому выход системы замыкается обратной связью на вход системы.

В соответствии с полученными выражениями (2.1 – 2.12), имитационная модель взаимного нагружения в среде *MATLAB/Simulink* приведена на рисунке 2.6.

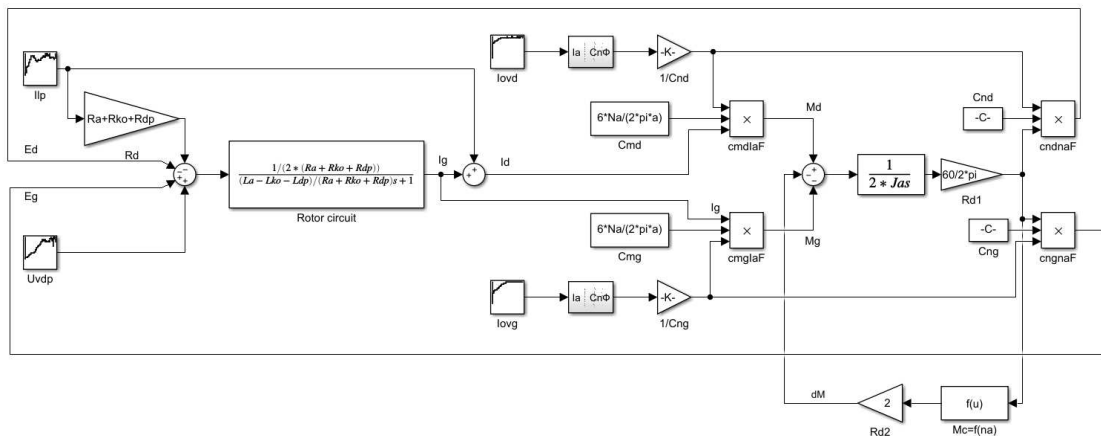


Рисунок 2.6 – Имитационная модель взаимного нагружения, построенная в среде *Matlab/Simulink*

2.2 Сведения по тепловым испытаниям тяговых электродвигателей на стенде взаимной нагрузки

Согласно программе и методике проведения тепловых испытаний тяговых электрических машин [81, 82] имитировался пусковой режим с выходом на номинальные параметры работы (параметры часового режима):

$$- U_d = 1500 \text{ В};$$

$$- I_d = 580 \text{ А};$$

$$- n_d = 750 \text{ об/мин.}$$

В качестве исходных значений, помимо относительно статических сопротивлений, индуктивностей машин и основного магнитного потока, задавались изменяющиеся во времени значения напряжения ВДП, тока ЛП, а также токов обмоток возбуждения двигателя и генератора. Характер динамики изменения этих величин определяется алгоритмом работы испытательного стенда и представлен на рисунках 2.7 – 2.9.

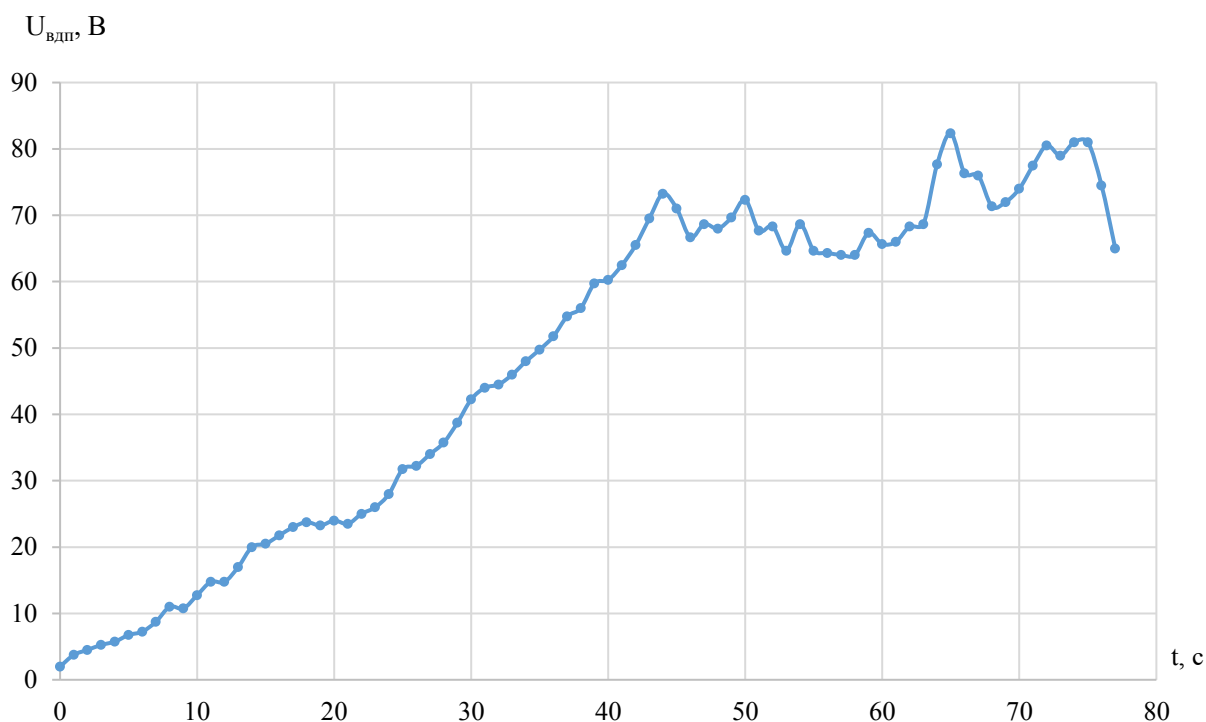


Рисунок 2.7 – Временная характеристика напряжения ВДП

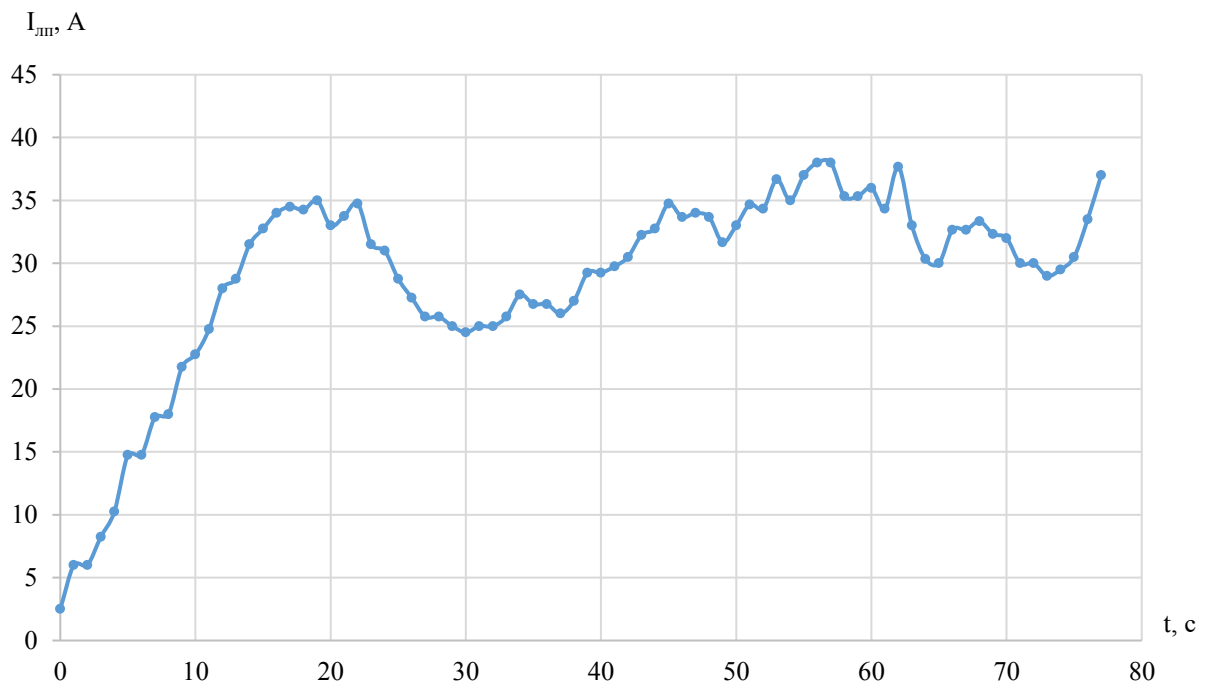


Рисунок 2.8 – Временная характеристика тока ЛП

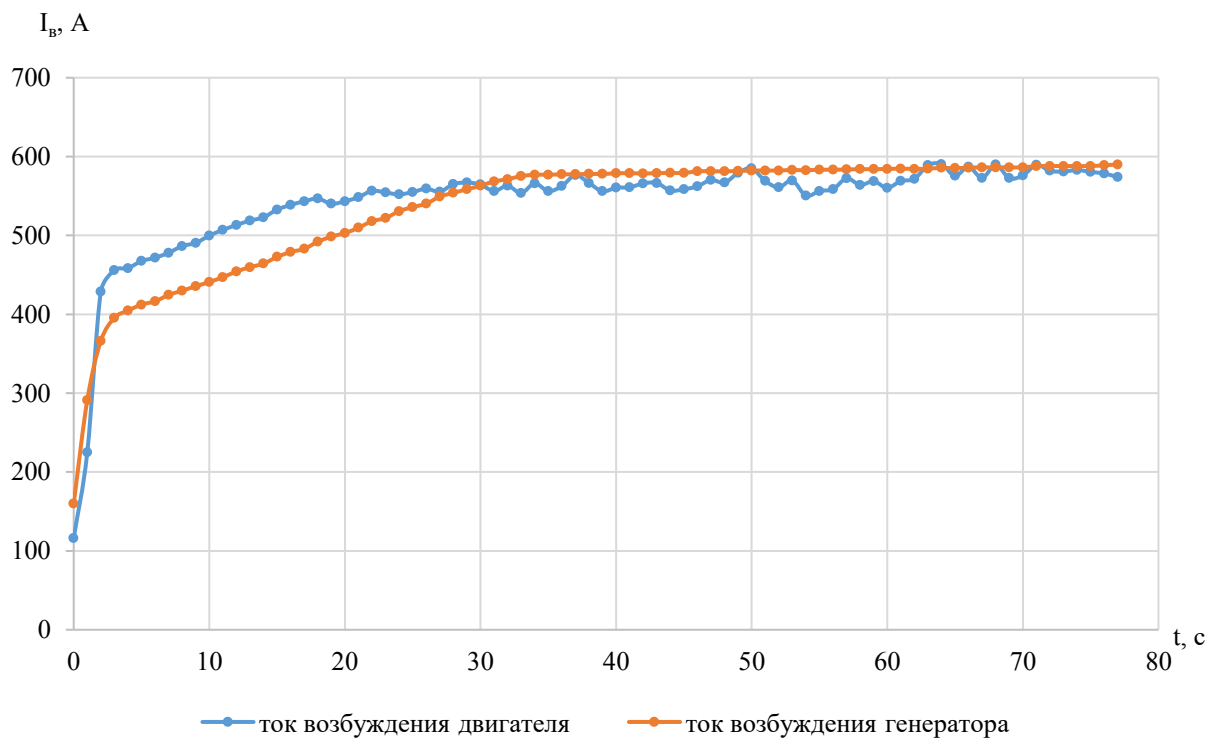


Рисунок 2.9 – Временная характеристика токов возбуждения двигателя и генератора

2.3 Результаты моделирования схемы взаимного нагружения

Результаты моделирования схемы взаимного нагружения с независимым питанием обмотки возбуждения представлены на рисунках 2.10 – 2.12.

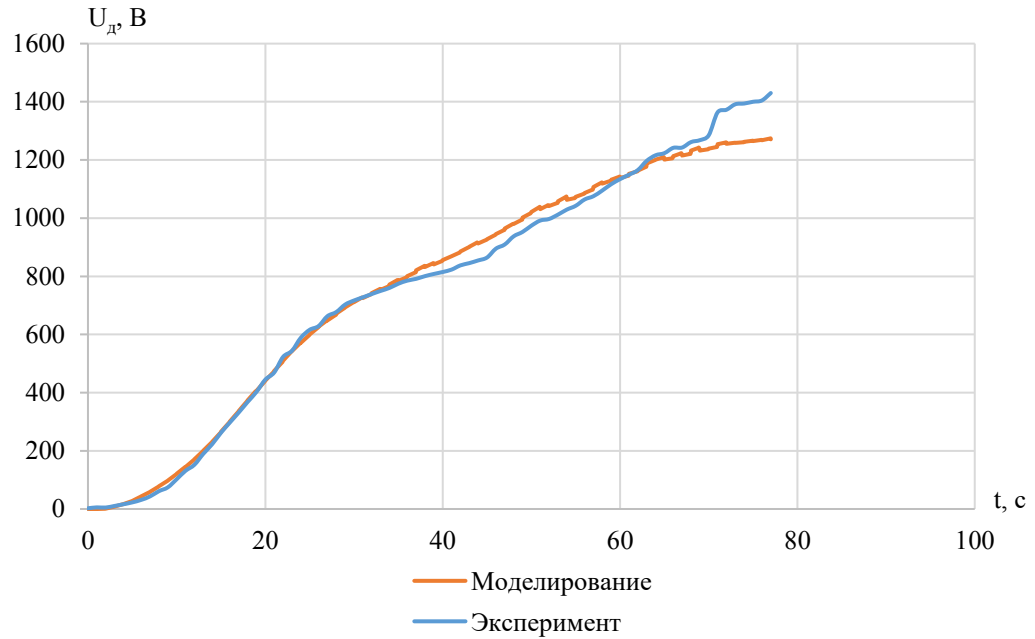


Рисунок 2.10 – Временная характеристика напряжения двигателя

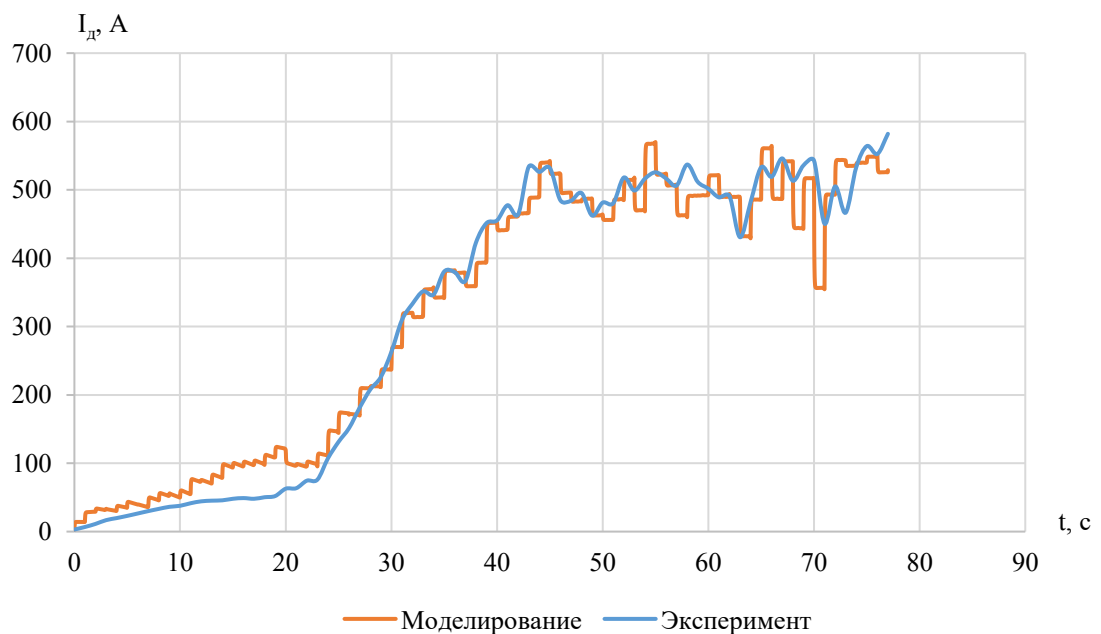


Рисунок 2.11 – Временная характеристика тока якоря двигателя

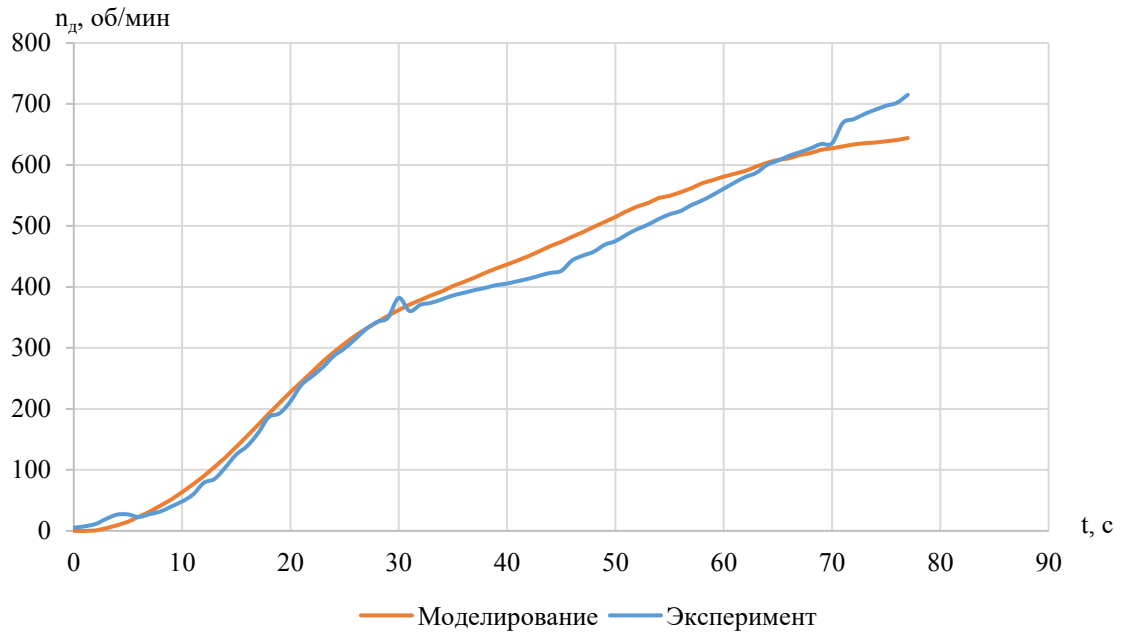


Рисунок 2.12 – Временная характеристика частоты вращения вала двигателя и генератора

Полученные графики наглядно демонстрируют расхождение между смоделированными характеристиками и экспериментальными. Процентное значение расхождения смоделированных характеристик относительно экспериментальных приведено на рисунке 2.13.

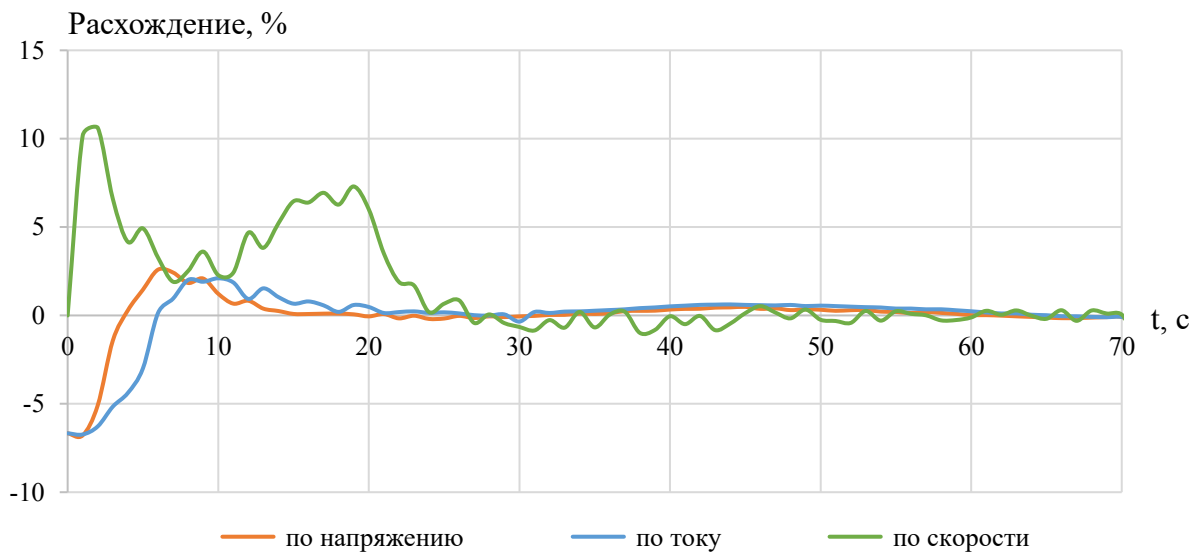


Рисунок 2.13 – Расхождение смоделированных характеристик относительно экспериментальных

Согласно рисунку 2.13, расхождение характеристик в неустановившемся режиме лежит в пределах $\pm 10\%$, при этом в момент выхода в номинальный режим расхождение составляет $\pm 1\%$, что указывает на достаточную достоверность имитационной модели в отражении переходных процессов.

Коэффициенты корреляции между смоделированными экспериментальными данными представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коэффициенты корреляции между смоделированными экспериментальными данными

$R(U)$	$R(I)$	$R(n)$
0,994	0,991	0,993

Полученная верифицированная модель тягового электродвигателя является базовым звеном для построения имитационной модели схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6.

2.4 Построение имитационной модели схемы последовательного возбуждения электровоза 2ЭС6

Построение имитационной модели схемы силовых цепей эквивалентно построению структурной схемы системы автоматического регулирования [83].

Структурная схема представляет собой типовые функциональные блоки с указанием направления движения сигнала [84]. Она обеспечивает единообразное описание любых систем по сложности и физическому принципу действия [85] (рисунок 2.14).

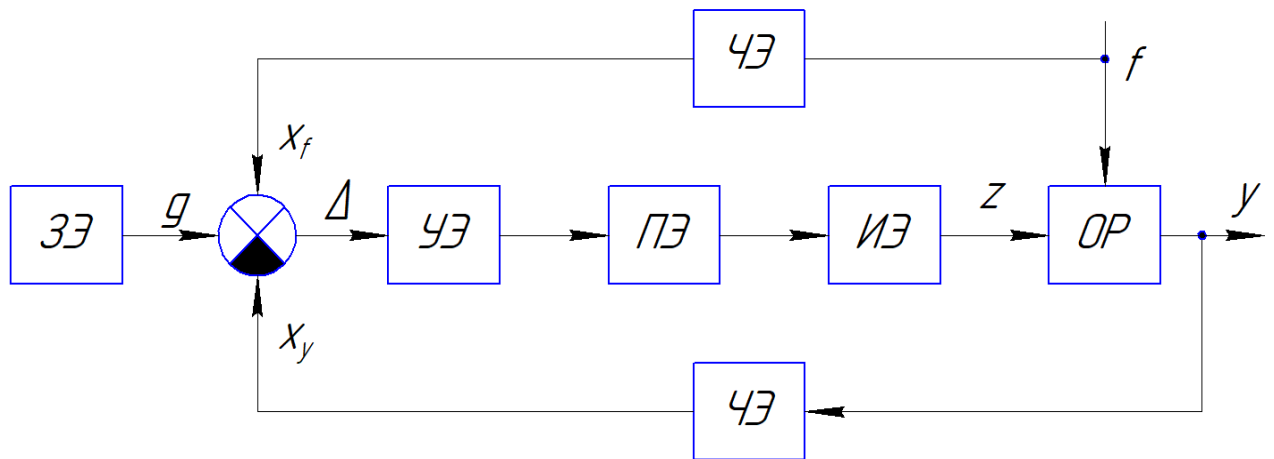


Рисунок 2.14 – Типовая структурная схема системы автоматического регулирования

На рисунке 2.14 обозначены следующие элементы:

– ОР (объект регулирования) – устройство, параметр которого (y) подлежит регулированию;

– ЗЭ (задающий элемент) – устройство, с помощью которого в систему вводят сигнал g (задающее воздействие), пропорциональное $y_{\text{зад}}$ на выходе системы;

– УЭ (управляющий элемент, регулятор) – устройство, формирующее по сигналу рассогласования Δ требуемый закон управляющего воздействия на объект регулирования;

– ПЭ (промежуточный элемент) – устройство по промежуточному преобразованию сигнала;

– ИЭ (исполнительный элемент) – устройство, оказывающее непосредственное воздействие на объект регулирования посредством сигнала z ;

– ЧЭ (чувствительный элемент) – любые датчики для измерения выходного сигнала y и сигнала возмущения f .

Объектом регулирования структурной схемы является тяговый электродвигатель, выходной регулируемой величиной двигателя выступает сила тяги, которая при формировании на валу двигателя передается через зубчатую передачу на ось колесной пары. Для наглядности потерь, образуемых при передаче

момента, представлена мощностная диаграмма от электромагнитной мощности двигателя до мощности на оси колесной пары (рисунок 2.15)

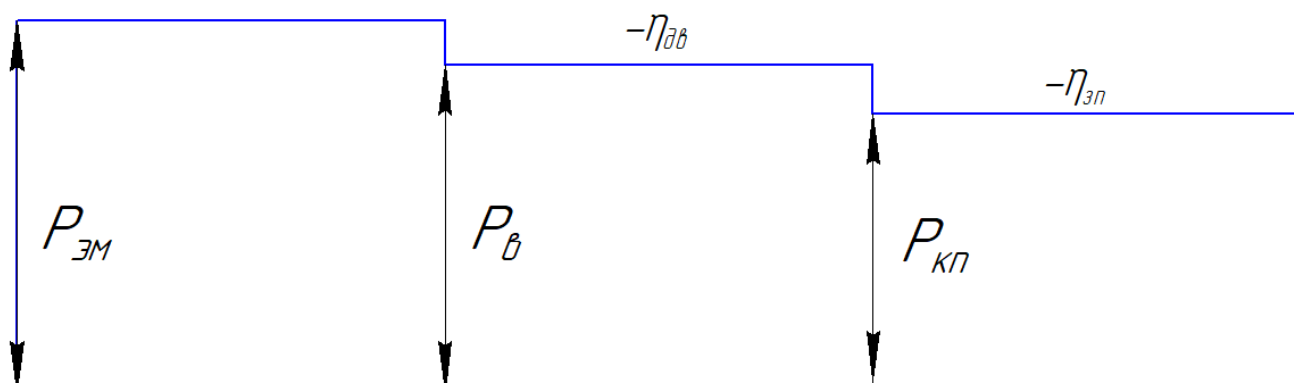


Рисунок 2.15 – Диаграмма передачи электромагнитной мощности двигателя на ось колесной пары

Неконтролируемые колебания напряжения в контактной сети, изменяющаяся согласно алгоритму ведения поезда скорость локомотива и непостоянный профиль пути представляют собой возмущающие сигналы для тягового электродвигателя [86].

В общем виде модель электровоза 2ЭС6 разделена на электрическую часть и механическую часть [87].

Электрическая часть имитационной модели включает в себя последовательное преобразование напряжения в электромагнитный момент якоря.

Преобразование входного напряжения в ток якорей двигателей представлено выражением (1.7).

Режим последовательного возбуждения характерен равенством тока якоря и тока возбуждения. Поэтому зависимость магнитного потока и тока возбуждения описывается уравнением

$$I_a w_b = \Phi \cdot R_m, \quad (2.13)$$

где w_b – количество витков обмотки возбуждения;

R_M – магнитное сопротивление контура магнитного потока, Ом.

На практике значение магнитного сопротивления непостоянно в связи с магнитным насыщением стальных участков [88], поэтому магнитный поток удобнее рассчитывать по магнитным характеристикам, представленным на рисунке 2.5. Экспериментально полученные в точечном виде магнитные характеристики для расчетов электромеханических процессов в тяговом электродвигателе интерполируются уравнением полинома 5-й степени [89]

$$\Phi = a_5 \cdot I_a^5 + a_4 \cdot I_a^4 + a_3 \cdot I_a^3 + a_2 \cdot I_a^2 + a_1 \cdot I_a + a_0, \quad (2.14)$$

где $a_0 - a_5$ – коэффициенты полинома.

Коэффициенты полиномов для кривой намагничивания и нагрузочных характеристик при различных значениях тока якоря представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициенты полиномов для кривой намагничивания и нагрузочных характеристик

	I_a, A				
	0...300	300...500	500...600	600...700	700...∞
$a_5 (*10^{-15})$	53,918	1,265	1,435	1,578	1,686
$a_4 (*10^{-12})$	-4,227	-6,893	-7,517	-8,034	-8,429
$a_3 (*10^{-8})$	1,097	1,442	1,519	1,582	1,629
$a_2 (*10^{-5})$	-1,314	-1,494	-1,526	1,551	-1,571
$a_1 (*10^{-3})$	8,196	8,462	8,459	8,447	8,436
a_0	0	0	0	0	0

Сила тяги на ободе колеса формируется вследствие электромеханических процессов в двигателе, приведенное в выражении 2.8 и согласно рисунку 2.16.

Механическая часть имитационной модели описывается математическими моделями эквивалентной инерционной массы поезда и сопротивления движению поезда [90, 91].

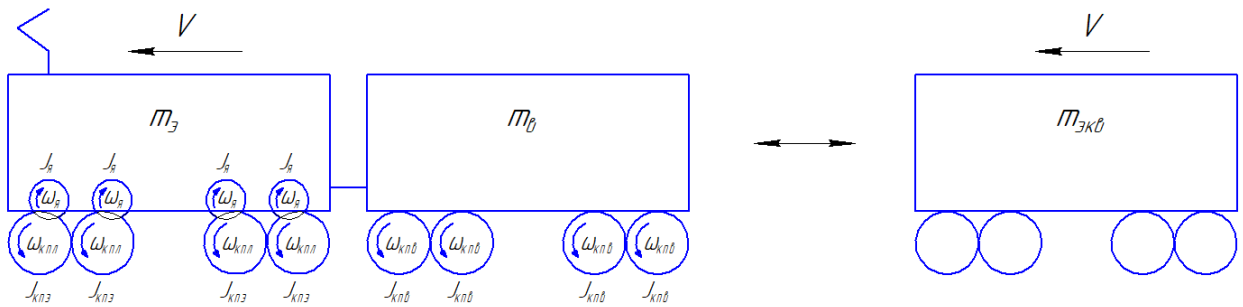


Рисунок 2.16 – Приведение инерционной массы электровоза, вагонов, вращающихся частей колесных пар и якорей двигателей к эквивалентной инерционной массе поезда

Для моделирования нагрузки на электровоз был принят грузовой состав, состоящий из четырехосных полувагонов. Эквивалентная масса поезда, учитывающая массу электровоза, массу состава, а также моменты инерции колесных пар поезда и тяговых электродвигателей (рисунок 2.16), определена согласно балансу кинетической энергии поезда [92]

$$\frac{m_{\text{ЭКВ}} \cdot V^2}{2} = \frac{J_{\text{я}} \cdot \omega_{\text{я}}^2}{2} + \frac{8 \cdot J_{\text{КПЭ}} \cdot \omega_{\text{КПЭ}}^2}{2} + \frac{4 \cdot n_{\text{в}} \cdot J_{\text{КПВ}} \cdot \omega_{\text{КПВ}}^2}{2} + \frac{m_{\text{э}} \cdot V^2}{2} + \frac{m_{\text{в}} \cdot V^2}{2}, \quad (2.15)$$

где $m_{\text{ЭКВ}}$ – приведенная масса поезда с учетом инерции вращающихся осей поезда, кг;

V – скорость поезда, м/с;

$J_{\text{КПЭ}}$ – момент инерции колесной пары электровоза, кг·м²;

$\omega_{\text{КПЭ}}$ – угловая частота вращения колесной пары электровоза, рад/с;

$n_{\text{в}}$ – количество вагонов вагона;

$J_{\text{КПВ}}$ – момент инерции колесной пары вагона, кг·м²;

$\omega_{\text{КПВ}}$ – угловая частота вращения колесной пары вагона, рад/с;

$m_{\text{э}}$ – масса электровоза, кг;

$m_{\text{л}}$ – масса вагона, кг.

Частота вращения тягового двигателя и колесных пар электровоза и вагонов определяется следующими выражениями:

$$\omega_{\text{я}} = \frac{2 \cdot \mu \cdot V}{3,6 \cdot D_6}, \quad (2.16)$$

$$\omega_{\text{кпз}} = \frac{2 \cdot V}{3,6 \cdot D_6}, \quad (2.17)$$

$$\omega_{\text{кпв}} = \frac{2 \cdot V}{3,6 \cdot D_{\text{в}}}, \quad (2.18)$$

где μ – передаточное отношение редуктора;

D_6 – диаметр бандажа, м;

$D_{\text{в}}$ – диаметр колесной пары вагона по кругу катания, м;

Подставив выражения (2.16 – 2.18) в уравнение (2.15) и поделив на значение $(V^2/2)$, определена приведенная инерционная масса поезда

$$m_{\text{эКВ}} = J_{\text{я}} \cdot \left(\frac{2 \cdot \mu}{3,6 \cdot D_6} \right)^2 + 8 \cdot J_{\text{кпз}} \cdot \left(\frac{2}{3,6 \cdot D_6} \right)^2 + 4 \cdot n_{\text{в}} \cdot J_{\text{кпв}} \cdot \left(\frac{2}{3,6 \cdot D_{\text{в}}} \right)^2 + m_{\text{с}} + m_{\text{в}}. \quad (2.19)$$

Сила сопротивления движению поезда определяется следующим уравнением

$$W_{\text{с}} = \left(\frac{m_{\text{л}} \cdot w_0' + m_{\text{с}} \cdot w_0''}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} + i \right) \cdot (m_{\text{л}} + m_{\text{с}}) \cdot g, \quad (2.20)$$

где w_0' – основное удельное сопротивление движению для электровоза 2ЭС6;

w_0'' – основное удельное сопротивление движению для четырехосных полувагонов;

i – уклон профиля пути, ‰.

Основное удельное сопротивление движению электровоза 2ЭС6, согласно [93], определяется выражением (2.21)

$$w_0' = 6,7 + 0,016 \cdot V + 0,0034 \cdot V^2, \quad (2.21)$$

а для для четырехосных полувагонов выражением (2.22)

$$w_0'' = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot V + 0,027 \cdot V^2}{q_0}, \quad (2.22)$$

Одним из трудных участков Свердловской железной дороги для грузовых поездов является перегон Сабик – Сарга вследствие резких подъемов [94]. Профиль пути представлен на рисунке 2.17.

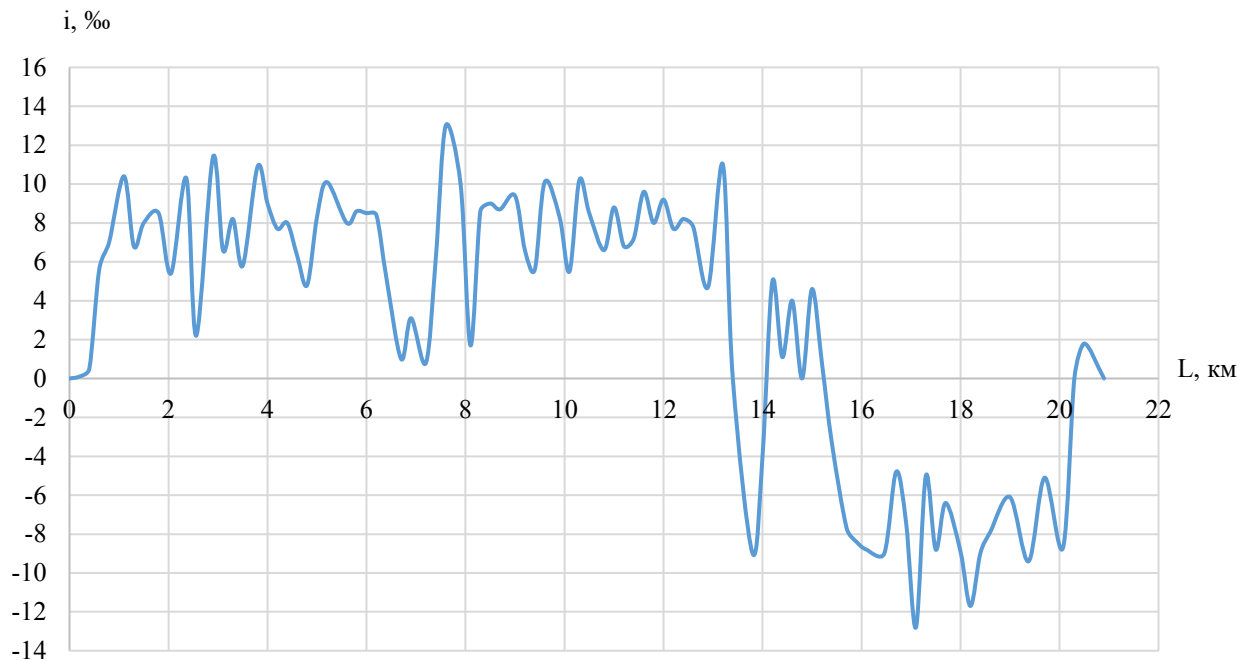


Рисунок 2.17 – График зависимости уклона участка Сабик – Сарга в зависимости от расстояния

В соответствии с вышеописанным, имитационная модель схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 с последовательным возбуждением для параллельного соединения тяговых электродвигателей приведена на рисунке 2.18.

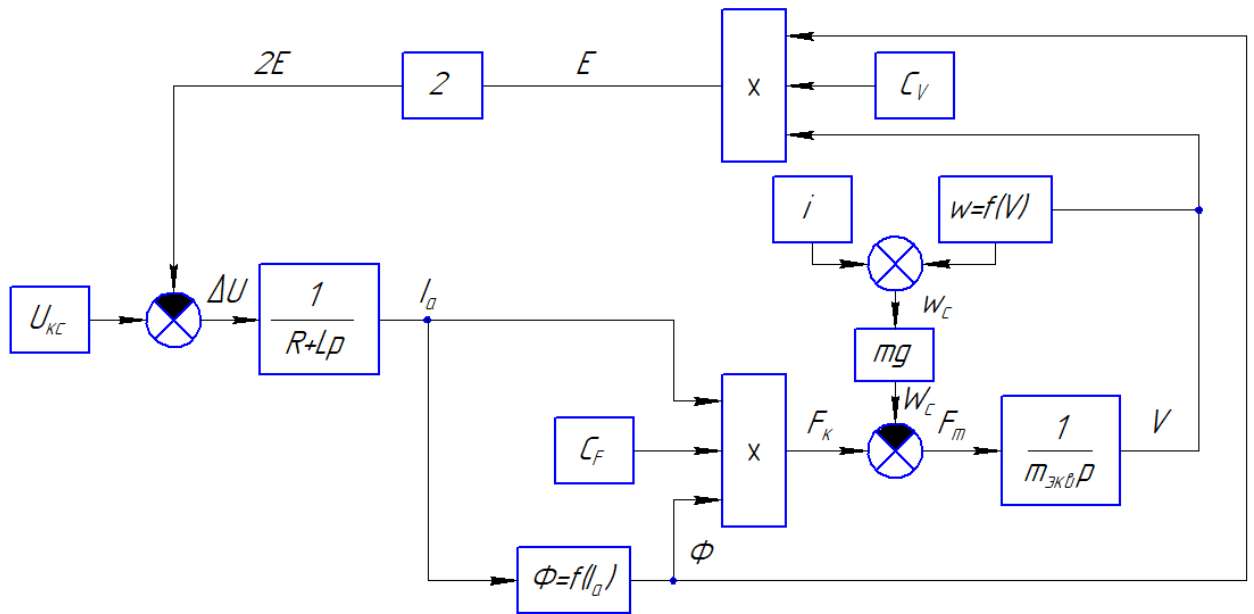


Рисунок 2.18 – Имитационная модель схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 с последовательным возбуждением для параллельного соединения тяговых электродвигателей

Постоянные коэффициенты C_V и C_F зависят от конструкции двигателя и локомотива в соответствии с выражениями (2.23 – 2.24)

$$C_V = \frac{p \cdot N_{\text{пр}} \cdot \mu \cdot 10^3}{3,6 \cdot \pi \cdot a \cdot D_6}, \quad (2.23)$$

$$C_F = \frac{p \cdot N_{\text{пр}} \cdot \mu \cdot \eta_{\text{зп}}}{\pi \cdot a \cdot D_6}, \quad (2.24)$$

где $N_{\text{пр}}$ – число проводников якоря;

$\eta_{\text{зп}}$ – КПД зубчатой передачи.

Для изучения переходных процессов в схеме силовых цепей электровоза 2ЭС6 построена модель его тягового привода в программной среде *MATLAB/Simulink* [95]. Блоки, описывающие электромеханические преобразования в тяговом электродвигателе, заменены на эквивалентный блок *Traction Motor*, входными величинами данного блока являются напряжение в контактной сети $U_{\text{кc}}$ и сила сопротивления движения W_c , выходными величинами яв-

ляются ток якоря, ток возбуждения, электромеханический момент и частота вращения якоря (рисунок 2.19).

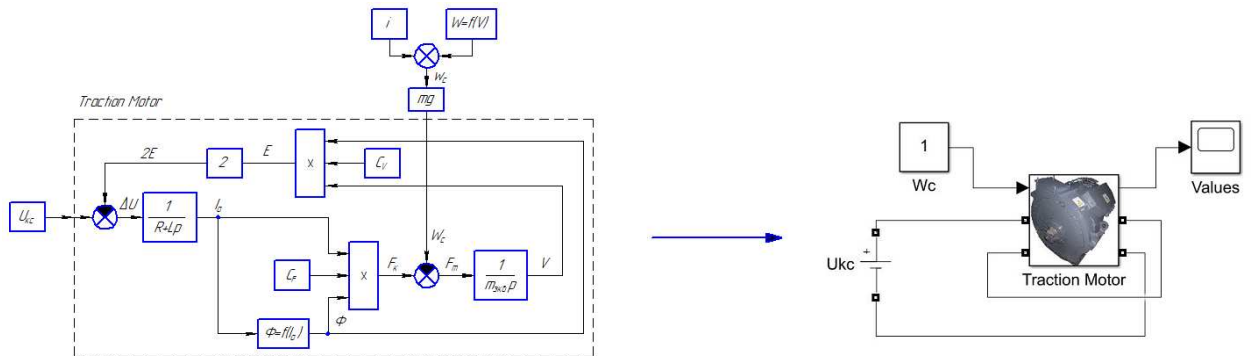


Рисунок 2.19 – Замена структурной схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 на эквивалентный блок *Traction Motor*

Имитационная модель тягового привода электровоза 2ЭС6 с параллельным возбуждением двигателей представлена на рисунке 2.20.

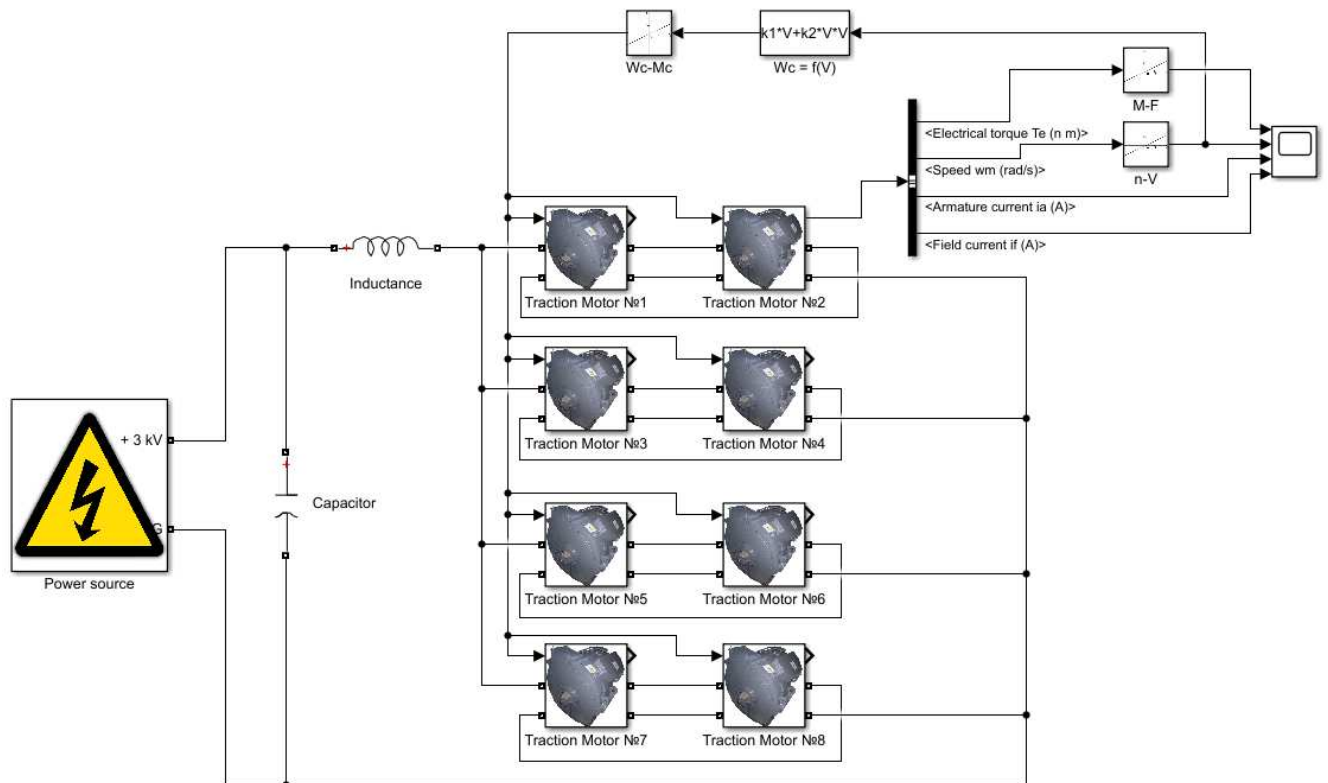


Рисунок 2.20 – Имитационная модель тягового привода электровоза 2ЭС6 в режиме последовательного возбуждения двигателей в среде *MATLAB/Simulink*

Параллельное соединение тяговых электродвигателей относит режим их работы к номинальному, при этом 8 двигателей электровоза делятся на 4 параллельные ветви по 2 последовательно подключенных.

В качестве внешних условий модели тягового привода были приняты следующие значения:

- напряжение контактной сети $U_{\text{кc}} = 3000 \text{ В}$;
- грузовой состав массой 6000 т;
- уклон профиля пути, максимальный подъем согласно рисунку 2.17 составляет 13 ‰.

Элемент *Power source* моделирует напряжение в контактной сети [96]. Его вывод $+3 \text{ kV}$ подключается к плюсовому выводу якоря тягового электродвигателя $A+$. Последовательное возбуждение двигателя предполагает дальнейшее подключение минусового вывода якоря $A-$ к плюсовому выводу обмотки возбуждения $F+$, минусовой вывод $F-$ замыкается на вывод G (*ground*) блока *Power source*.

Блок *Traction Motor* состоит из двух выводов: входной порт TL для задания нагрузки на якорь двигателя и выходной порт m для отображения рабочих характеристик. Порт двигателя m отображает значение электромеханического момента якоря, частоты вращения вала, тока якоря и тока возбуждения. Момент на валу и частота вращения двигателей посредством коэффициентов $M-F$ и $n-V$ пересчитываются в силу тяги и скорость электровоза. Зависимая от скорости поезда сила сопротивления движению подается на порт TL тяговых электродвигателей [97].

Элементы *Inductance* и *Capacitor* формируют пассивный LC -фильтр.

Максимальные колебания напряжения контактной сети достигают значения 400 В (рисунок 2.21).

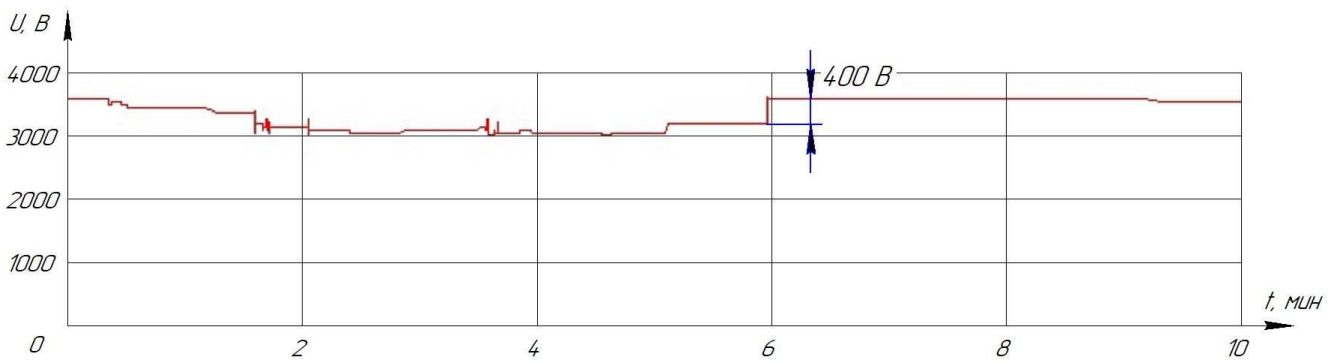


Рисунок 2.21 – Максимальные колебания напряжения в контактной сети

Поэтому напряжение в контактной сети задано суммой следующих составляющих;

- номинальное значение 3000 В (*Nominal*);
- помехи, представленные генератором белого шума (*White_Noise*) с выходным диапазоном напряжения 50 В и временем дискретности 1 с;
- скачок напряжения 400 В в момент времени 100 с (рисунок 2.22).

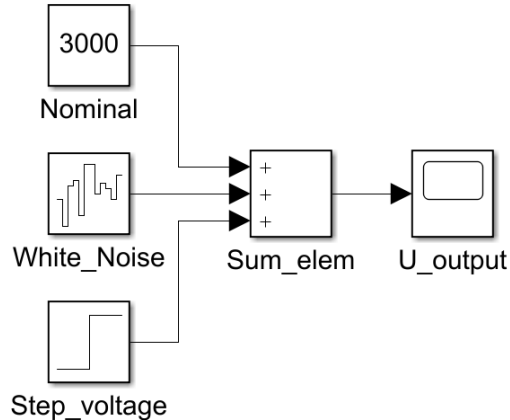


Рисунок 2.22 – Представление напряжения в контактной сети в *MATLAB/Simulink*

Таким образом, временная характеристика входного напряжения электроваза 2ЭС6 представлена на рисунке 2.23.

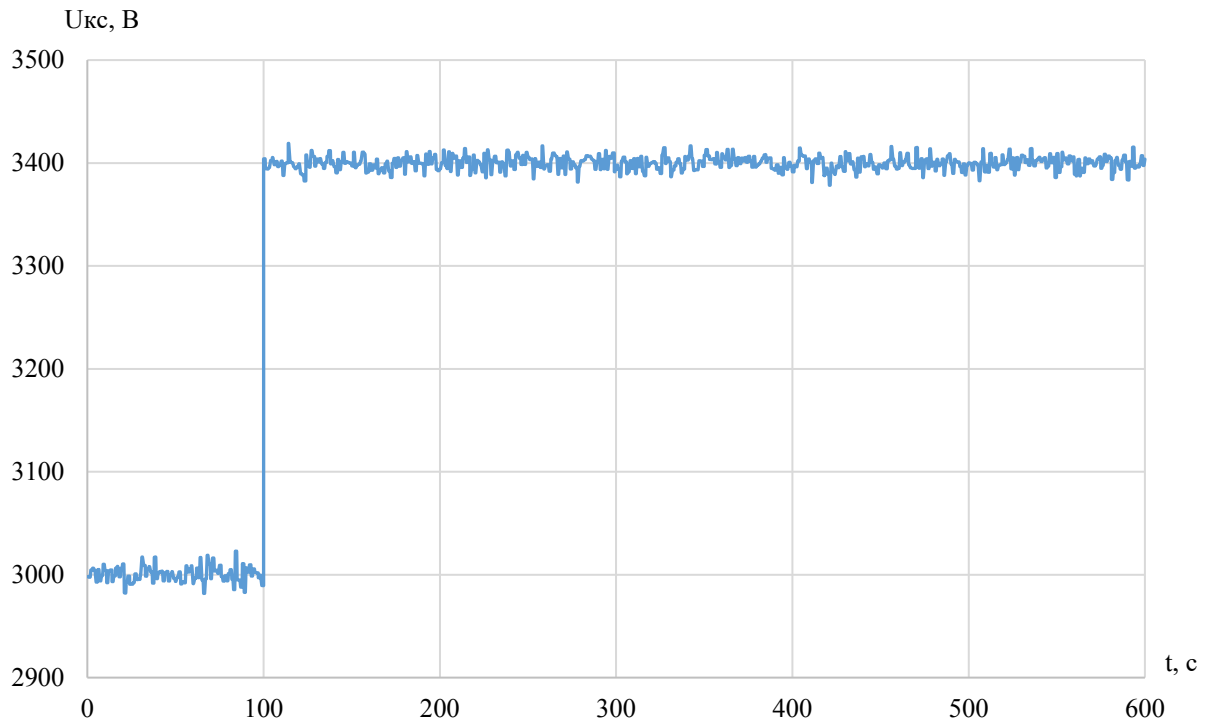


Рисунок 2.23 – Временная характеристика входного напряжения электровоза 2ЭС6

По результатам моделирования временная характеристика тока якоря приведена на рисунке 2.24.

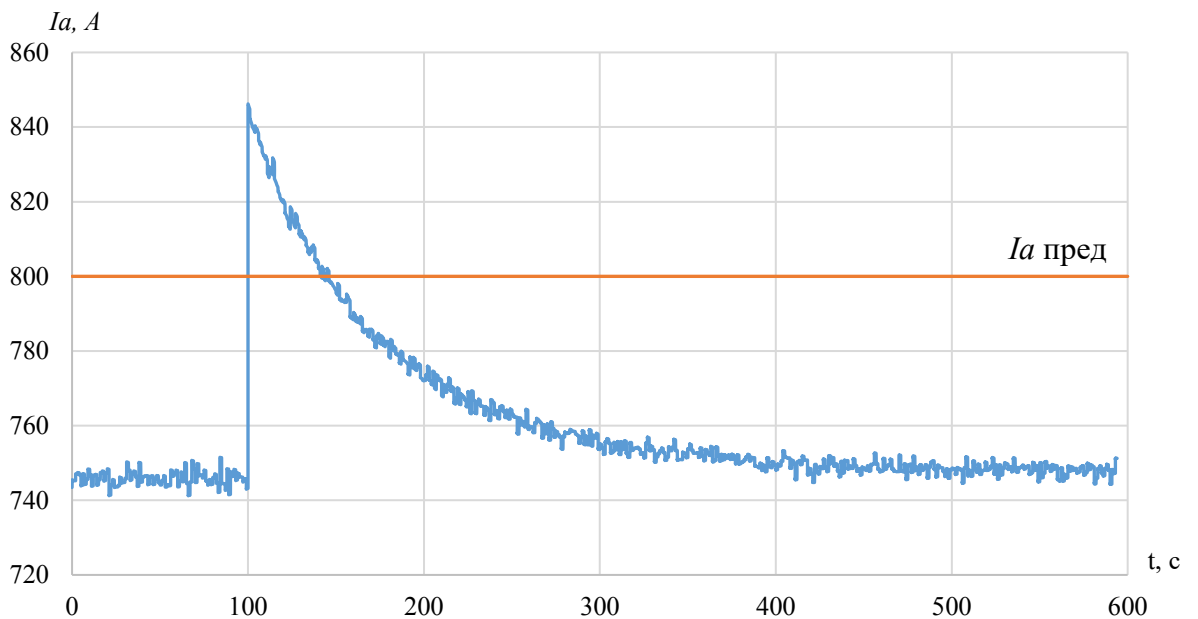


Рисунок 2.24 – Временная характеристика тока якоря для последовательного возбуждения двигателей электровоза 2ЭС6

В соответствии с полученными результатами, при отклонениях напряжения контактной сети в 400 В наблюдается превышение предельного значения тока якоря ($I_a > I_{a \text{ пред}} = 800 \text{ А}$) в течение 42 с. Данный фактор обусловлен следующими причинами:

– значение тока якоря в момент времени до отклонения напряжения составляет 772 А из-за повышенного значения крутизны подъема (13 ‰), вследствие этого пиковое значение тока якоря при отклонении напряжения возрастает до $I_{a \text{ max}} = 844 \text{ А}$;

– при отклонении напряжения возникает энергетический дисбаланс тяговых электродвигателей ввиду инерционности поезда, вследствие этого медленный разгон поезда (рисунок 2.25) приводит к тому, что максимальное значение тока якоря снижается до предельного значения в течение 86 с.

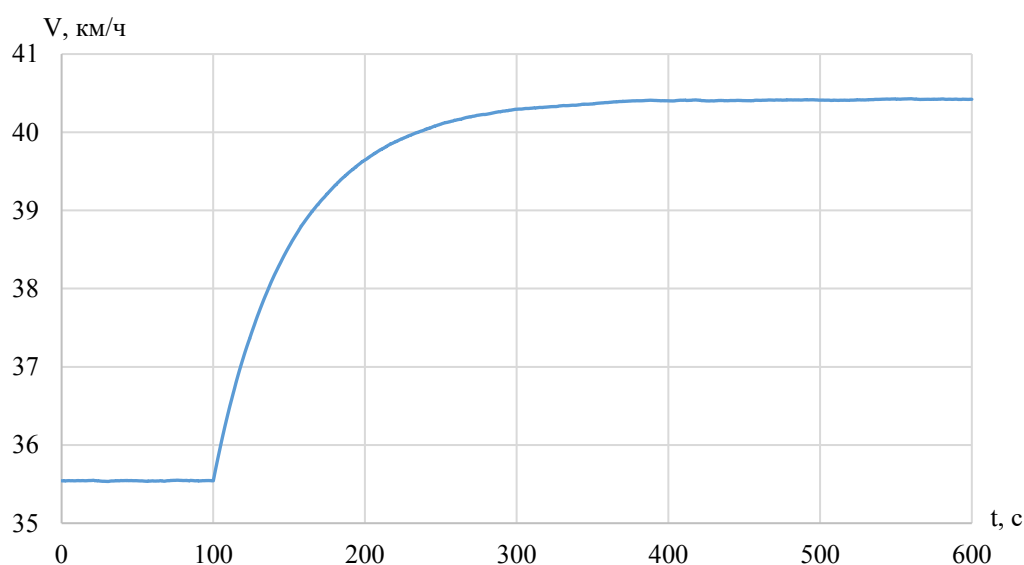


Рисунок 2.25 – Временная характеристика скорости электровоза 2ЭС6 в зависимости от отклонения напряжения в режиме последовательного возбуждения

Стоит отметить, что модель, представленная на рисунке 2.18, требует дальнейшей верификации механической части на основе данных моделирования и данных испытания электровоза.

Режим последовательного возбуждения электровоза 2ЭС6 является аварийным, то есть переход на схему данного возбуждения происходит при неис-

правностях источника питания контура возбуждения. Основным режимом предусмотрен режим независимого возбуждения.

2.5 Выводы по главе 2

1. Для верификации модели тягового электродвигателя построена имитационная модель схемы взаимного нагружения с независимым возбуждением тяговых двигателей. Эта модель основывается на электромеханических преобразованиях энергии между двигателем и генератором.

2. Сравнение теоретических данных модели взаимного нагружения и результатов тепловых испытаний тяговых электродвигателей на стенде взаимной нагрузки с независимым возбуждением двигателей показало, что в неустановившемся режиме расхождение характеристик лежит в диапазоне $\pm 10\%$, в номинальном режиме расхождение составляет $\pm 1\%$, что указывает на уровень достоверности модели тягового электродвигателя.

3. Имитационная модель силовой цепи электровоза 2ЭС6 условно разделена на электрическую и механическую части. Электрическая часть модели построена на основе электромагнитных преобразований в тяговых электродвигателях в виде структурной схемы. Магнитные характеристики двигателя ЭК-810Ч, полученные в точечном виде по результатам периодических испытаний, интерполировались уравнением полинома 5-й степени. Механическая часть модели учитывает влияние кинетической энергии статической массы поезда и инерционной составляющей от вращения колесных пар и якорей тяговых электродвигателей. В качестве механической нагрузки был принят один из трудных участков на Свердловской железной дороге для движения тяжеловесных грузовых поездов перегон Сабик – Сарга из-за наличия крутых подъемов.

4. Согласно регистратору параметра микропроцессорной системы управления и диагностики были получены значения колебаний напряжения в кон-

тактной сети, максимальные значения составили 400 В. При таком отклонении напряжения получено превышение предельного значения тока якоря в течение 86 с. Данный фактор обусловлен тем, что:

- значение тока якоря в момент времени до отклонения напряжения составляет 772 А из-за повышенного значения крутизны подъема (13 ‰), вследствие этого пиковое значение тока якоря возрастает до 880 А;

- при отклонениях напряжения возникает энергетический дисбаланс тяговых электродвигателей ввиду инерционности поезда, вследствие этого медленный разгон поезда приводит к тому, что максимальное значение тока якоря снижается до предельного значения в течение 86 с.

5. Задачи дальнейшего исследования:

- построить имитационную модель силовой цепи электровоза 2ЭС6 с независимым возбуждением тяговых электродвигателей;

- обосновать увеличение максимального напряжения возбуждения для улучшения характеристики тягового тока в электрической цепи электровоза 2ЭС6.

3 УЛУЧШЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6 ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

3.1 Построение имитационной модели схемы независимого возбуждения электровоза 2ЭС6

Согласно тяговой характеристике (рисунок 2.2), регулирование электровоза большую часть времени осуществляется в режиме постоянства мощности как более экономичного режима по сравнению с неэкономичным режимом постоянства силы тяги вследствие потерь энергии на пусковых реостатах (3.1)

$$P_{\text{д}} = F_{\text{к}} \cdot V_{\text{л}} = (C_F \cdot \Phi \cdot I_a \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{эл}}) \cdot \left(\frac{U_{\text{д}} - I_a \cdot \sum r_{\text{д}}}{C_V \cdot \Phi} \right) = \text{const.} \quad (3.1)$$

Согласно уравнению (3.1), возможность регулирования скорости электровоза с постоянством мощности обеспечивается удержанием на постоянном уровне напряжения двигателей и тока якоря двигателей, так как остальные переменные уравнения являются постоянными величинами [87].

В таком случае, для регулирования скорости, учитывая требование постоянства напряжения двигателей и тока якоря двигателей, единственным вариантом является управление магнитным потоком, представленным в (2.14)

$$V_{\text{л}} = \left(\frac{U_{\text{д}} - I_a \cdot \sum r_{\text{д}}}{C_V \cdot \Phi} \right) = \text{var.} \quad (3.2)$$

На электровозах постоянного тока без независимого питания обмоток возбуждения двигателей распространенным способом регулирования магнит-

ного потока является шунтирование обмоток возбуждения двигателя секциями резисторов [98] (рисунок 3.1).

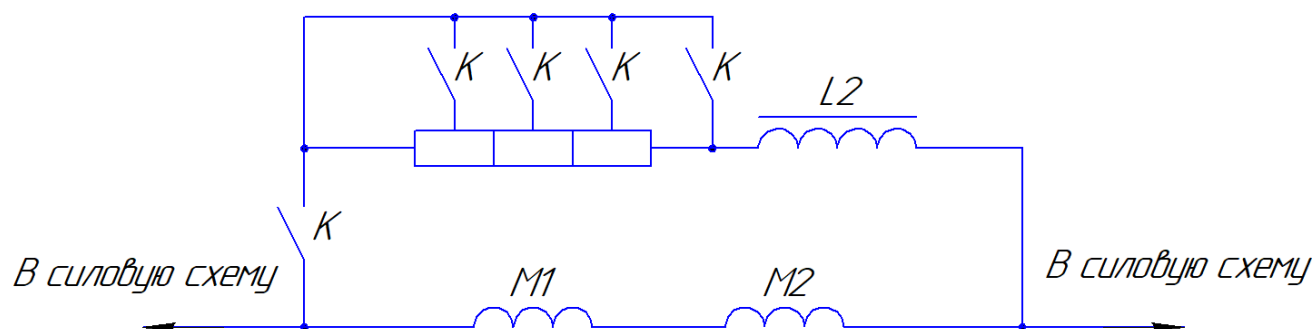


Рисунок 3.1 – Схема регулирования магнитного потока шунтированием обмотки возбуждения двигателя секциями резисторов

Данный способ регулирования, несмотря на простоту управления катушками контакторов, приводит к дополнительным потерям мощности, рассеиваемой на секциях резисторов, что непосредственно отражается на энергоэффективности электровоза.

На электровозе 2ЭС6 не предусмотрено шунтирования обмоток возбуждения, поэтому в режиме последовательного возбуждения отсутствует возможность регулирования силы тяги магнитным потоком. Следовательно, данный режим применяется при аварийных ситуациях, когда источник питания контура возбуждения выходит из строя. Но даже и в этом случае, в соответствии с рисунком 2.24, при отклонении напряжения максимальные броски тока якоря превышают предельные значения.

Особенность независимого возбуждения электровоза 2ЭС6 заключается во включении источника питания в ветвь обмоток возбуждения тягового электродвигателя. Схема силовых цепей контура питания якорей и обмоток независимого возбуждения двигателей представлена на рисунке 3.2.

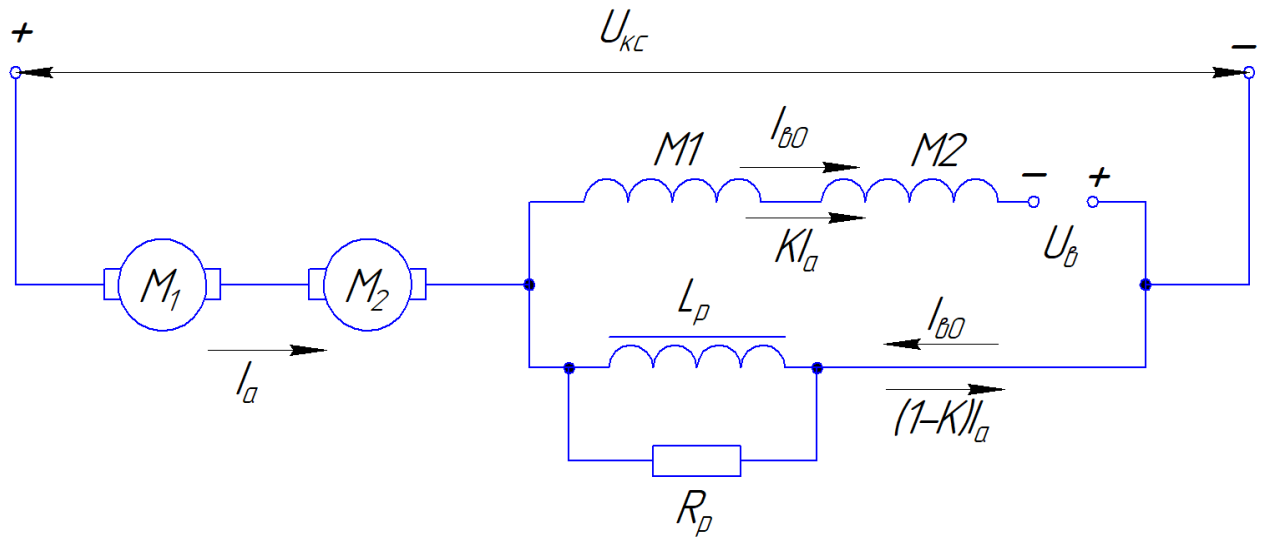


Рисунок 3.2 – Контур питания якорей и обмоток независимого возбуждения тяговых двигателей электровоза 2ЭС6

Ток возбуждения тяговых электродвигателей определяется выражением

$$I_b = I_{b0} + K \cdot I_a. \quad (3.3)$$

Источник питания контура возбуждения, в соответствии с уравнением (2.15), не является непосредственным регулятором тока возбуждения, на ток возбуждения также оказывает влияние тока якоря. Поэтому уравнение (3.3) преобразовывается к виду

$$\Phi = a_5 \cdot (I_{b0} + K \cdot I_a)^5 + a_4 \cdot (I_{b0} + K \cdot I_a)^4 + a_3 \cdot (I_{b0} + K \cdot I_a)^3 + a_2 \cdot (I_{b0} + K \cdot I_a)^2 + a_1 \cdot (I_{b0} + K \cdot I_a) + a_0. \quad (3.4)$$

Коэффициенты уравнения (3.4) представлены в таблице 2.2.

Ток якоря непосредственно зависит от нагрузки на тяговые электродвигатели – профиля пути, массы состава, то есть ток не является величиной, которую возможно регулировать в процессе движения электровоза для поддержания силы тяги, следовательно, ток якоря не является регулирующей величиной в соответствии с рисунком 2.18. Однако предельное значения тока якоря ограни-

чивает систему управления при поддержании определенной силы тяги заданием тока возбуждения $I_{в0}$.

Эта величина, в соответствии с рисунком 2.14, является регулирующим сигналом z по стабилизации воздействия всех сигналов возмущений на объект регулирования. В соответствии с этим, структурная схема тягового электродвигателя представлена на рисунке 3.3.

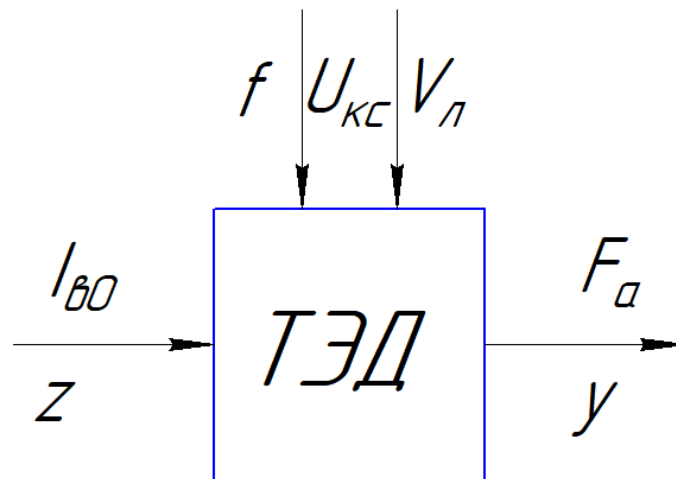


Рисунок 3.3 – Структурная схема тягового электродвигателя

Согласно рисунку 3.3, объект – тяговый электродвигатель имеет несколько входных сигналов. В таком случае элемент считается линейным, что дает основание представить его как несколько независимых каналов преобразования по каждому из входных сигналов, а общую выходную величину как суперпозицию результатов этих преобразований (рисунок 3.4).

Передаточная функция W_B определяется соотношением

$$W_B = \frac{F_a}{I_{в0}} = \frac{C_F I_a \cdot (a_5 \cdot (I_{в0} + K \cdot I_a)^5 + a_4 \cdot (I_{в0} + K \cdot I_a)^4 + a_3 \cdot (I_{в0} + K \cdot I_a)^3)}{I_{в0}} + \frac{C_F I_a \cdot (a_2 \cdot (I_{в0} + K \cdot I_a)^2 + a_1 \cdot (I_{в0} + K \cdot I_a) + a_0)}{I_{в0}}. \quad (3.5)$$

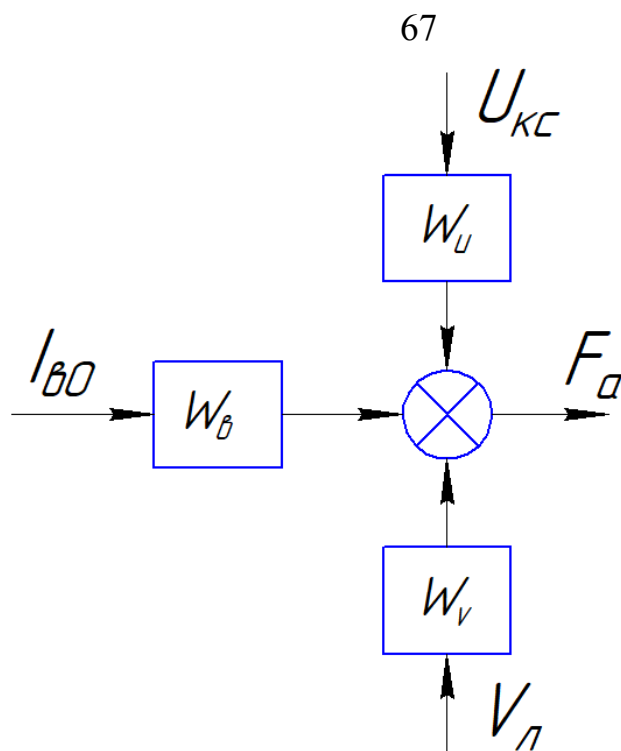


Рисунок 3.4 – Структурная схема тягового электродвигателя с независимыми каналами преобразования по каждому из входных сигналов

Математическое преобразование уравнения (3.5) ввиду высокой степени полинома оказывается труднодостижимым.

Передаточная функция W_v описывается выражением

$$W_v = \frac{F_a}{V_{л}} = \frac{(C_F \cdot \Phi \cdot I_a \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{зп})}{\left(\frac{U_{л} - I_a \cdot \sum r_{л}}{C_V \cdot \Phi} \right)} \quad (3.6)$$

Математическое преобразование уравнения (3.6) представляется еще более сложным при подстановке выражения магнитного потока из уравнения (3.4).

Следовательно, структурная схема, приведенная на рисунке 3.4, преобразована к более «низкому» уровню представления с отображением на ней всех электромеханических преобразований тягового электродвигателя (рисунок 3.5).

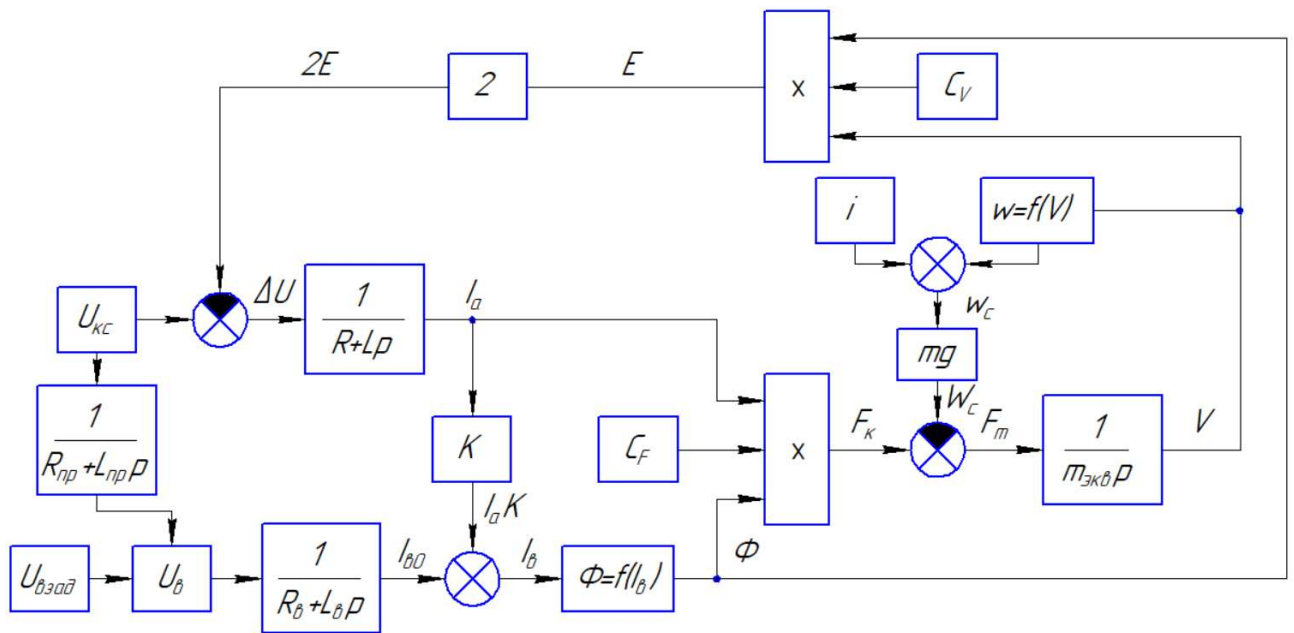


Рисунок 3.5 – Имитационная модель схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 с независимым возбуждением для параллельного соединения двигателей

Входными данными схемы электромеханических преобразований, представленной на рисунке 3.5, являются:

- напряжение контактной сети;
- напряжение контура возбуждения;
- сила сопротивления движения;
- постоянные коэффициенты C_V и C_F .

Напряжение контактной сети и сила сопротивления движению – это величины, постоянно изменяющиеся в процессе движения электровоза и имеющие абсолютно случайный характер. Поэтому в процессе моделирования в зависимости от задачи исследования данные величины задаются либо константами (настройка коэффициентов регулирования, проверка физических параметров), либо случайными числами в определенном диапазоне (проверка работы системы управления в динамических режимах).

Напряжение возбуждения, представленное на рисунке 3.5, преобразуется из напряжения контактной сети преобразователем собственных нужд. Согласно рисунку 1.14, инвертор UZ преобразует постоянное напряжение контактной сети в переменное напряжение, подающееся на первичную обмотку трансформатора.

тора [99]. Принципиальная схема преобразователя собственных нужд представлена на рисунке 3.6.

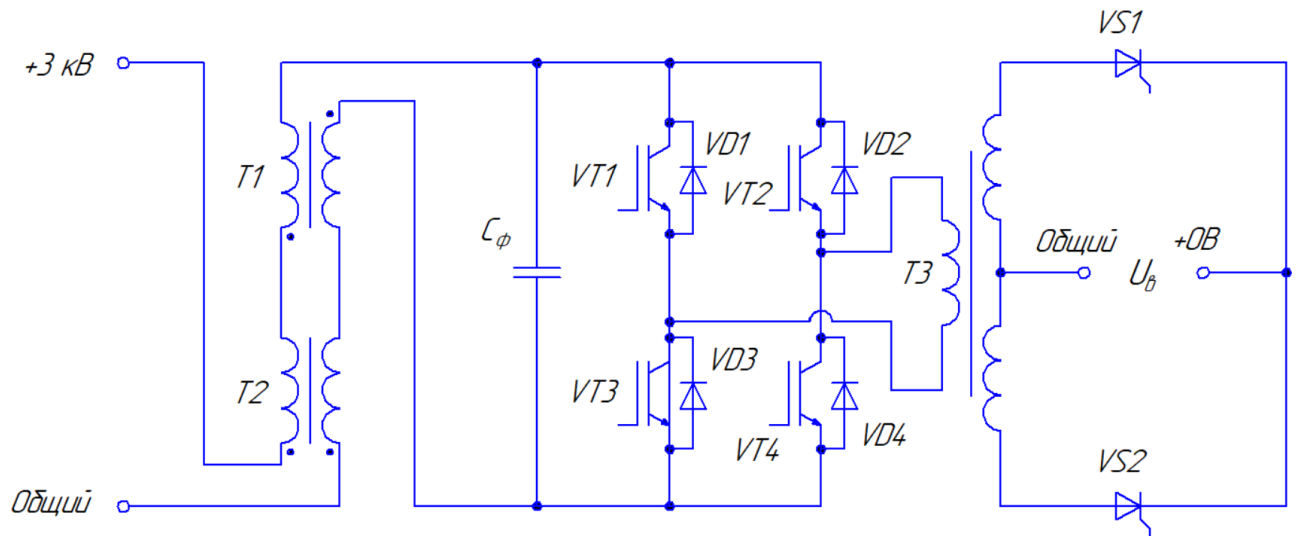
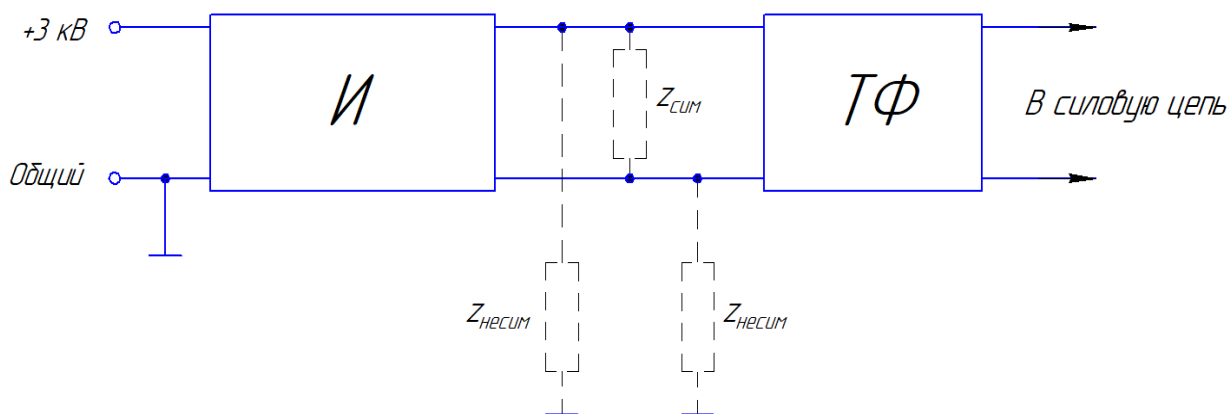


Рисунок 3.6 – Принципиальная схема преобразования напряжения контактной сети в напряжение источника контура возбуждения тяговых электродвигателей

При подключении преобразователя собственных нужд к контактной сети дроссели $T1$, $T2$ и конденсатор C_ϕ представляют собой помехоподавляющий фильтр. Так как минусовая цепь электровоза 2ЭС6 соединена с корпусом обратным диодом, помехоподавляющий фильтр устраняет не только симметричные помехи, возникающие между положительным и отрицательным проводом, но также и несимметричные помехи, возникающие между проводниками и корпусом (рисунок 3.7) [100].

На инвертор подается напряжение контактной сети. Транзисторы $VT1-4$ формируют, согласно заложенным в систему управления алгоритмам, синусоидальное напряжение, которое подается на трансформатор $T3$, понижающий значение переменного напряжения до вторичного напряжения возбуждения преобразователя собственных нужд. Контур возбуждения представляет собой схему двухполупериодного выпрямителя с выводом общей точки вторичной обмотки трансформатора, являющейся источником питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей.



И – инвертор; ТФ – трансформатор; $Z_{\text{сим}}$ – комплексное сопротивление симметричной помехе; $Z_{\text{несим}}$ – комплексное сопротивление несимметричной помехе;

Рисунок 3.7 – Структурная схема распространения симметричных и несимметричных помех

Напряжение возбуждения регулируется изменением угла открытия тиристоров $VS1-2$ [101] (рисунок 3.8).

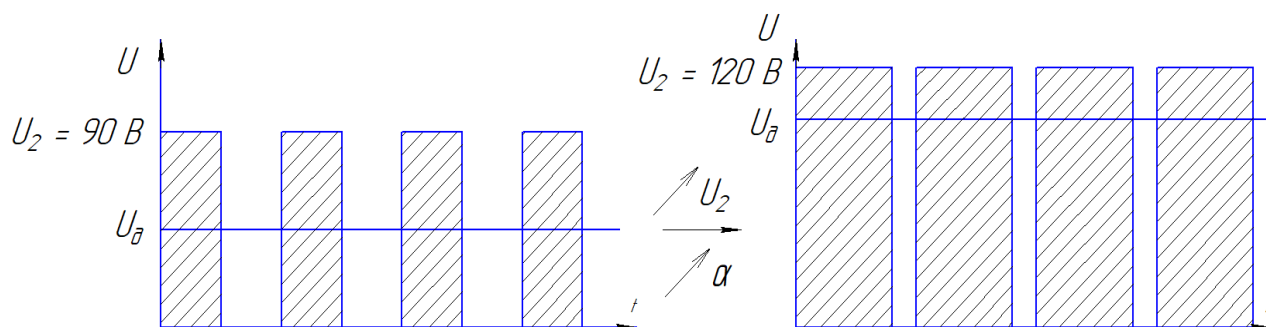


Рисунок 3.8 – Увеличение действующего напряжения путем увеличения открытия угла тиристоров

Характеристики каналов для питания обмоток возбуждения представлены в таблице 3.1.

Числовые данные таблицы 3.1 формируют требования к токовым переходным процессам по амплитуде тока и по постоянной времени.

Таблица 3.1 – Технические характеристики каналов для питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей [99]

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Амплитуда установившегося напряжения, В	90
2	Максимальный ток в длительном режиме, А	800
3	Максимальный ток в кратковременном режиме, не более 1 с, А	850

Имитационная модель тягового привода электровоза 2ЭС6 в режиме независимого возбуждения двигателей, построенная в программной среде *MATLAB/Simulink*, представлена на рисунке 3.9.

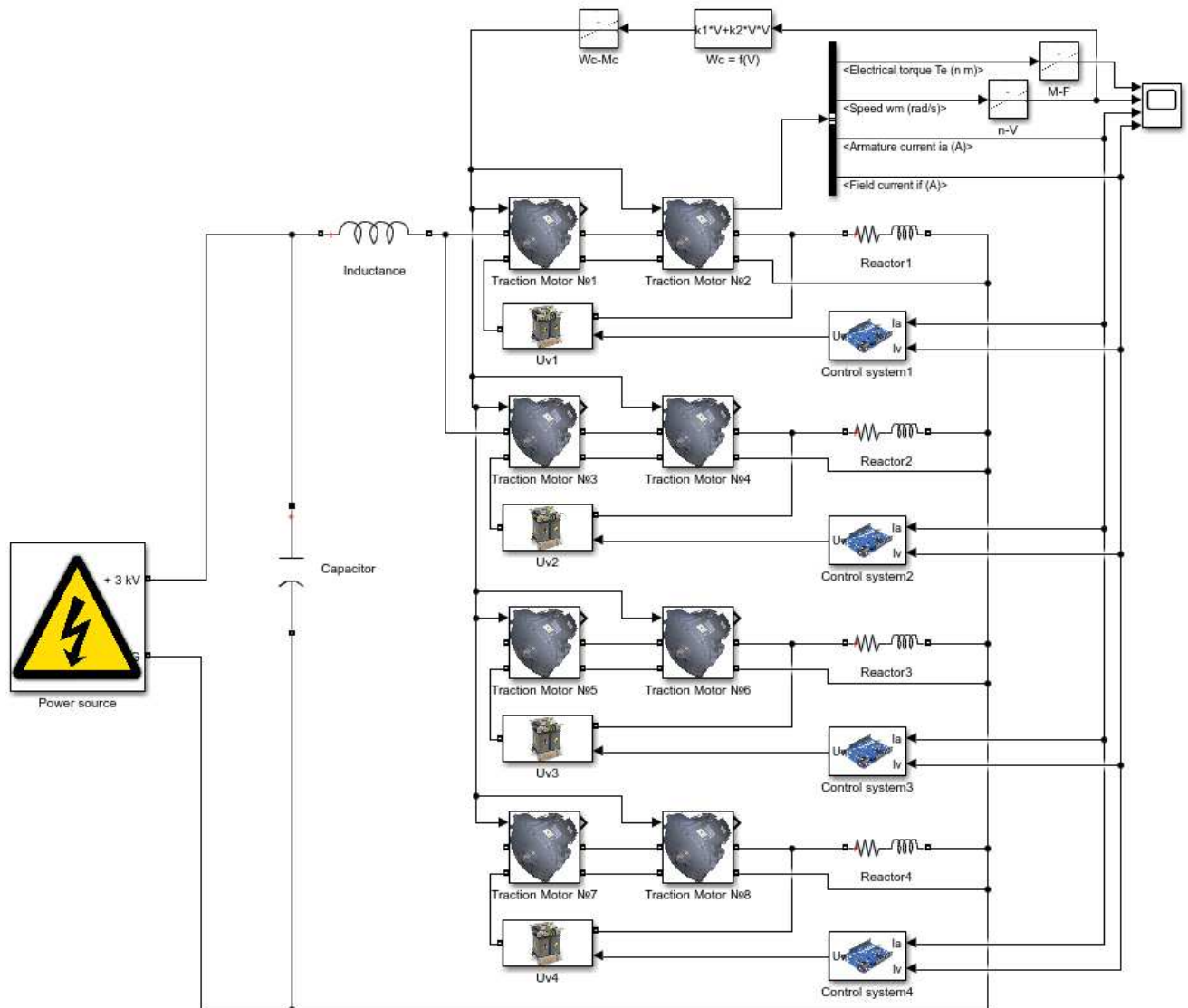


Рисунок 3.9 – Имитационная модель тягового привода электровоза 2ЭС6 в режиме независимого возбуждения двигателей в среде *MATLAB/Simulink*

Модель, приведенная на рисунке 3.9, имитирует работу электровоза в режиме параллельного соединения тяговых электродвигателей, так как в данном режиме их напряжение равно номинальному.

В качестве внешних условий модели тягового привода были приняты следующие значения:

- напряжение контактной сети $U_{\text{кc}} = 3000 \text{ В}$;
- грузовой состав массой 6000 т;
- уклон профиля пути, максимальный подъем согласно рисунку 2.17 составляет 13 ‰.

Имитационная модель, представленная на рисунке 3.9, содержит элементы из модели силовой цепи электровоза 2ЭС6 с последовательным возбуждением (рисунок 2.20). Отличительным признаком является система управления током возбуждения тяговых электродвигателей. В модели данные по току якоря I_a и току возбуждения I_v подаются в систему управления *Control system*, в которой система импульсного регулирования формирует напряжение возбуждения U_v [102]. Это напряжение подается на вывод обмотки возбуждения первого тягового электродвигателя $+F$. Далее, соединяясь с обмоткой возбуждения второго двигателя и с реактором *Reactor*, образуется контур возбуждения: ($U_{v1} (+) - \text{Traction Motor } \text{№} 1 (+F) - \text{Traction Motor } \text{№} 1 (-F) - \text{Traction Motor } \text{№} 2 (+F) - \text{Traction Motor } \text{№} 2 (-F) - \text{Reactor} - U_{v1} (+)$).

Элемент *Power source* задает величины отклонений напряжения $\Delta U = 400 \text{ В}$ аналогично имитационной модели с последовательным возбуждением. Производилось моделирование работы тягового электропривода для максимального значения напряжения возбуждения $U_v = 90 \text{ В}$. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.10.

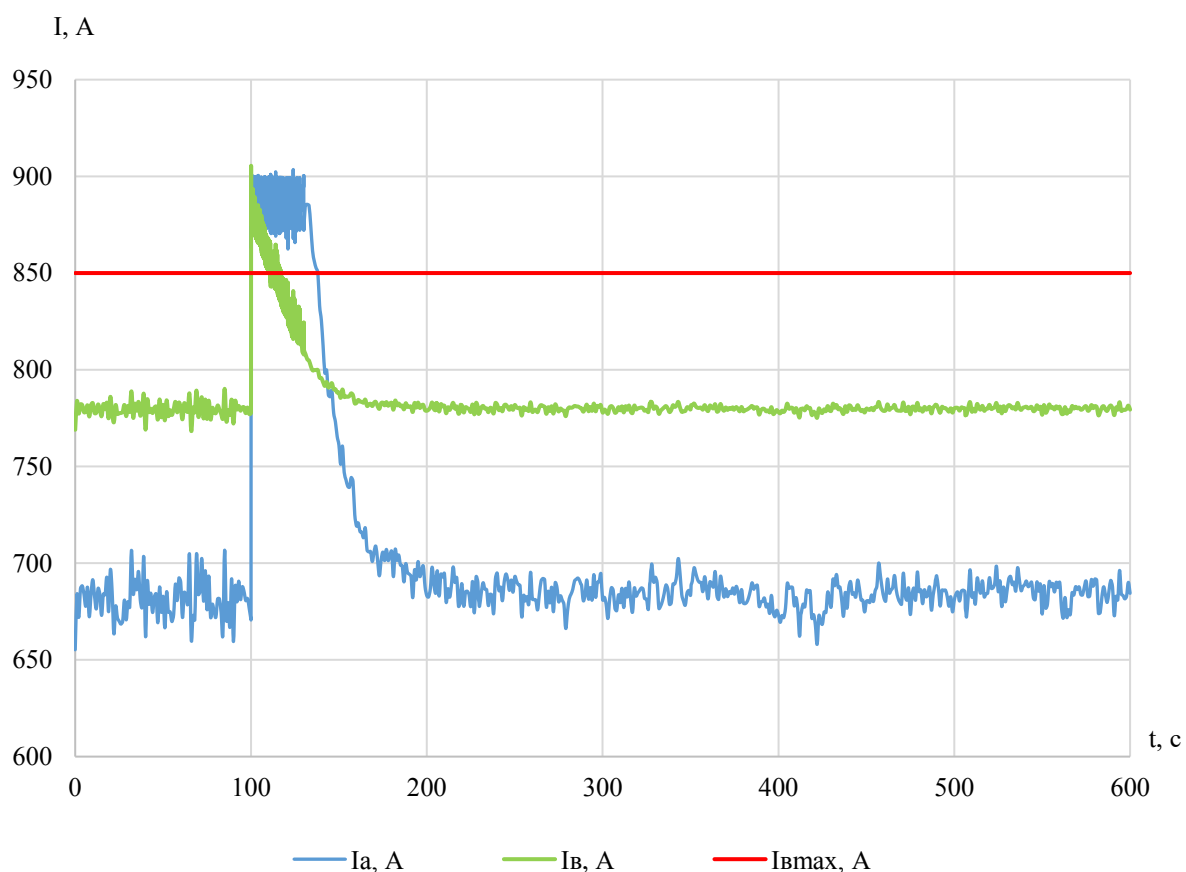


Рисунок 3.10 – Временные характеристики тока якоря и тока возбуждения для режима независимого возбуждения двигателей электровоза 2ЭС6

В соответствии с полученными результатами, при отклонении напряжения контактной сети в 400 В ток якоря поддерживается на уровне, не превышающем 900 А в течение 44 с. Также наблюдается превышение предельного значения тока возбуждения ($I_{в} > I_{в \text{ пред}} = 850 \text{ А}$) в течение 19 с. Снижение до предельных значений тока якоря и тока возбуждения в длительном режиме ($I_{а \text{ пред}} = I_{в \text{ пред}\infty} = 800 \text{ А}$) составляет 44 с и 38 с соответственно. Данный фактор обусловлен следующими причинами:

- значение тока якоря в момент времени до отклонения напряжения составляет 670 А из-за повышенного значения крутизны подъема (13 ‰), тока возбуждения – 777 А, вследствие этого пиковые токовые значения возрастают;
- при отклонении напряжения возникает энергетический дисбаланс тяговых электродвигателей ввиду инерционности поезда, а также включения в цепь возбуждения индуктивного реактора, замедляющего изменение тока якоря и

тока возбуждения. График разгона поезда при отклонении напряжения приведена на рисунке 3.11.

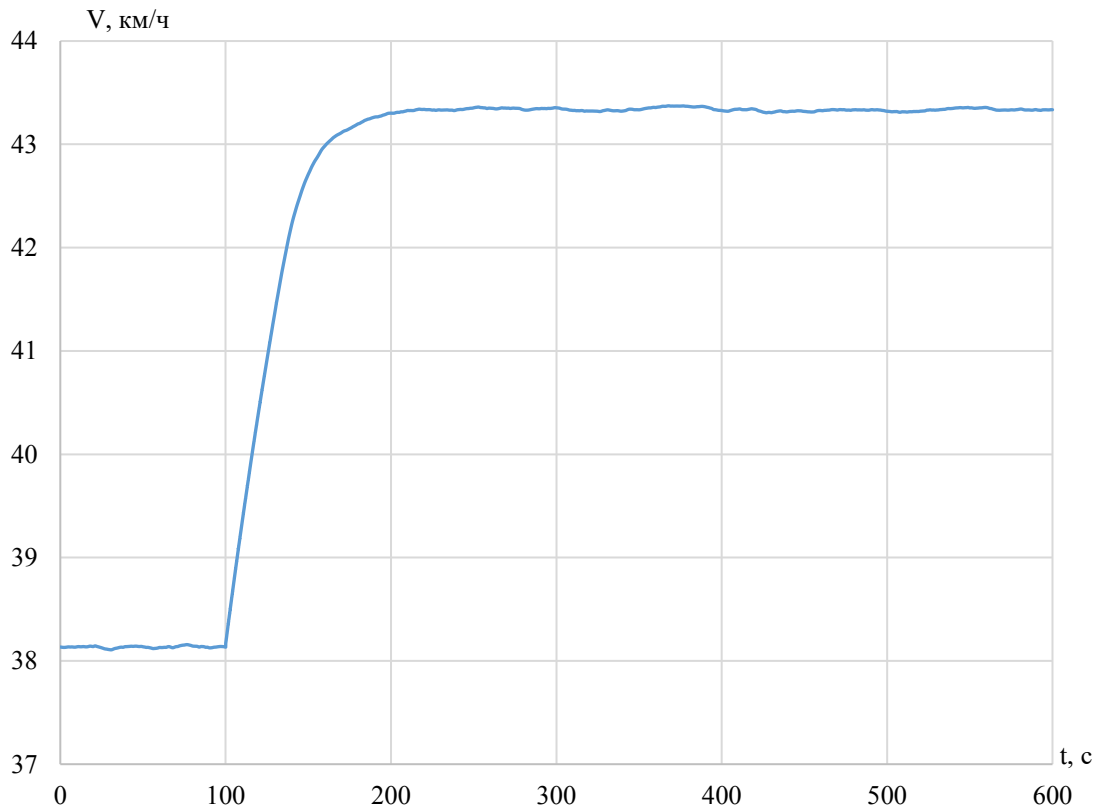


Рисунок 3.11– Временная характеристика скорости электровоза 2ЭС6 в зависимости от отклонения напряжения в режиме независимого возбуждения

Основным механизмом защиты тяговых электродвигателей от переброса дуги по коллектору является поддержание токов якоря и тока возбуждения ниже предельных значений. Однако в реальных условиях эксплуатации выполнение данного требования оказывается труднодостижимым. В соответствии с этим необходимо уменьшать время броска тока якоря и тока возбуждения выше предельных значений [103].

В режиме последовательного возбуждения отсутствуют инструменты регулирования тяговым приводом. В режиме независимого возбуждения такой регулирующей величиной является напряжение возбуждения.

3.2 Совершенствование элементов преобразователя собственных нужд

Для повышения эффективности регулирования тока в силовой цепи электроваза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы потребуется усовершенствование преобразователя собственных нужд. Согласно [45], ток якоря тяговых электродвигателей электроваза 2ЭС6 при параллельном соединении двигателей определяется выражением

$$I_a = \frac{U_{\text{кв}} - 2 \cdot c_V \cdot V_{\text{л}} \cdot \Phi}{\sum r_{\text{д}}}. \quad (3.7)$$

Режим независимого возбуждения позволяет независимо от тока якоря управлять значением магнитного потока. При отклонении напряжения в контактной сети возрастает ток якоря, регулирование происходит за счет увеличения тока возбуждения (3.8)

$$\uparrow I_a = \frac{\uparrow\uparrow U_{\text{кв}} - 2 \cdot c_V \cdot V_{\text{л}} \cdot \uparrow\uparrow \Phi}{\sum r_{\text{д}}}. \quad (3.8)$$

Однако вследствие наличия индуктивных элементов в цепи контура возбуждения (рисунок 3.12) ток возбуждения при увеличении напряжения возбуждения до максимального значения 90 В возрастает не сразу.

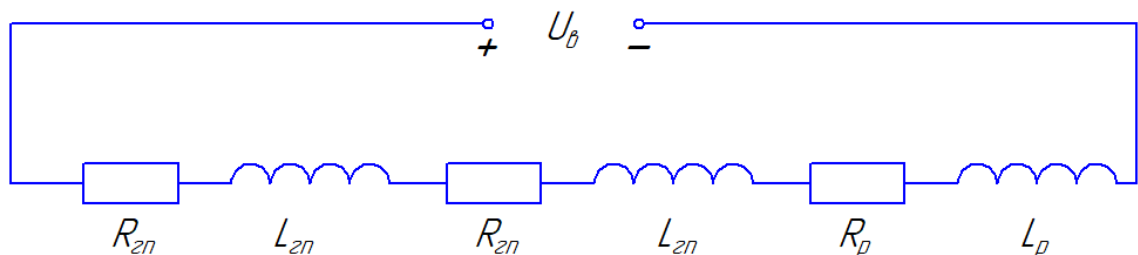


Рисунок 3.12– Схема замещения контура независимого возбуждения электроваза 2ЭС6

В номинальном установившемся режиме напряжение контактной сети составляет $U_B = 3000$ В, напряжение контура возбуждения $U_B = 25$ В.

В момент времени $t = 1$ с происходит отклонение напряжения в контактной сети (рисунок 3.13), следовательно, система управления возбуждением двигателей для поддержания значения тока якоря в допустимом диапазоне увеличивает ток возбуждения путем задания напряжения возбуждения $U_B = 90$ В [104], при этом ток возбуждения ограничивается предельным значением, представленным в таблице 3.1.

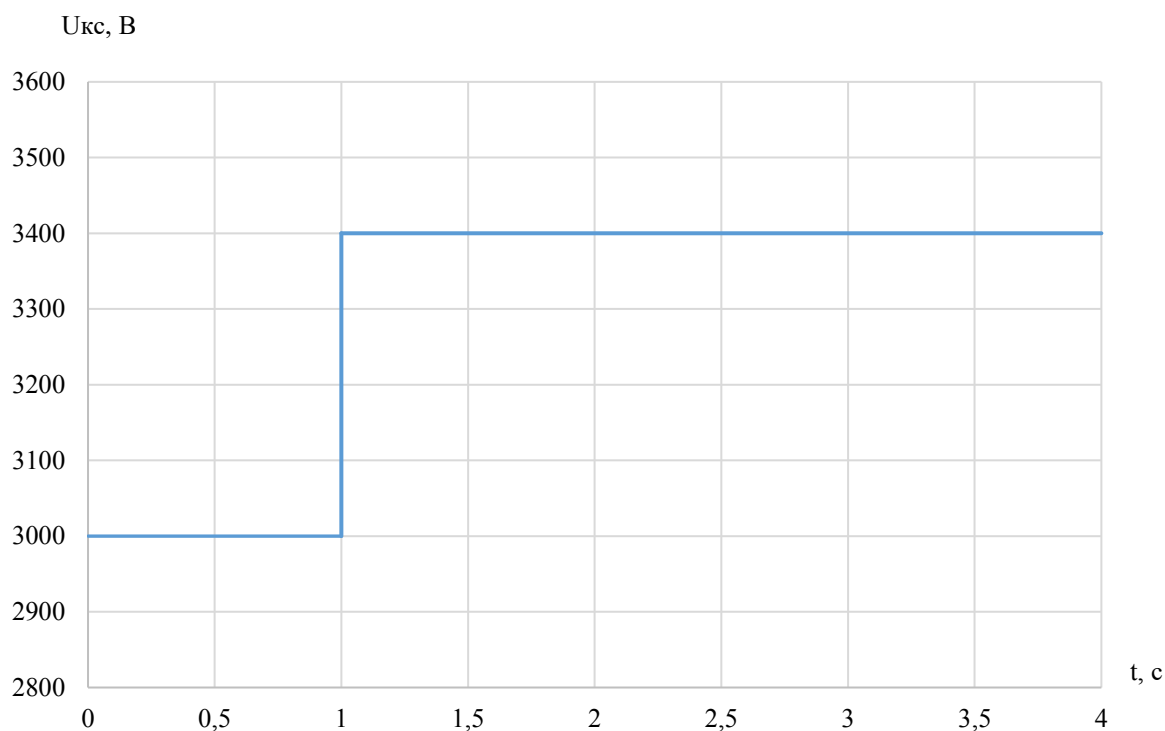


Рисунок 3.13 – Отклонение напряжения в контактной сети

При увеличении допустимого напряжения возбуждения и задании значения $U_B = 120$ В уменьшается время достижения током возбуждения своего предельного значения [105]. Временные характеристики тока возбуждения при постоянном задании различных значений напряжения возбуждения представлены на рисунке 3.14.

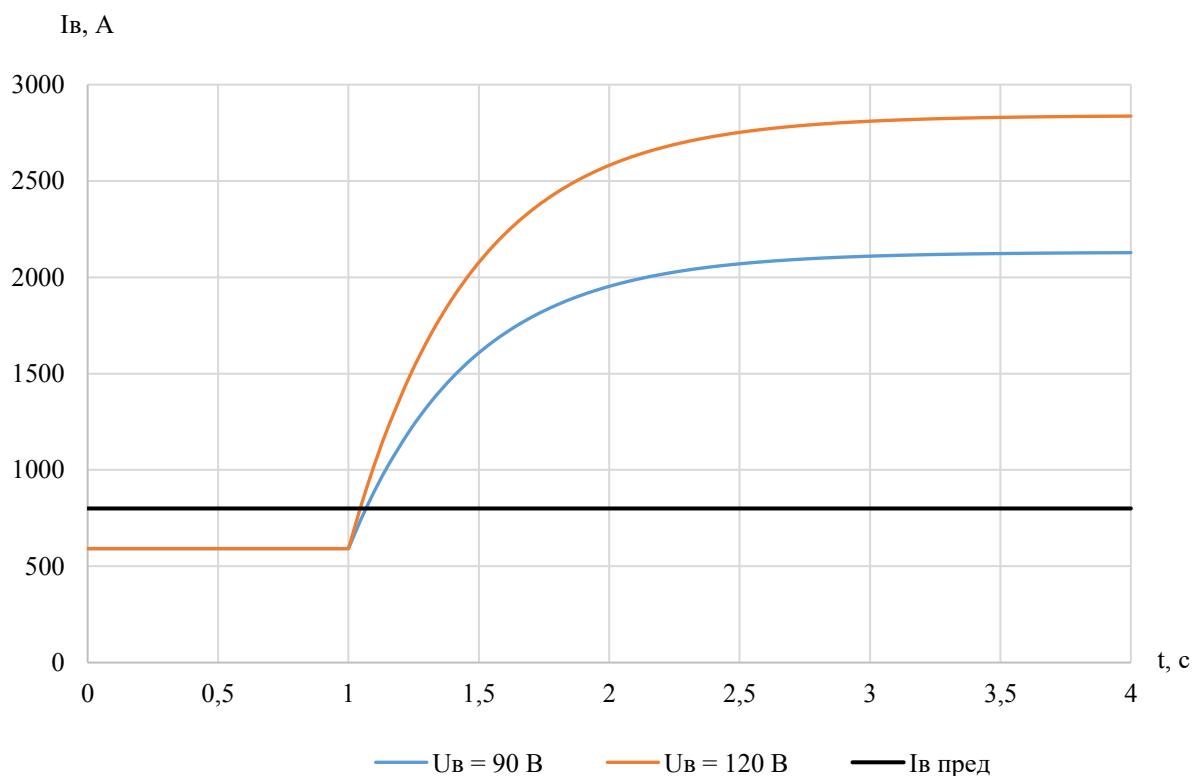


Рисунок 3.14 – Временные характеристики тока возбуждения при постоянном задании различных значений напряжения возбуждения

При ограничении тока возбуждения своим предельным значением $I_{в} = 800$ А временные характеристики представлены на рисунке 3.15. Увеличение напряжения возбуждения до 90 В, согласно таблице 3.1, позволяет достичь предельного значения тока возбуждения $I_{в} = 800$ А в течение 77 мс, после чего для поддержания этого предельного значения напряжение возбуждения устанавливается $U_{в} = 33,8$ В. При увеличении напряжения возбуждения до 120 В время достижения током возбуждения своего предельного значения составляет 53 мс. Увеличение напряжения возбуждения на 30 В позволяет уменьшить время начала регулирования на 24 мс.

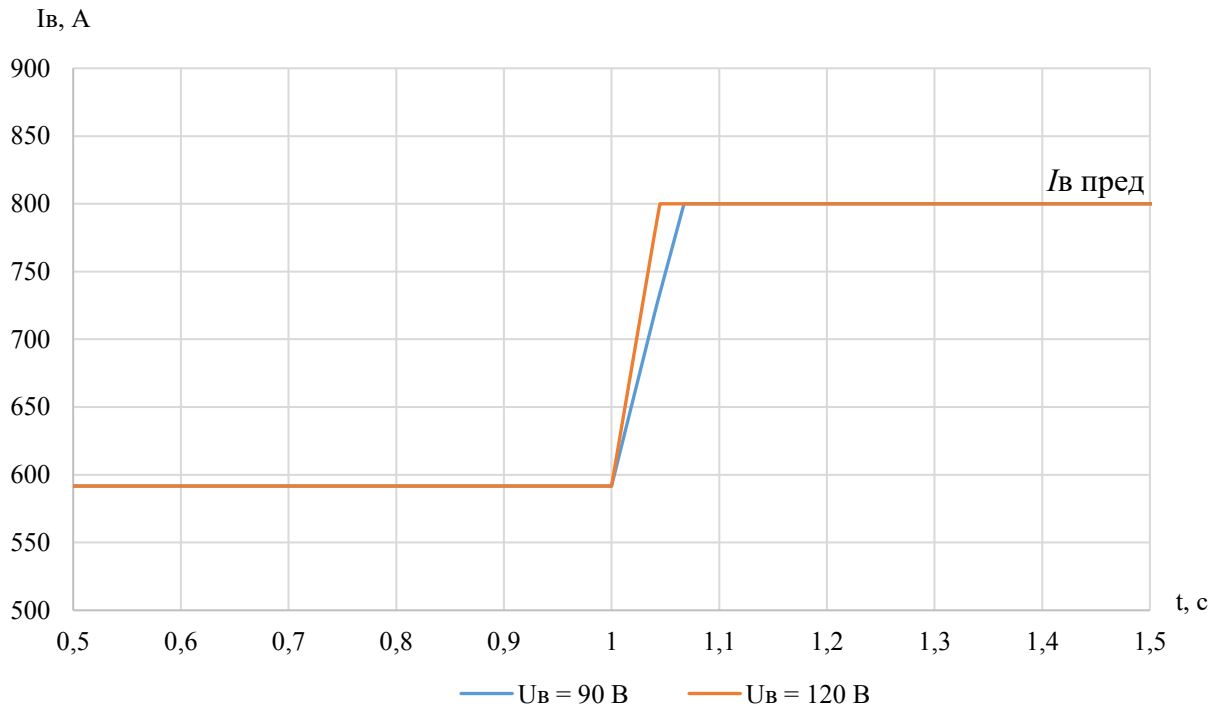


Рисунок 3.15 – Временные характеристики тока возбуждения при различных значениях напряжения возбуждения

Способом увеличения напряжения возбуждения является уменьшение коэффициента трансформации трансформатора преобразователя собственных нужд (3.9), то есть предполагается либо уменьшение витков на первичной обмотке трансформатора преобразователя собственных нужд, либо увеличение витков на вторичной обмотке [106]

$$\downarrow K_{\tau} = \frac{U_{\text{кв}}}{\uparrow U_{\text{в}}} = \frac{\downarrow w_1}{\uparrow w_2}, \quad (3.9)$$

где w_1 – число витков на первичной обмотке трансформатора;

w_2 – число витков на вторичной обмотке трансформатора.

Следовательно, тиристоры $VS1$ и $VS2$ (рисунок 3.6) должны быть рассчитаны на напряжение $U_{\text{в}} = 120$ В (замена типа существующих тиристоров ТБИ453-800-14 на тип ТБИ453-1000-14).

3.3 Анализ результатов по повышению эффективности регулирования тока в силовой цепи электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы за счет увеличения напряжения возбуждения тяговых двигателей

При данном напряжении возбуждения характеристики тока якоря и тока возбуждения электровоза 2ЭС6 в режиме независимого возбуждения приведены на рисунке 3.16.

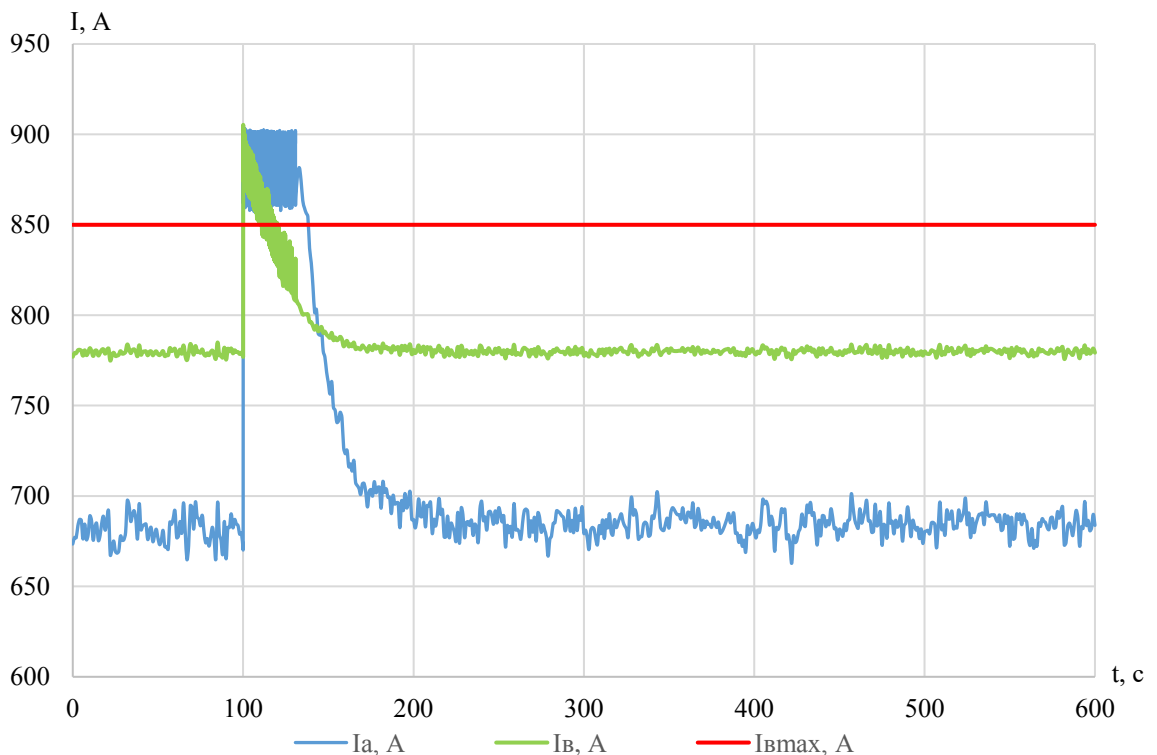


Рисунок 3.16 – Временные характеристики тока якоря и тока возбуждения для режима независимого возбуждения двигателей электровоза 2ЭС6 при увеличении максимального напряжения возбуждения

В соответствии с рисунком 3.16, значения тока якоря и тока возбуждения также превышают свои предельные значения. Ток якоря удерживается на уровне, не превышающем своего предельного значения 900 А, в течение 42 с, ток возбуждения превышает предельное значение 850 А течение 16 с, длительное значение 800 А в течение 35 с. Сравнение полученных данных представлено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Длительность превышения предельных значений тока якоря и тока возбуждения при отклонении напряжения 400 В

	$t, \text{с}$			
	$I_a > 900 \text{ А}$	$I_a > 800 \text{ А}$	$I_B > 850 \text{ А}$	$I_B > 800 \text{ А}$
$U_B = 90 \text{ В}$	–	44	19	38
$U_B = 120 \text{ В}$	–	42	16	35
$\Delta t, \text{с}$	–	2	3	3

Следовательно, без увеличения предельных значений тока якоря и тока возбуждения невозможно уменьшить время переходного процесса. Данное условие ограничено конструкцией самого электровоза.

Согласно кривой напряжения на токоприемнике, приведенной на рисунке 1.2, более частыми отклонения являются отклонения напряжения со средним значением $\Delta U = 100 \dots 200 \text{ В}$. Были промоделированы данные колебания для силовой схемы электровоза 2СЭ6 с независимым возбуждением. Временные характеристики тока якоря и тока возбуждения при отклонении $\Delta U = 100 \text{ В}$ представлены на рисунках 3.17 – 3.18, временные характеристики тока якоря и тока возбуждения при отклонении $\Delta U = 200 \text{ В}$ представлены на рисунках 3.19 – 3.20.

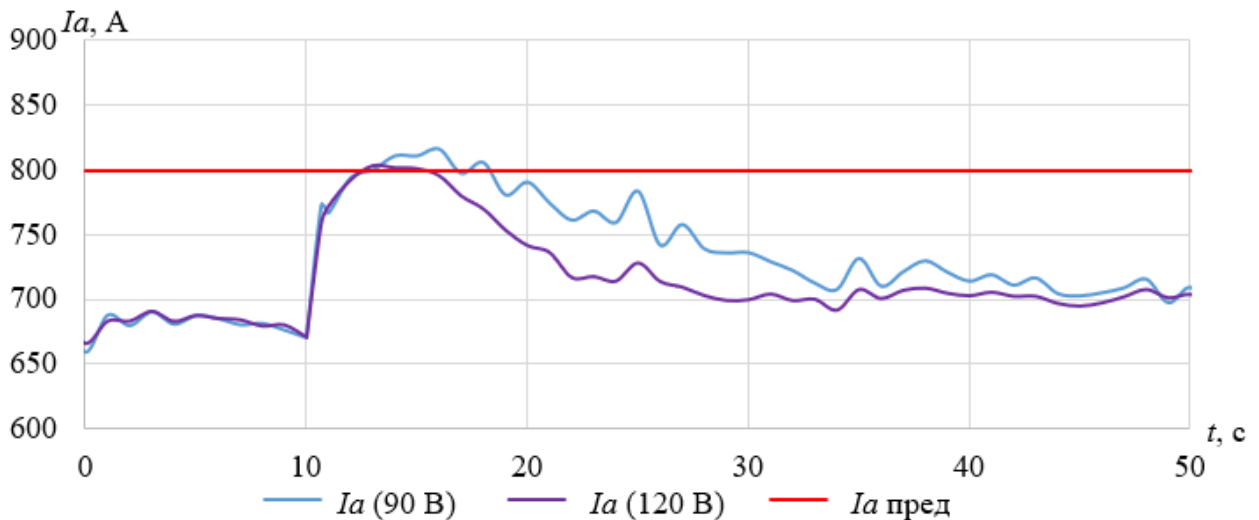


Рисунок 3.17 – Временные характеристики тока якоря для различных значений напряжения возбуждения при отклонении напряжения в контактной сети 100 В

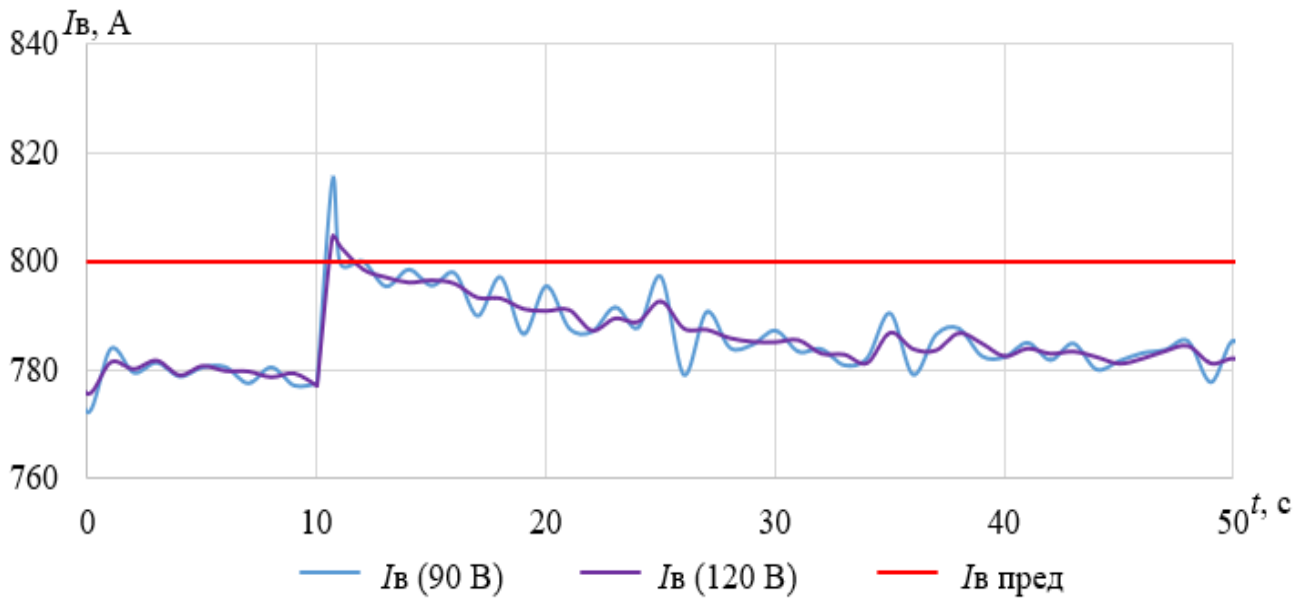


Рисунок 3.18 – Временные характеристики тока возбуждения для различных значений напряжения возбуждения при отклонении напряжения в контактной сети 100 В

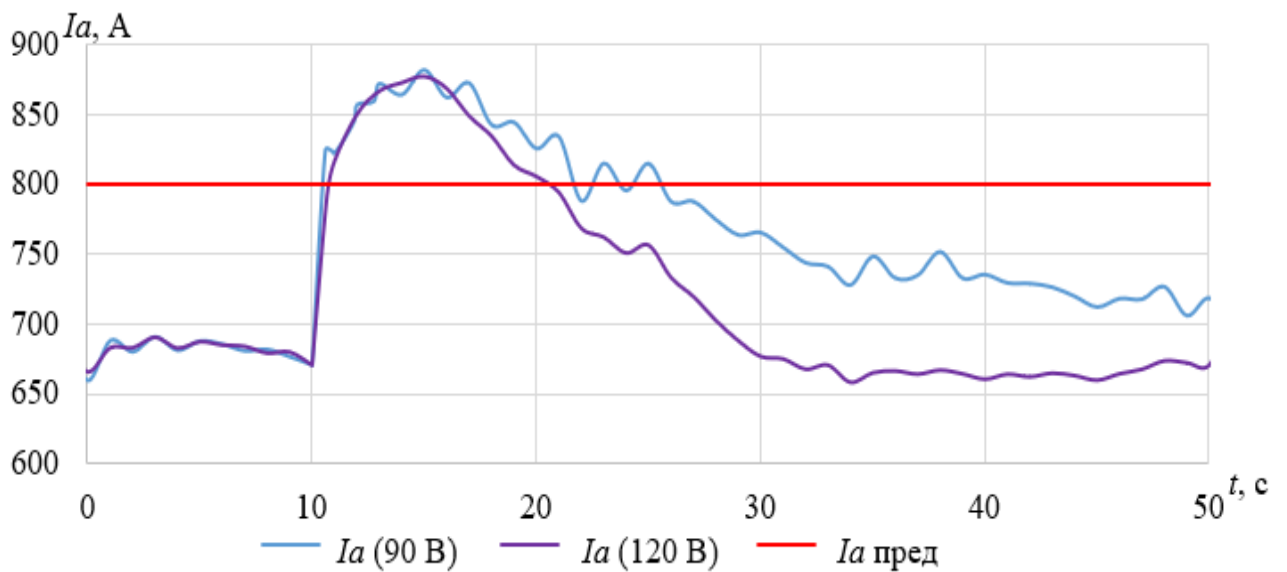


Рисунок 3.19 – Временные характеристики тока якоря для различных значений напряжения возбуждения при отклонении напряжения в контактной сети 200 В

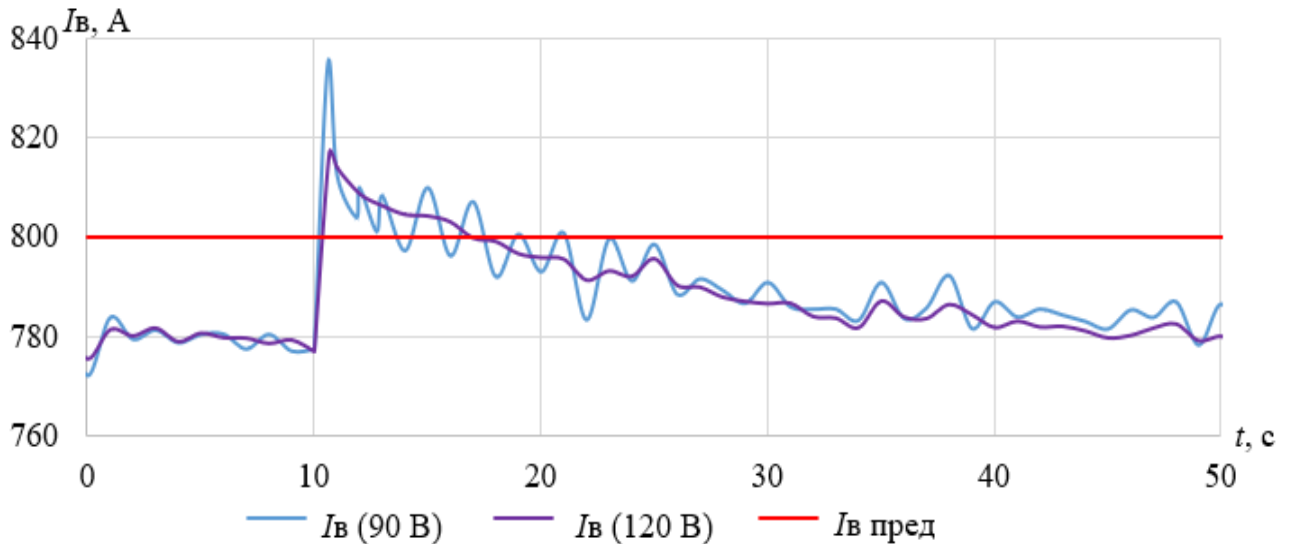


Рисунок 3.20 – Временные характеристики тока возбуждения для различных значений напряжения возбуждения при отклонении напряжения в контактной сети 200 В

Данные токовые характеристики показывают, что при увеличении уставки напряжения снижаются амплитуды токов якоря и возбуждения, а также снижается длительность превышения токов своего предельного значения. Результаты моделирования представлены в сравнительных таблицах 3.3 – 3.4.

Таблица 3.3 – Превышение амплитудных величин токов якоря и возбуждения над их предельными значениями при отклонениях напряжения контактной сети и различных уровнях напряжения возбуждения двигателя

	I, A			
	$\Delta U = 100 B$		$\Delta U = 200 B$	
	ток якоря	ток возбуждения	ток якоря	ток возбуждения
$U_B = 90 B$	17	14	82	34
$U_B = 120 B$	3	5	78	17

Таблица 3.4 – Длительность превышения предельных значений тока якоря и тока возбуждения

	$t, \text{с}$			
	$\Delta U = 100 \text{ В}$		$\Delta U = 200 \text{ В}$	
	для тока якоря	для тока возбуждения	для тока якоря	для тока возбуждения
$U_{\text{в}} = 90 \text{ В}$	8,3	1,7	15,6	9,1
$U_{\text{в}} = 120 \text{ В}$	5	1	10,5	3,5

Таким образом, при низких отклонениях напряжения ($\Delta U \leq 200 \text{ В}$) значения тока якоря и тока возбуждения не превышают предельного значения, но превышают максимальное длительное значение согласно таблице 3.3. При увеличении напряжения возбуждения и уменьшении отклонений напряжения в контактной сети уменьшается время неустановившегося режима.

При отклонениях напряжения более 200 В значения тока якоря и тока возбуждения превышают свои предельные значения. Следовательно, помимо увеличения напряжения возбуждения необходимо снижать отклонения напряжения в контактной сети.

Одним из методов устранения резких отклонений напряжения является применение входных фильтров.

3.4 Выводы по главе 3

1. Построена имитационная модель силовой цепи электровоза 2ЭС6 с независимым возбуждением тяговых электродвигателей. В соответствии с влиянием коэффициента компаундирования на ток возбуждения пересчитано значение магнитного потока двигателя.

2. Моделирование контура возбуждения двигателей доказало влияние изменения угла открытия тиристорov на значение тока возбуждения.

3. Смоделировано отклонение напряжения контактной сети в 400 В для имитационной модели силовой цепи электровоза 2ЭС6 с независимым возбуж-

дением. Ток якоря и ток возбуждения превышают свое предельное значение в течение 44 с и 38 с соответственно. Данный фактор обусловлен следующими причинами:

- значение тока якоря в момент времени до отклонения напряжения составляет 670 А из-за повышенного значения крутизны подъема, тока возбуждения – 777 А, вследствие этого пиковые токовые значения при отклонении напряжения возрастают;

- при отклонении напряжения возникает энергетический дисбаланс тяговых электродвигателей ввиду инерционности поезда, а также включения в цепь возбуждения индуктивного реактора, замедляющего изменение тока якоря и тока возбуждения.

4. Приведена целесообразность увеличения напряжения возбуждения для улучшения токовых переходных процессов до 120 В путем совершенствования элементов преобразователя собственных нужд.

5. Увеличение напряжения возбуждения до 120 В эффективно для отклонений напряжения в контактной сети не более 200 В. В таком случае значения тока якоря и тока возбуждения не превышают предельного значения. При увеличении напряжения возбуждения и уменьшения отклонений напряжения в контактной сети уменьшается время неустановившегося режима.

6. При отклонениях напряжения более 200 В значения тока якоря и тока возбуждения превышают свои предельные значения. Следовательно, помимо увеличения напряжения возбуждения необходимо снижать отклонения напряжения в контактной сети.

7. Задачи дальнейшего исследования:

- построить математическую модель пассивного фильтра низких частот, применяемого на электровозе с асинхронным тяговым приводом и оценить его амплитудно-частотную характеристику;

- построить математическую модель активного фильтра низких частот;

- оценить влияние пассивного и активного фильтров на характеристику тягового тока в электрической цепи электровоза 2ЭС6.

4 ФИЛЬТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1 Построение математической модели пассивного фильтра низких частот

Особенность электровозов постоянного тока с асинхронным тяговым приводом состоит в том, что в их силовой цепи возникают помехи не только от неидеального входного напряжения (рисунок 1.2), но и от работы тяговых инверторов. Так, силовая цепь электровоза 2ЭС10 подвержена помехам со стороны тяговых инверторов от высокочастотной коммутации *IGBT*-транзисторов (рисунок 4.1) [107].

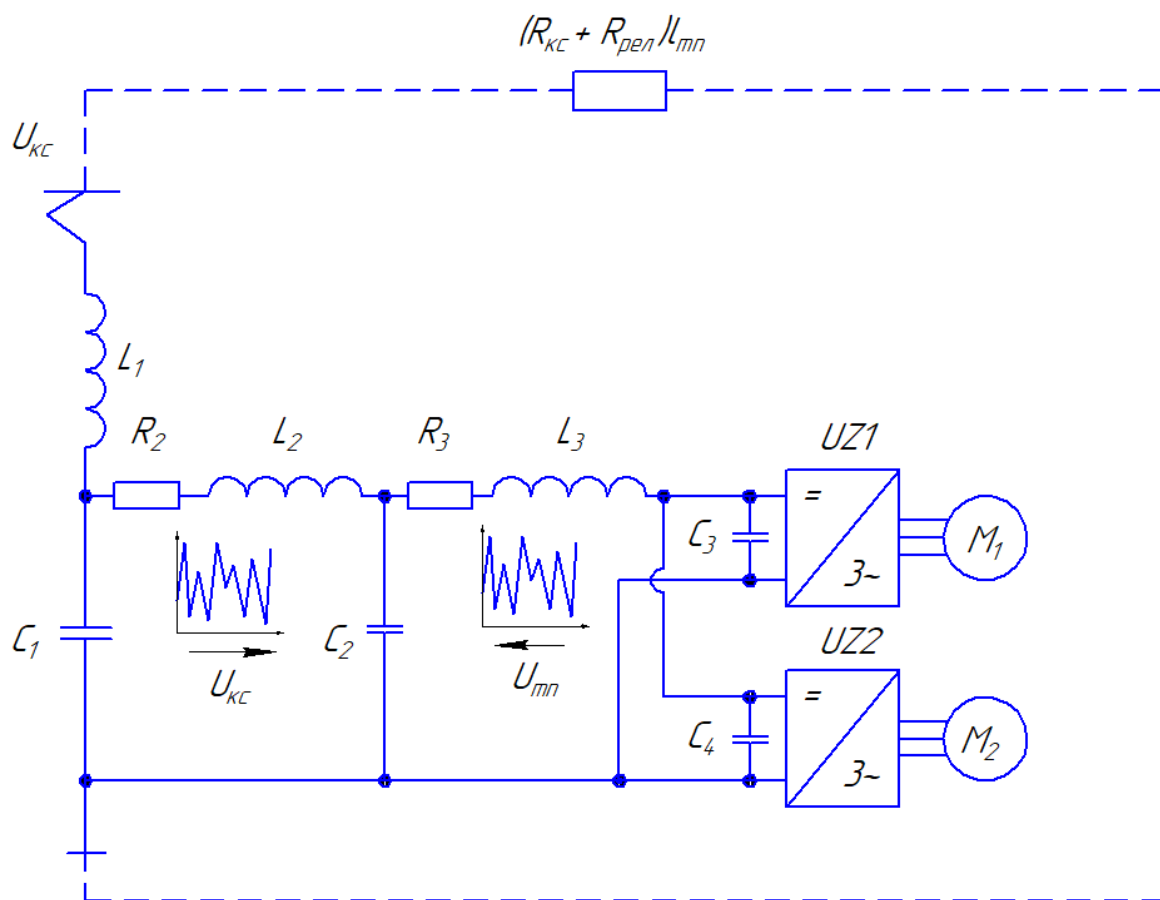


Рисунок 4.1 – Распространение помех в схеме силовой цепи электровоза 2ЭС10

Для устранения этих помех применяется фильтр низких частот [108].
Принципиальная схема фильтра приведена на рисунке 4.2.

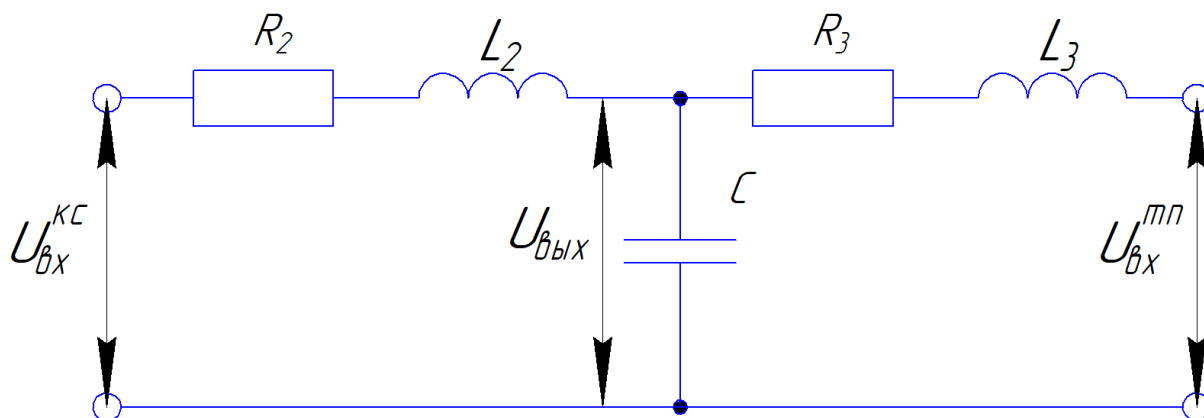


Рисунок 4.2 – Схема фильтра низких частот электровоза 2ЭС10

Амплитудно-частотная характеристика фильтра низких частот электровоза 2ЭС10 представлена на рисунке 4.3.

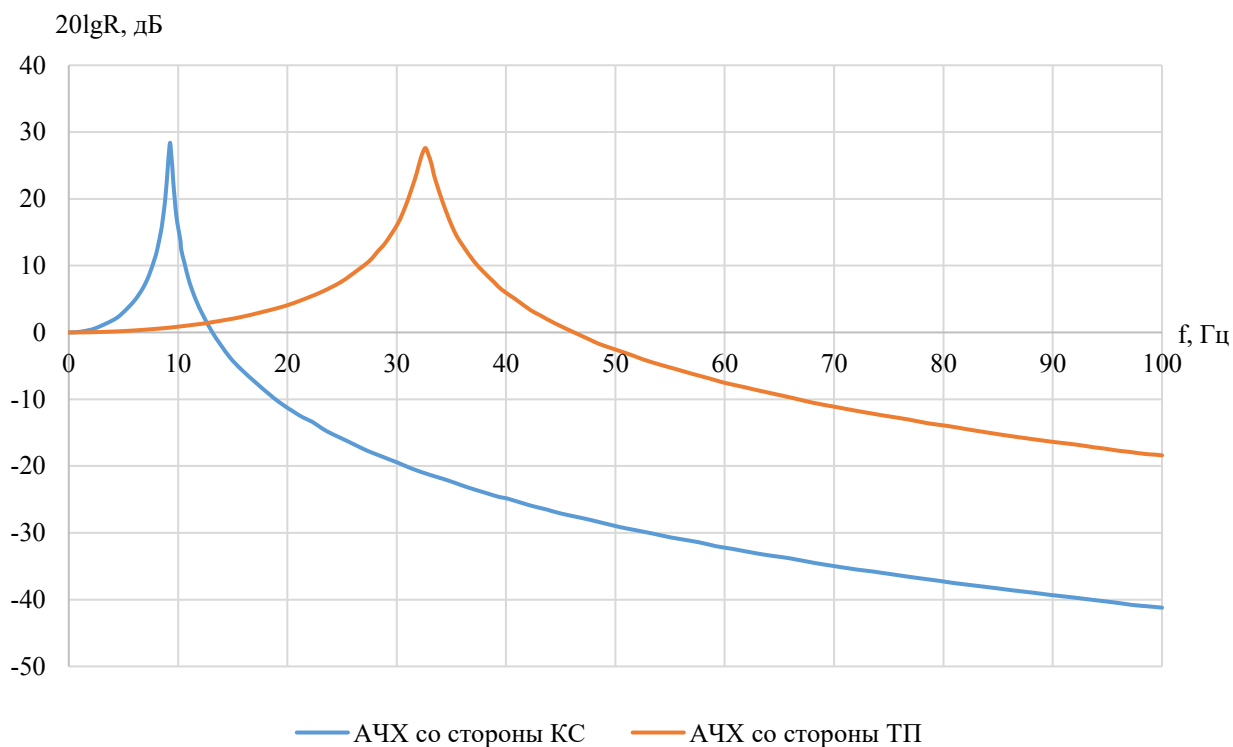
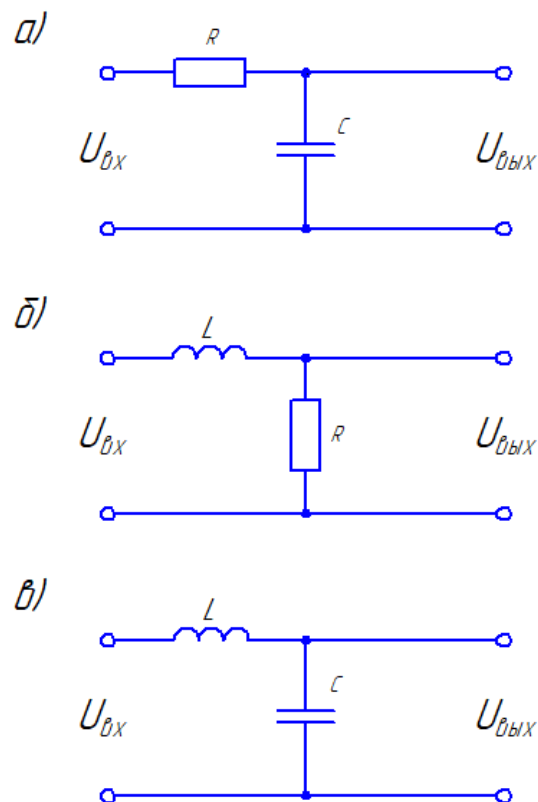


Рисунок 4.3 – Амплитудно-частотные характеристики фильтра низких частот электровоза 2ЭС10

На электровозах постоянного тока с коллекторным тяговым электроприводом данные фильтры не применяются. Так, согласно схемам, представленным на рисунках 1.13 – 1.14, на электровозе 2ЭС6 применяется только фильтр радиопомех $L_{\text{ф}} - C_{\text{ф}}$, подавляющий помехи от работы электрического оборудования электровоза. Следовательно, неидеальное входное напряжение контактной сети непосредственно поступает на тяговые электродвигатели (рисунок 1.1).

Применение фильтров низких частот в схеме силовой цепи электровоза 2ЭС6 обеспечит подавление помех напряжения, приводящие к неустановившемуся режиму и негативно влияющих на токовые значения двигателя.

Схемы простейших низкочастотных фильтров представлены на рисунке 4.4 [109].



а – Г-образный RC -фильтр; б – Г-образный LR -фильтр; в – Г-образный LC -фильтр

Рисунок 4.4 – Схемы низкочастотных фильтров

Объединение трех схем позволяет создавать активно-индуктивно-емкостные фильтры (рисунок 4.5).

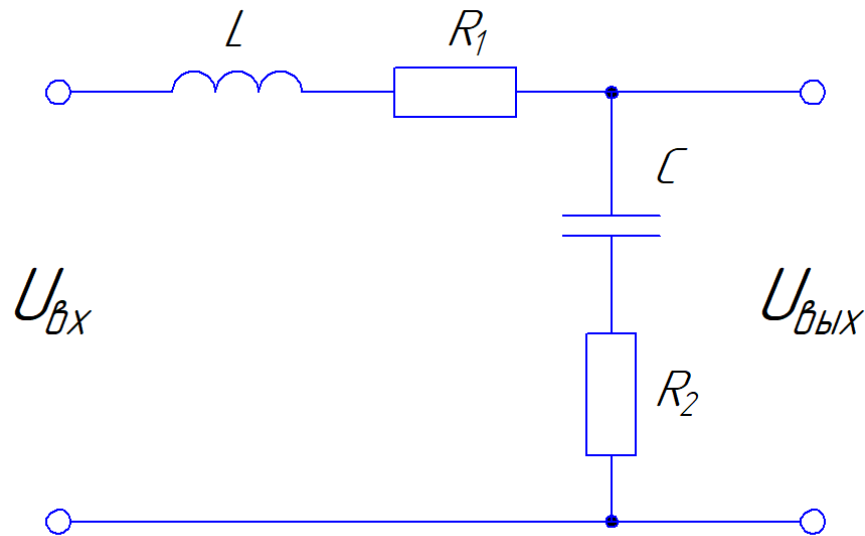


Рисунок 4.5 – Схема активно-индуктивно-емкостного фильтра

Согласно пункту 5.25 ГОСТ Р 55364–2012 [110], входное индуктивное сопротивление электрической схемы электровоза со стороны контактной сети должно быть не менее 2,5 Ом при частоте 50 Гц.

Минимальное индуктивное сопротивление силовой цепи электровоза 2ЭС6 обеспечивается при параллельном соединении двигателей в режиме последовательного возбуждения. В номинальном режиме индуктивное сопротивление определяется выражением (4.1) [111]

$$X_{Lmin} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{L_{a+ко+дп} + L_{гп}}{2}, \quad (4.1)$$

$$X_{Lmin} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \frac{(1,99 + 3,78) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,906 \text{ Ом.}$$

В соответствии с выражением (4.1), минимальное значение индуктивности фильтра низких частот составляет $L = 5,1$ мГн.

Схема силовых цепей электровоза 2ЭС6 с входным фильтром низких частот представлена на рисунке 4.6.

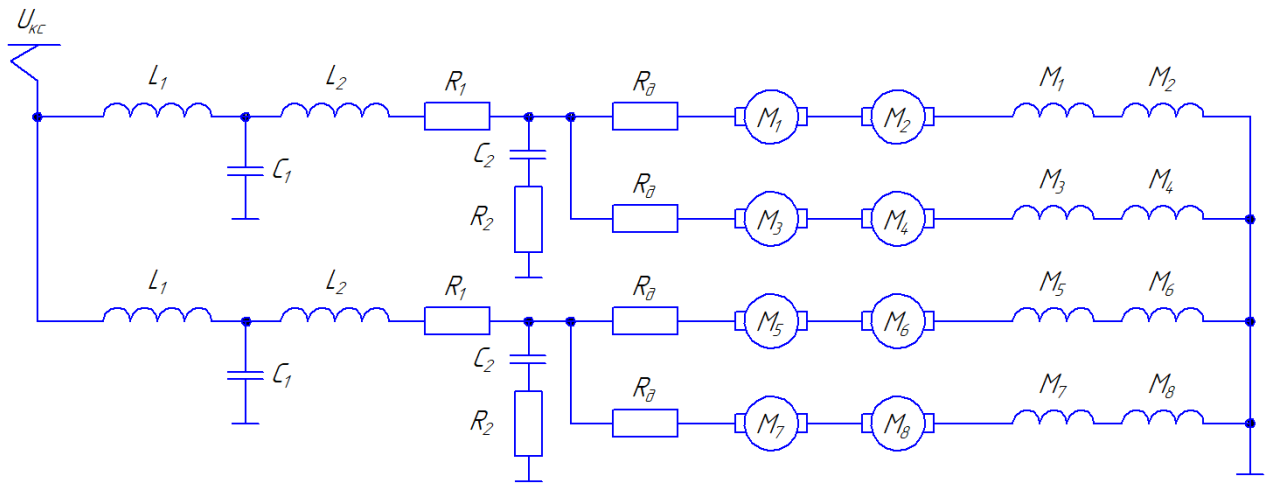


Рисунок 4.6 – Схема силовых цепей электровоза 2ЭС6 с входным фильтром низких частот в режиме последовательного возбуждения для П-соединения двигателей

На рисунке 4.6 элементы $L_1 - C_1$ образуют фильтр радиопомех, а $L_2 - C_2$ совместно с резисторами R_1 и R_2 образуют фильтр низких частот.

Сглаживание колебаний напряжения в контактной сети фильтром представлено на рисунке 4.7. Учитывая требование по индуктивности фильтра согласно выражению 4.1, остальные параметры приняты аналогично фильтру электровоза 2ЭС10 [112]:

- $C = 7,6$ мФ;
- $R_1 = 0,1$ Ом;
- $R_2 = 0,1$ Ом.

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.7.

Согласно рисунку 4.7, при колебаниях напряжения в контактной сети выходное напряжение фильтра имеет колебательный характер, что в момент колебаний приводит к еще большему отклонению его значения. Данный фактор усугубляет условия неустойчивого режима.

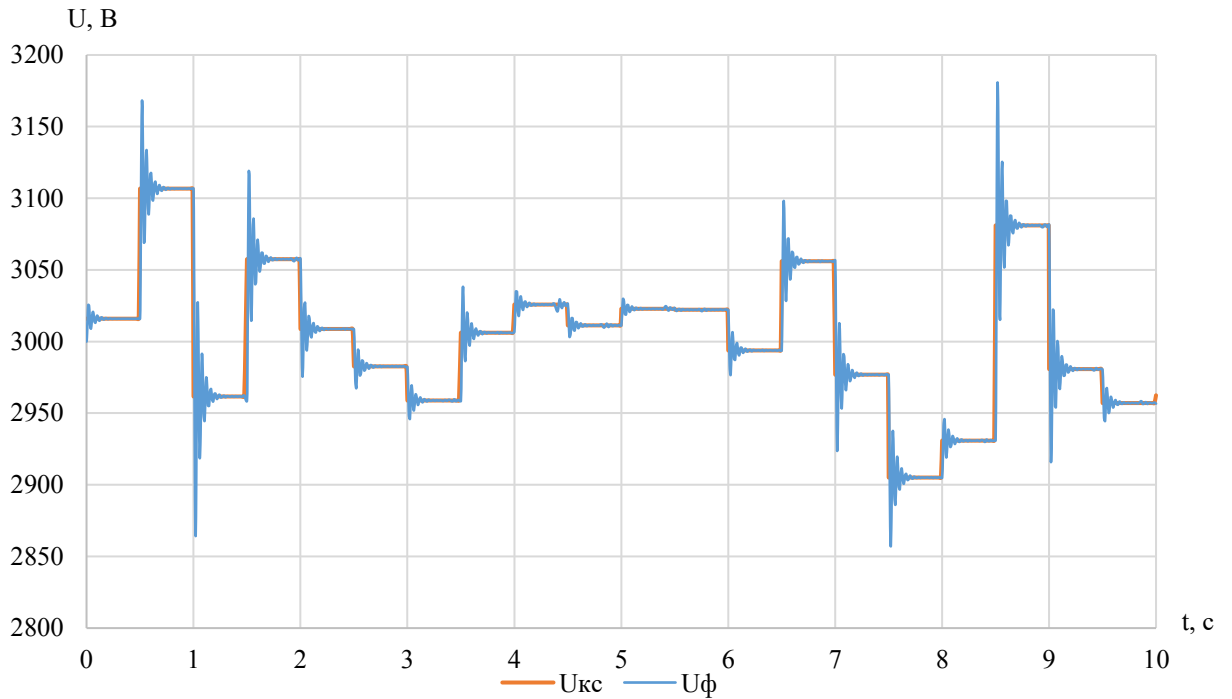


Рисунок 4.7 – Фильтрация входного скачкообразного напряжения контактной сети

Характеристические уравнения для входного и выходного напряжений фильтра будут представлены выражениями

$$U_{\text{вх}} = I_{\phi} \cdot (R_1 + R_2 + X_L + X_C) = I_{\phi} \cdot (R_1 + R_2 + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}), \quad (4.2)$$

$$U_{\text{вых}} = I_{\phi} \cdot (R_2 + X_C) = I_{\phi} \cdot (R_2 + \frac{1}{j\omega C}), \quad (4.3)$$

где I_{ϕ} – ток, протекающий по фильтру, А;

R_1 – сопротивление в ветви с индуктивностью, Ом;

R_2 – сопротивление в ветви с емкостью, Ом;

X_L – индуктивное сопротивление фильтра, Ом;

X_C – емкостное сопротивление фильтра, Ом.

В соответствии с выражениями (4.2 – 4.3), на выходное напряжение фильтра влияют как сопротивления R_1 и R_2 , так и реактивные сопротивления.

При сопротивлении $R_1 = 0,1$ Ом характеристика выходного напряжения фильтра имеет колебательный характер. При увеличении сопротивления до $R_1 = 1$ Ом характеристика напряжения практически повторяет колебания напряжения контактной сети, при этом имеется незначительное перерегулирование. При дальнейшем увеличении сопротивления до $R_1 = 10$ Ом характеристика фильтра близка к апериодическому звену, резкие колебания напряжения на входе фильтра преобразуются в плавные изменения на выходе фильтра (рисунок 4.8).

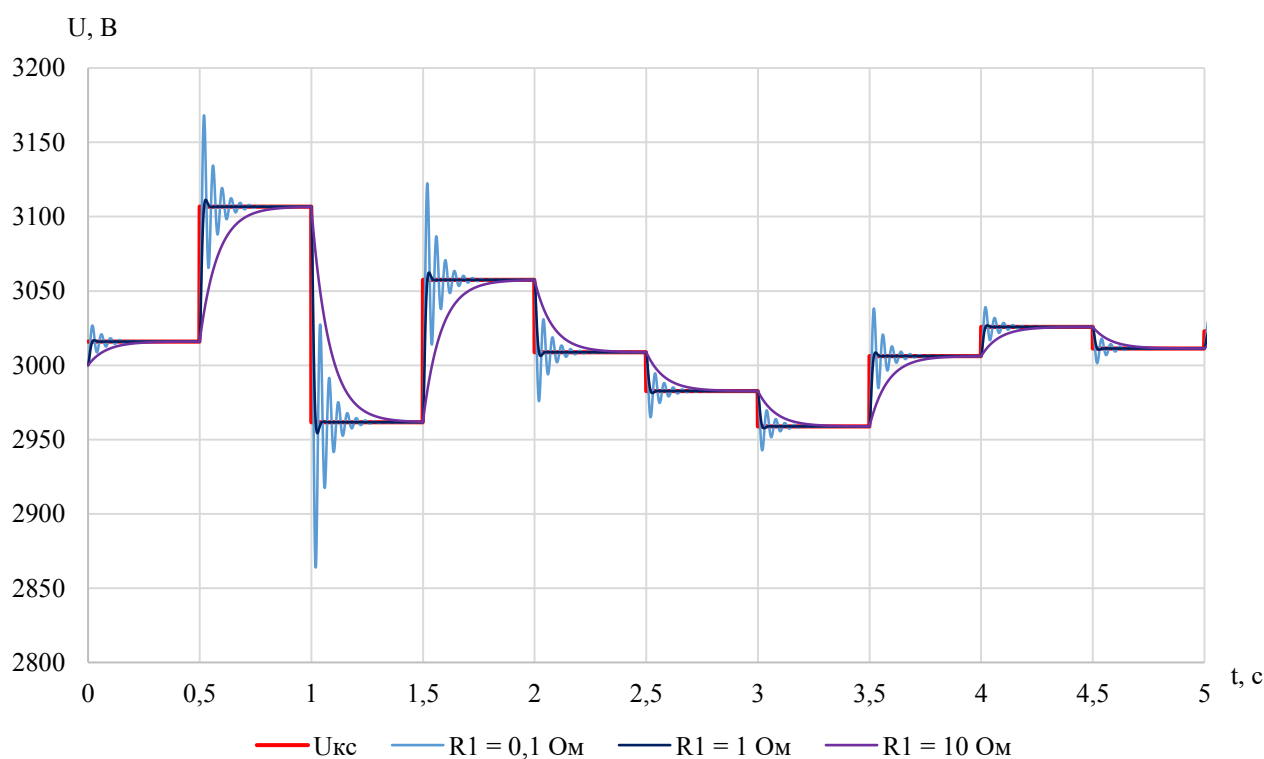


Рисунок 4.8 – Фильтрация входного скачкообразного напряжения контактной сети в зависимости от значения сопротивления R_1

При сопротивлении $R_2 = 0,1$ Ом характеристика выходного напряжения фильтра имеет колебательный характер. При увеличении сопротивления до $R_2 = 1$ Ом напряжение практически повторяет форму напряжения аналогично увеличению до $R_1 = 1$ Ом, однако в данном случае имеется большее перерегулирование. При $R_2 = 10$ Ом выходное напряжение фильтра повторяет входные колебания контактной сети (рисунок 4.9).

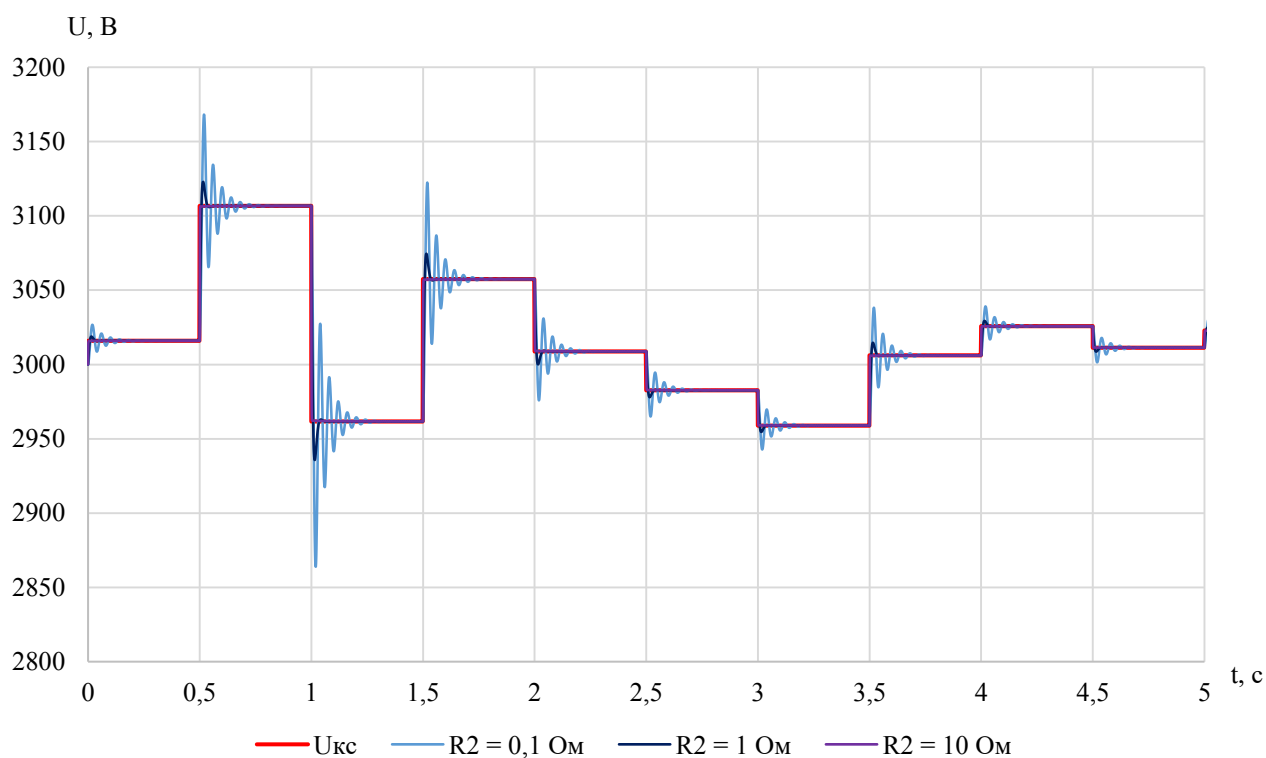


Рисунок 4.9 – Фильтрация входного скачкообразного напряжения контактной сети в зависимости от значения сопротивления R_2

Таким образом, увеличение сопротивления в ветви с индуктивностью приводит к низкочастотной фильтрации входного напряжения, а увеличение сопротивления в ветви с емкостью приводит к исключению колебательности и увеличению быстродействия.

Однако увеличение активного сопротивления приводит к уменьшению энергоэффективности локомотива, большим активным потерям и низкому КПД. Следовательно, улучшение выходной характеристики фильтра за счет увеличения активных сопротивлений неэффективно, поэтому рассмотрим изменение характеристик реактивных элементов фильтра.

При индуктивности $L = 5,1 \text{ мГн}$ характеристика выходного напряжения фильтра носит колебательный характер. Уменьшение индуктивности в соответствии с выражением (4.1) недопустимо. Поэтому изменение качества выходной характеристики возможно благодаря увеличению значения индуктивности. Однако увеличение индуктивности создает еще большую колебательность, при этом не наблюдается значительного перерегулирования (рисунок 4.10).

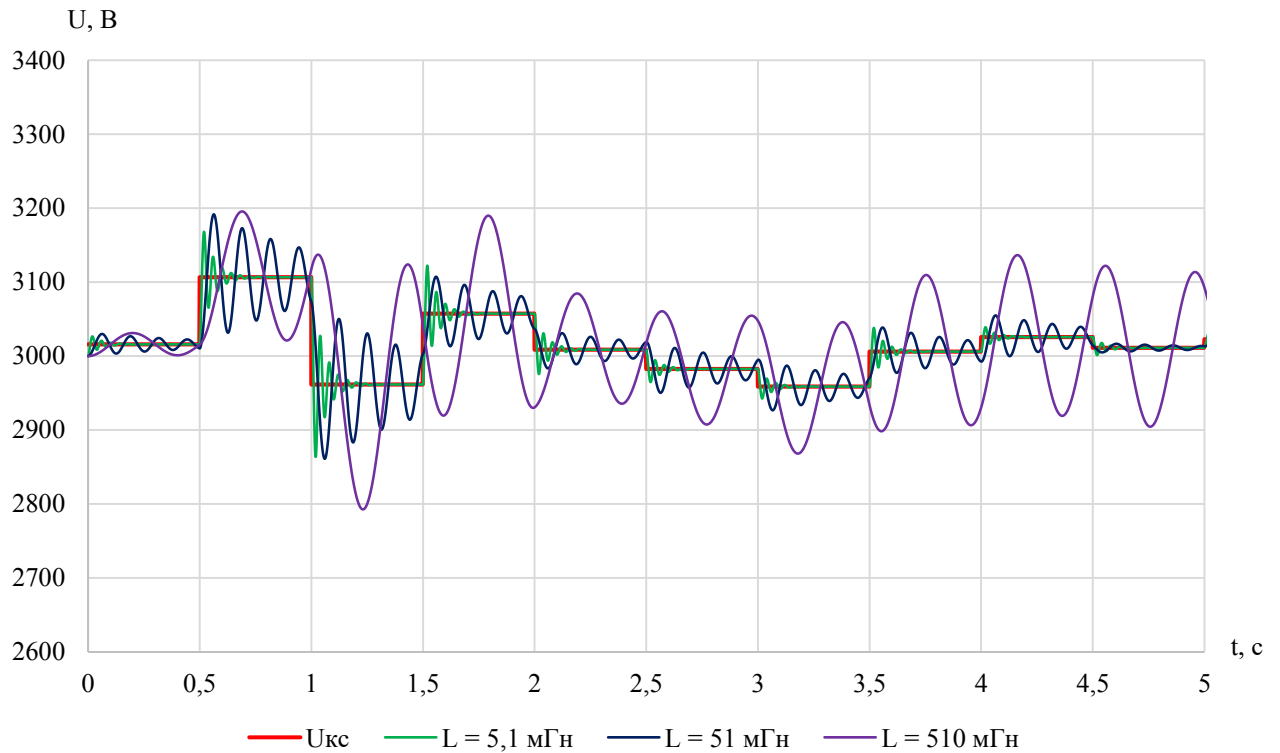


Рисунок 4.10 – Фильтрация входного скачкообразного напряжения контактной сети в зависимости от значения индуктивности

Увеличение емкости до $C = 76$ мФ не устраняет колебательность выходного напряжения, но приводит к ее уменьшению, а именно уменьшается переупреждение и период затухания. При увеличении емкости до $C = 760$ мФ характеристика фильтра близка к апериодическому звену, резкие колебания напряжения на входе фильтра преобразуются в плавные изменения на выходе фильтра (рисунок 4.11).

Увеличение индуктивности катушки и емкости конденсатора приводит к повышению электрических и магнитных потерь в данных элементах, увеличению их размеров и удорожанию, а также использованию реактивных элементов в еще более тяжелых условиях эксплуатации. Применение таких элементов небезопасно в связи с накоплением в них огромной электрической и магнитной энергии.



Рисунок 4.11 – Фильтрация входного скачкообразного напряжения контактной сети в зависимости от значения емкости

Данную проблему возможно разрешить применением многозвенных фильтров низких частот. На рисунке 4.12 представлена схема трехзвенного фильтра, подавляющего помехи со стороны контактной сети (система $R_L-L-C-R_C$ формирует одно звено).

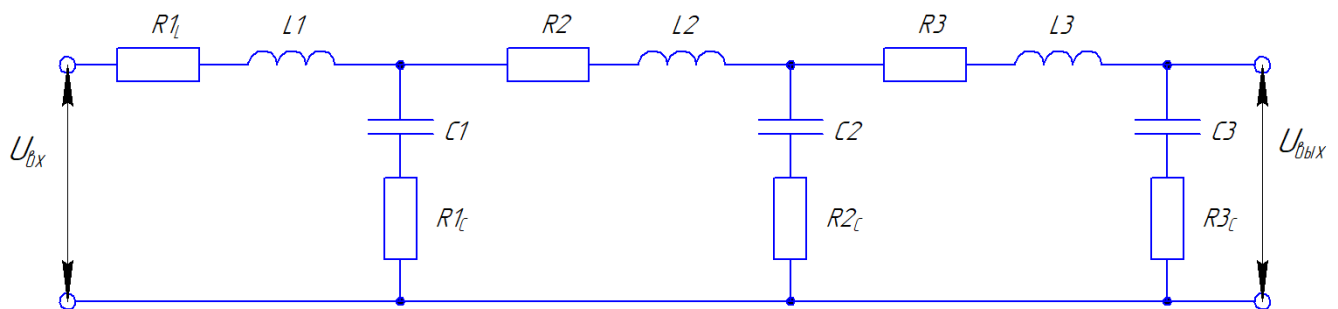


Рисунок 4.12 – Схема трехзвенного фильтра низких частот

Амплитудно-частотная характеристика многозвенного фильтра, представленная на рисунке 4.12, приведена для однозвенной, двухзвенной и трехзвенной схемы фильтра на рисунке 4.13.

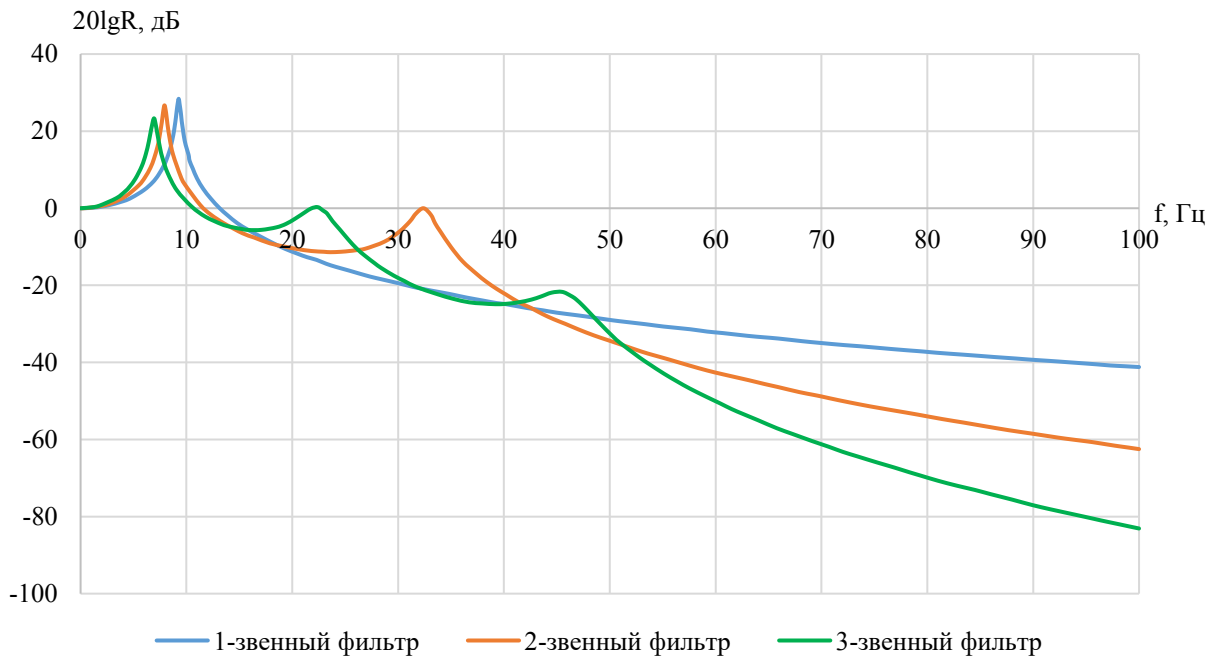


Рисунок 4.13 – Амплитудно-частотная характеристика многозвенного фильтра низких частот

Результаты фильтрации многозвенного фильтра приведены на рисунке 4.14.

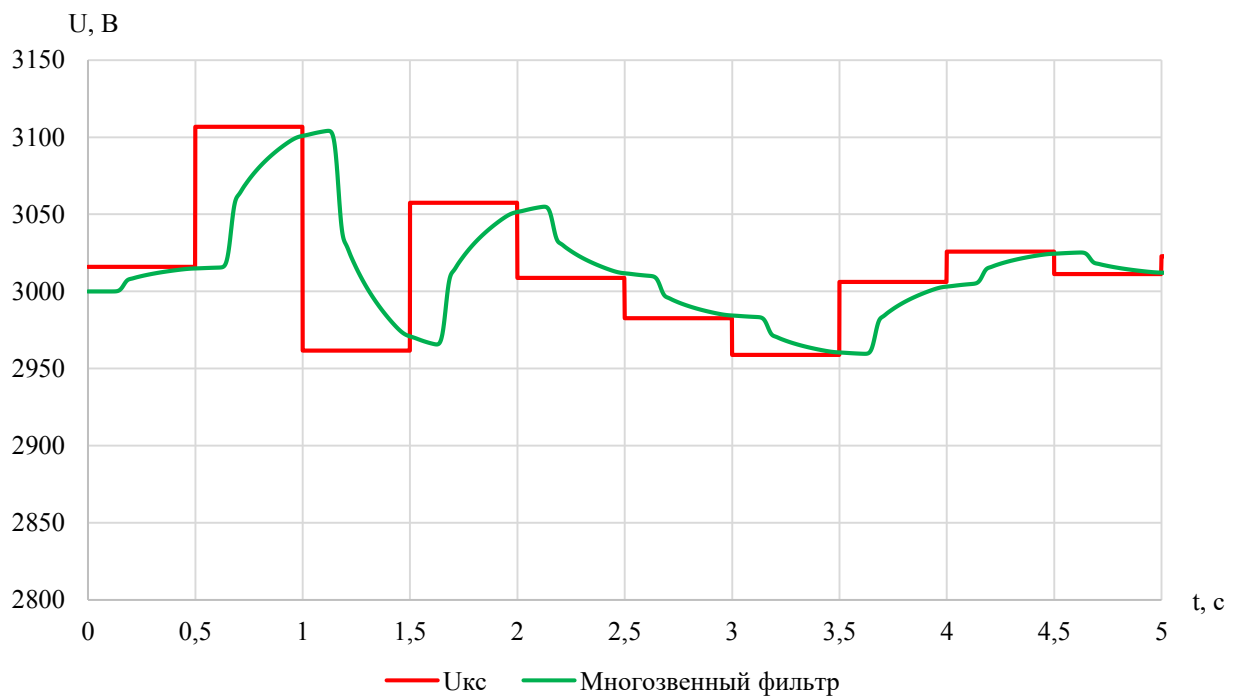


Рисунок 4.14 – Фильтрация входного скачкообразного напряжения контактной сети многозвенным фильтром

Согласно рисунку 4.14, использование многозвенного фильтра позволяет сглаживать колебания напряжения в контактной сети при использовании исходных параметров фильтра [112]. Выходная характеристика фильтра близка к характеристике апериодического звена.

Однако применение многозвенных фильтров создает дополнительные резонансы на определённых частотах (рисунок 4.13). Кроме этого, применение многозвенных фильтров приводит к увеличению пассивных элементов в силовой цепи, что неизбежно отражается на КПД электровоза [113]. Помимо всего, характеристики таких фильтров зависят от импеданса цепи нагрузки, который в силовых цепях имеет относительно импеданса фильтра высокий показатель. [114].

Одним из перспективных методов решения данной задачи является применение активного фильтра низких частот, построенного на основе операционного усилителя [115, 116].

4.2 Построение математической модели активного фильтра низких частот

Активные фильтры по сравнению с пассивными аналогами имеют более широкий спектр регулирования. Из-за того, что активный фильтр генерирует сигнал, находящийся в противофазе к помехе, он имеет более гибкую фильтрацию помех. В связи с тем, что использование в активных фильтрах операционных усилителей обеспечивает потенциальную развязку входного напряжения от выходного, данные схемы имеют широкое применение [117, 118].

Схема активного фильтра низких частот приведена на рисунке 4.15 [119].

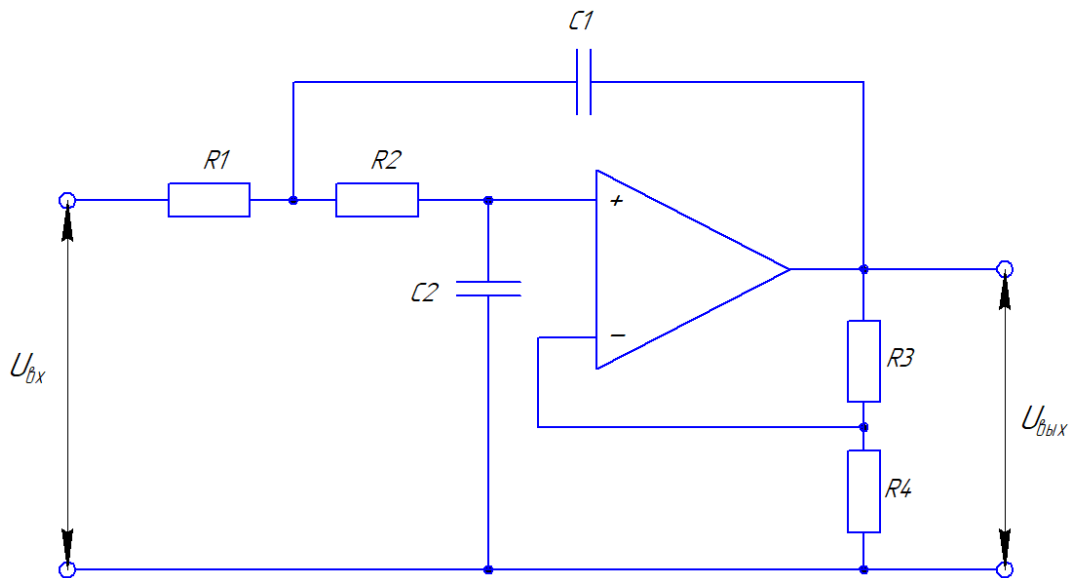


Рисунок 4.15 – Схема активного фильтра низких частот

Элементный баланс данной схемы по сравнению со схемой пассивного фильтра имеет активно-емкостной характер, роль индуктивности заменяется операционным усилителем [120].

Операционный усилитель фильтра низких частот представляет собой дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления и несимметричным выходом (рисунок 4.16).

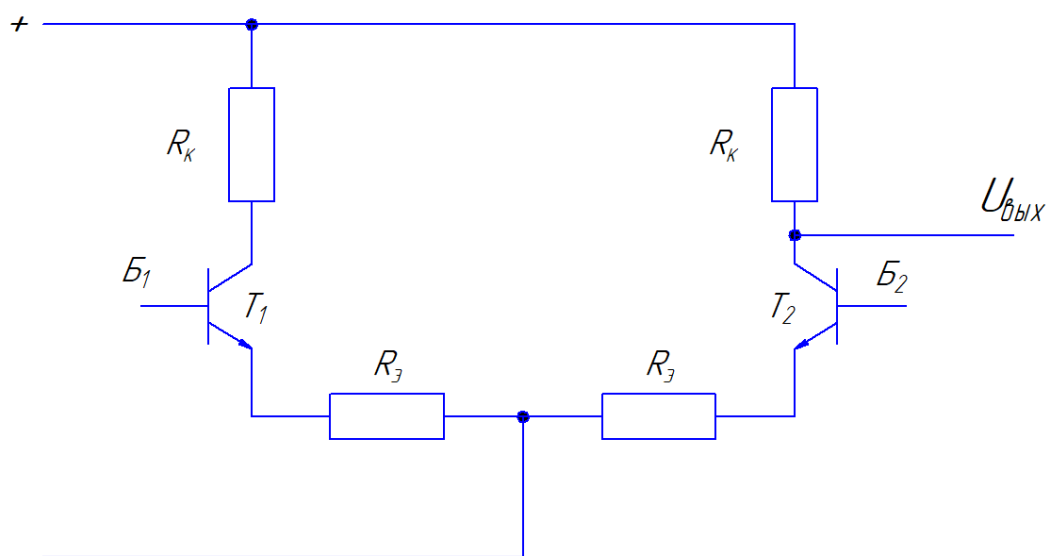


Рисунок 4.16 – Схема операционного усилителя на основе классического транзисторного дифференциального усилителя

Вход «+» относится к инвертирующему входу, «-» – к неинвертирующему.

Передаточная функция активного фильтра низких частот описывается выражением

$$W(j\omega) = \frac{K_p}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{Q \cdot \omega_0} + 1}, \quad (4.4)$$

где K_p – коэффициент передачи активного фильтра;

j – мнимая единица;

ω – частота напряжения, Гц;

ω_0 – собственная частота системы фильтра, Гц;

Q – добротность контура.

Связь параметров уравнения (4.4) с параметрами электрической схемы, представленной на рисунке 4.16, представлена выражениями (4.5 – 4.7) [121, 122].

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}, \quad (4.5)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_2 \cdot C_1}{R_1 \cdot C_2}}}{1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \cdot (1 - K_p)}, \quad (4.6)$$

$$K_p = \frac{K_0}{1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot K_0}, \quad (4.7)$$

где K_0 – коэффициент передачи операционного усилителя.

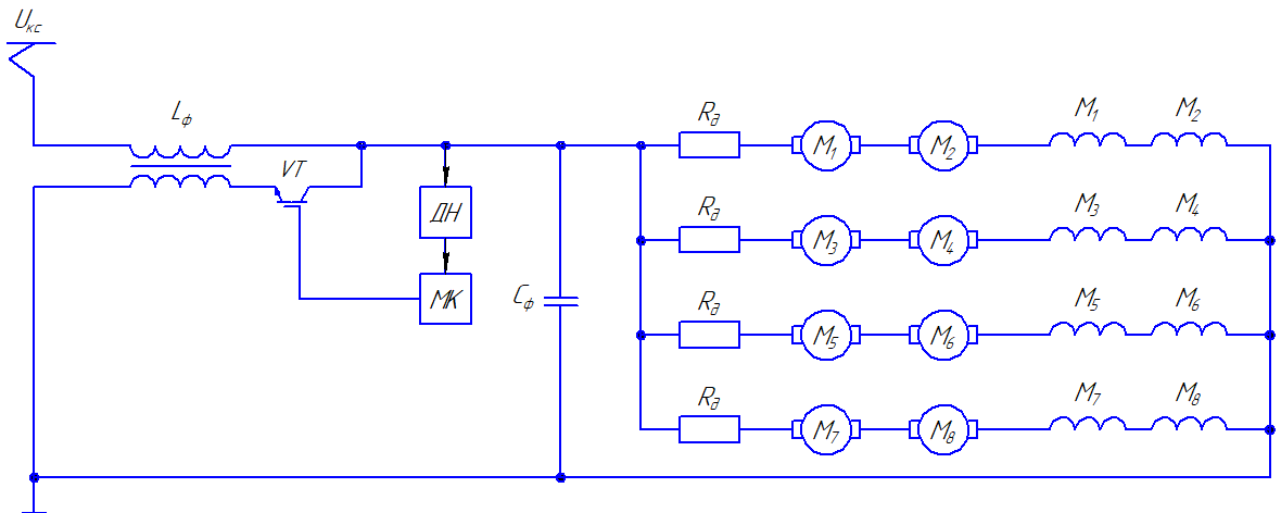
При $K_0 \gg 0$

$$K_p = 1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (4.8)$$

То есть частотные характеристики фильтра определяются положительной обратной связью, а коэффициент усиления отрицательной обратной связи представлен выражением (4.8).

В качестве физического устройства операционный усилитель представлен микроконтроллером K1921BK01T на базе ядра *ARM Cortex-M4F* [123].

Схема активного фильтра в силовой цепи электровоза представлена на рисунке 4.17.



ДН – датчик напряжения; МК – микроконтроллер

Рисунок 4.17 – Схема активного фильтра в силовой цепи электровоза 2ЭС6

Принцип активной фильтрации заключается в генерировании сигнала, противоположного помехе по фазе. Поступающая на вход фильтра помеха (рисунок 4.18) инвертируется по фазе и раскладывается в ряд Фурье [124] согласно выражению

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nx + b_n \cdot \sin nx), \quad (4.9)$$

где a_0 , a_n , b_n – коэффициенты ряда Фурье;

n – номер гармоники.

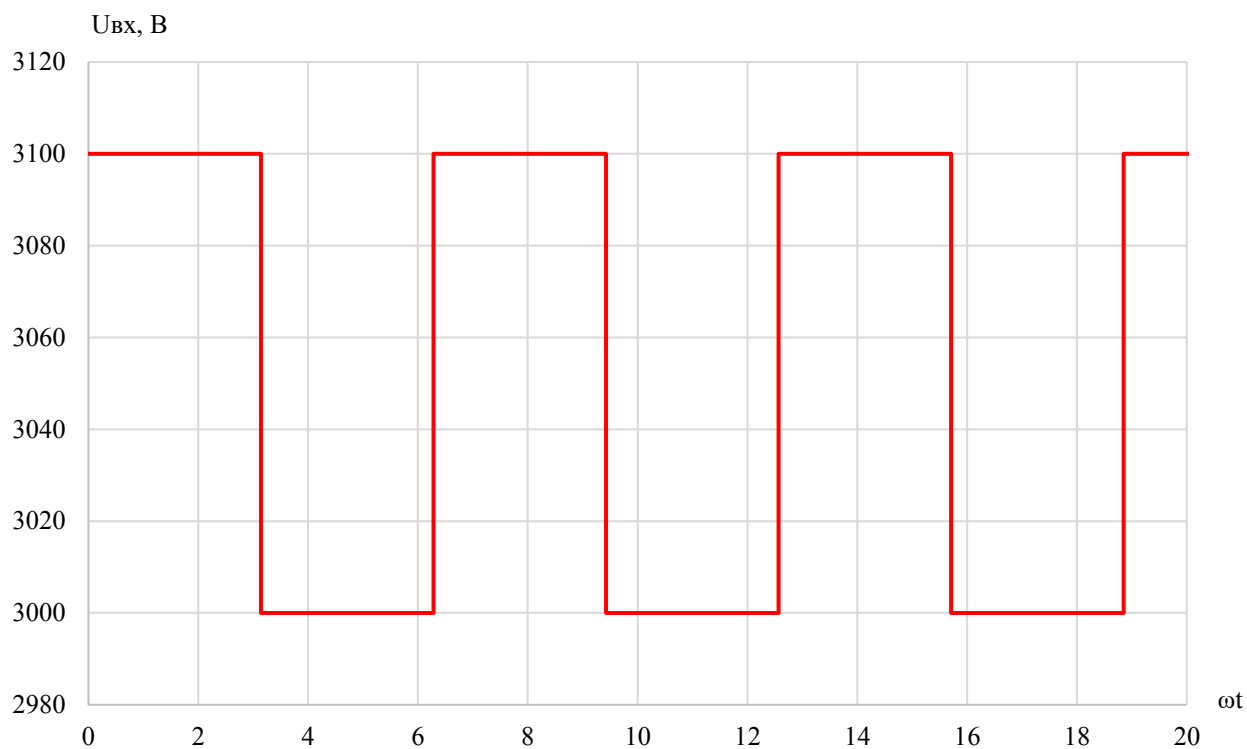


Рисунок 4.18 – Сигнал помехи на входе активного фильтра

Помеха, представленная на рисунке 4.18, инвертируется и представляет собой совокупность синусоид различных гармоник [125, 126] (рисунок 4.19).

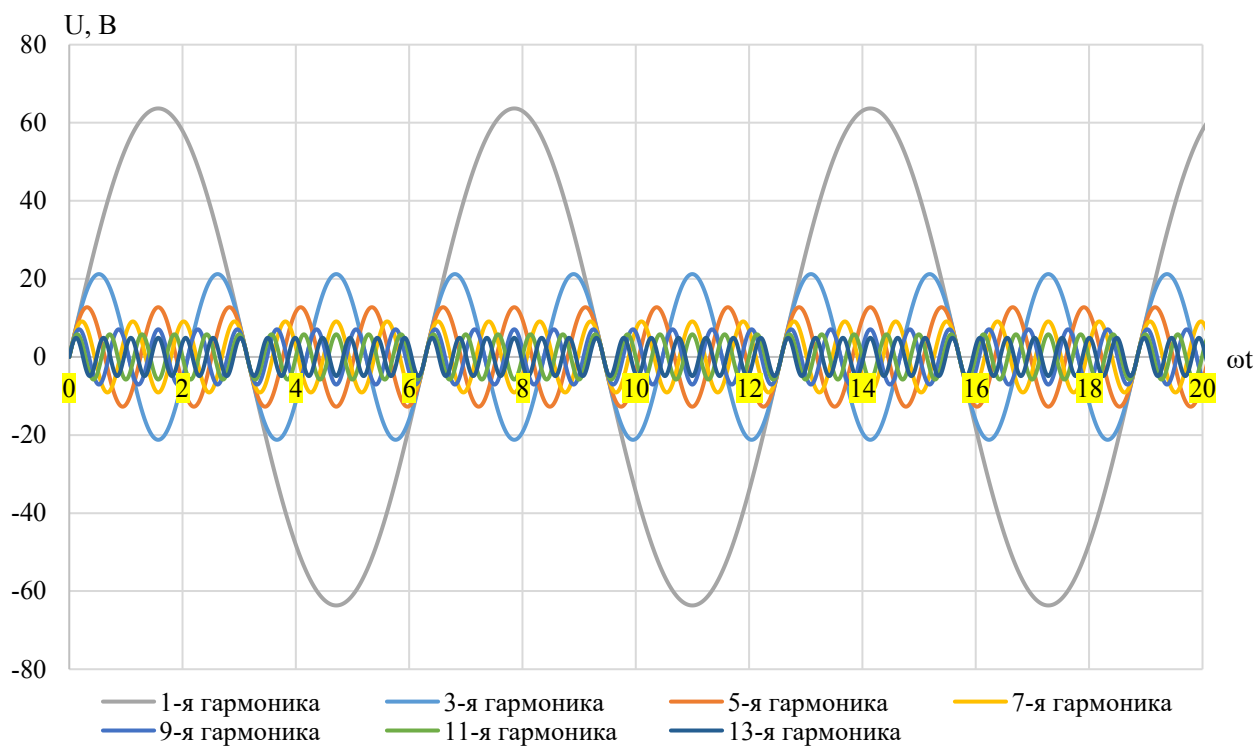


Рисунок 4.19 – Разложение сигнала помехи в ряд Фурье

Таким образом, суммирующая величина противопомехи от активного фильтра и величина фильтрации представлены на рисунках 4.20 – 4.21.

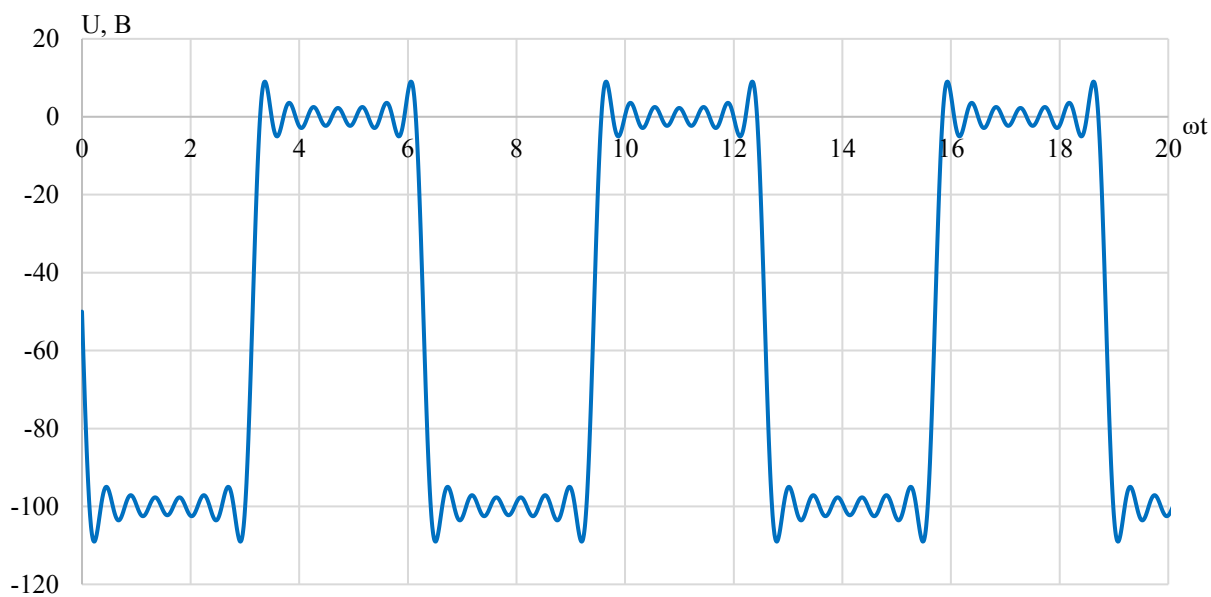


Рисунок 4.20 – Суммирующая величина противопомехи от активного фильтра

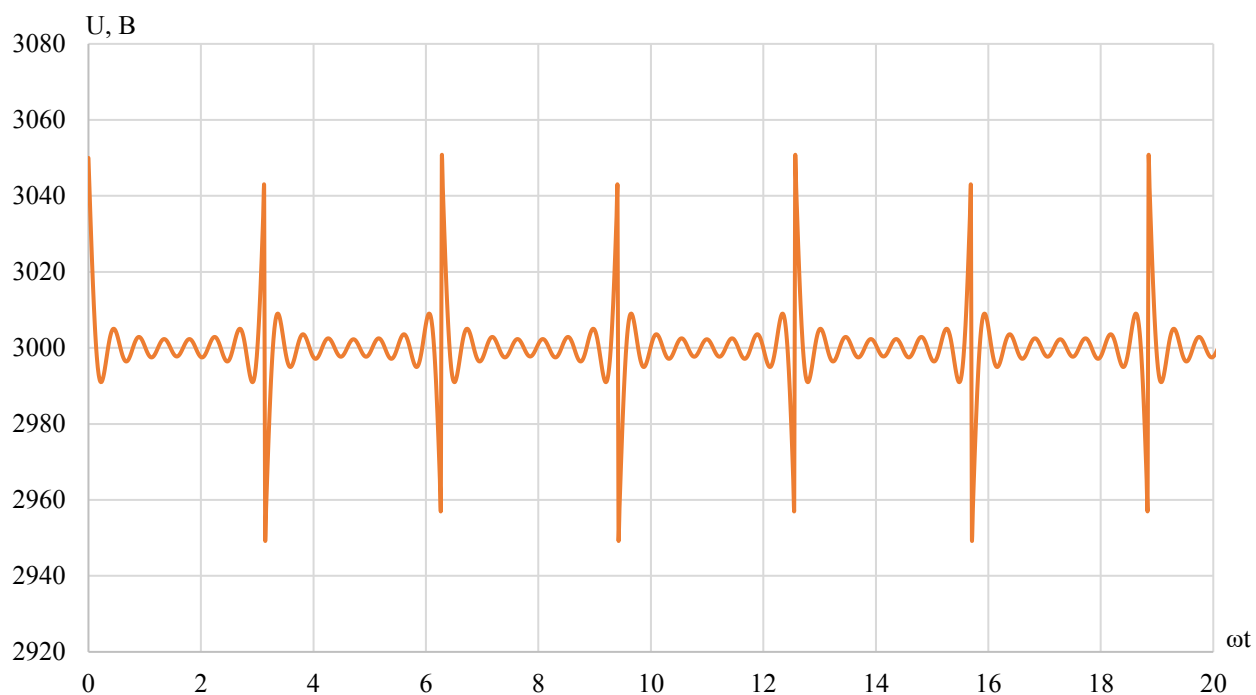


Рисунок 4.21 – Выходное напряжение активного фильтра

Результаты фильтрации помех напряжения в контактной сети пассивным и активным фильтрами представлены на рисунке 4.22.

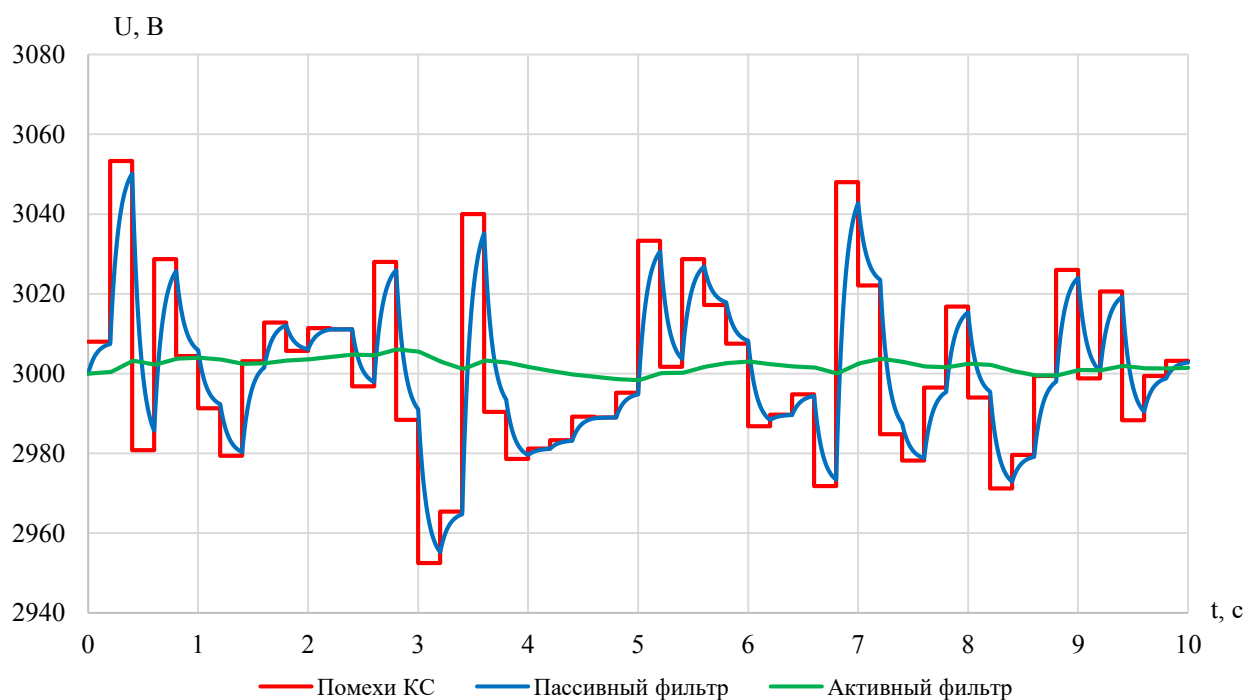


Рисунок 4.22 – Фильтрация помех напряжения в контактной сети пассивным и активным фильтрами

Согласно рисунку 4.22, активный фильтр сглаживает помехи напряжения лучше пассивного фильтра. Более того, выходное напряжение активного фильтра поддерживается на уровне номинального напряжения.

4.3 Анализ результатов по повышению эффективности регулирования тока в силовой цепи электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы за счет активной фильтрации сетевого напряжения

Активная фильтрация отклонения напряжения в контактной сети представлена на рисунке 4.23.

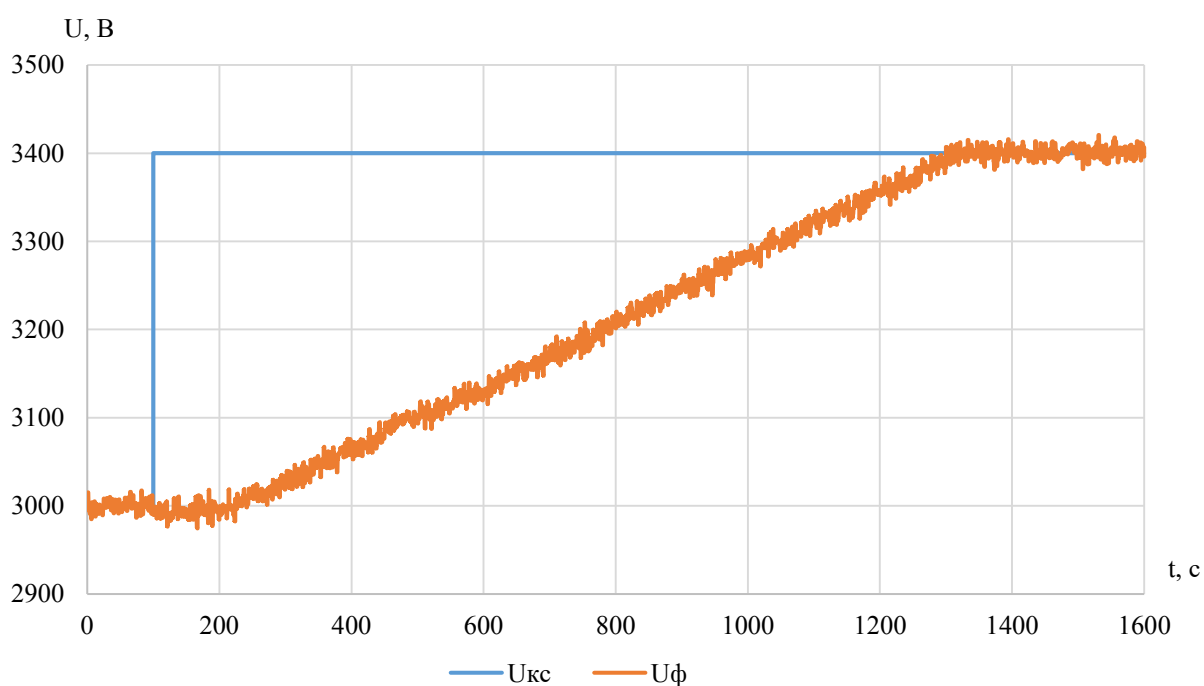


Рисунок 4.23 – Фильтрация помех напряжения в контактной сети активным фильтром

Согласно полученному результату, увеличение напряжения в контактной сети с $U_{кc} = 3000$ В до $U_{кc} = 3400$ В при активной фильтрации составляет 1100 с, что для электрических переходных процессов, измеряемых миллисекундами, оказывает незначительное влияние.

Результаты моделирования тока двигателей электровоза 2ЭС6 для последовательного возбуждения двигателей при активной фильтрации отклонений напряжения на токоприемнике приведены на рисунке 4.24.

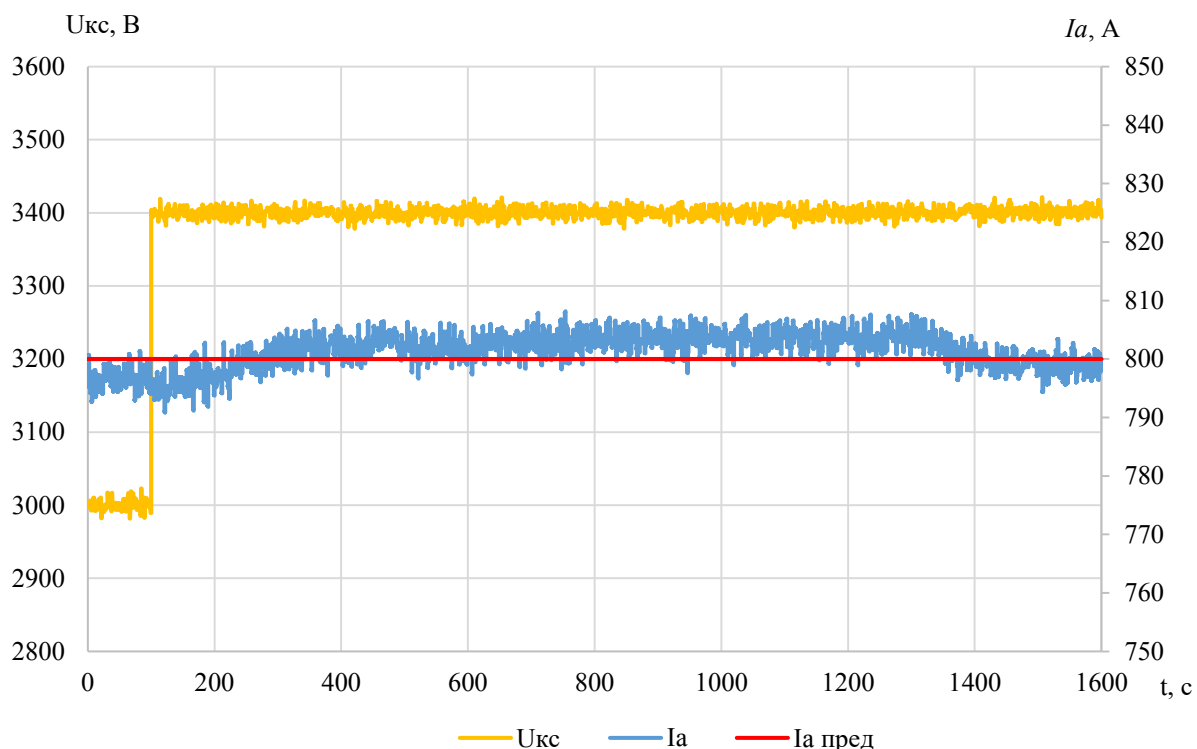


Рисунок 4.24 – Результаты моделирования тока якоря при активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети

Согласно рисунку 4.24, при активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети ток якоря не превышает значения 810 А. При отклонении напряжения активная фильтрация позволяет преобразовать скачок в линейную прямую с градиентом 0,36 В/с [127] (рисунок 4.23). При увеличении градиента возрастают максимальные значения тока якоря.

Применение активной фильтрации для схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 с последовательным возбуждением позволяет уменьшить амплитуду тока якоря с 880 А до 810 А.

Характеристика скорости электровоза в зависимости от фильтрации отклонения напряжения на токоприемнике приведена на рисунке 4.25.

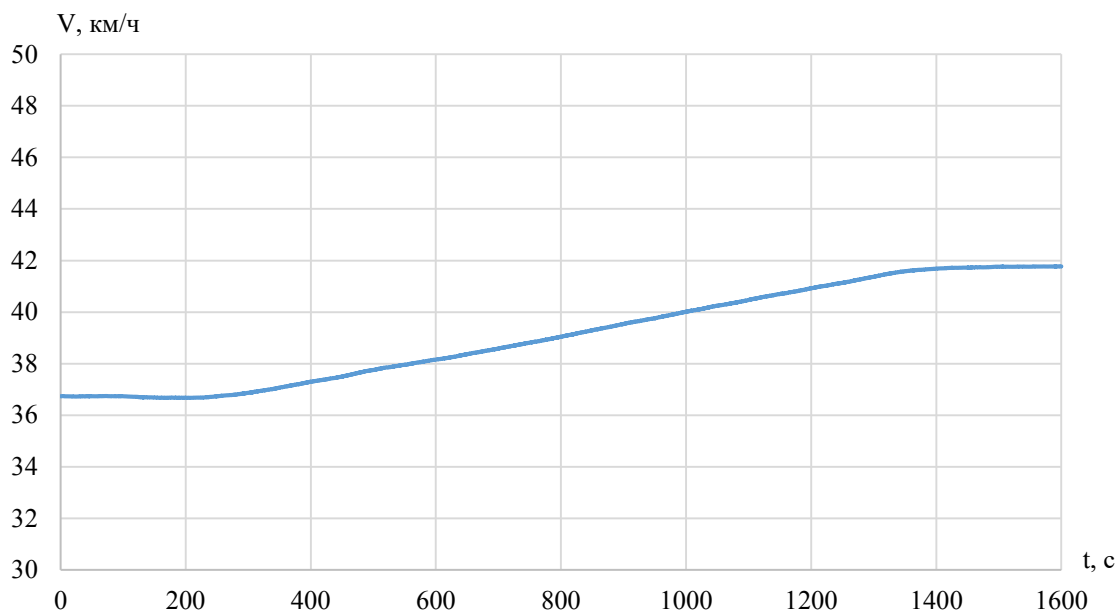


Рисунок 4.25 – Результаты моделирования скорости электровоза при активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети в режиме последовательного возбуждения

Результаты моделирования тока двигателей электровоза 2ЭС6 для независимого возбуждения двигателей при активной фильтрации отклонений напряжения на токоприемнике приведены на рисунке 4.26.

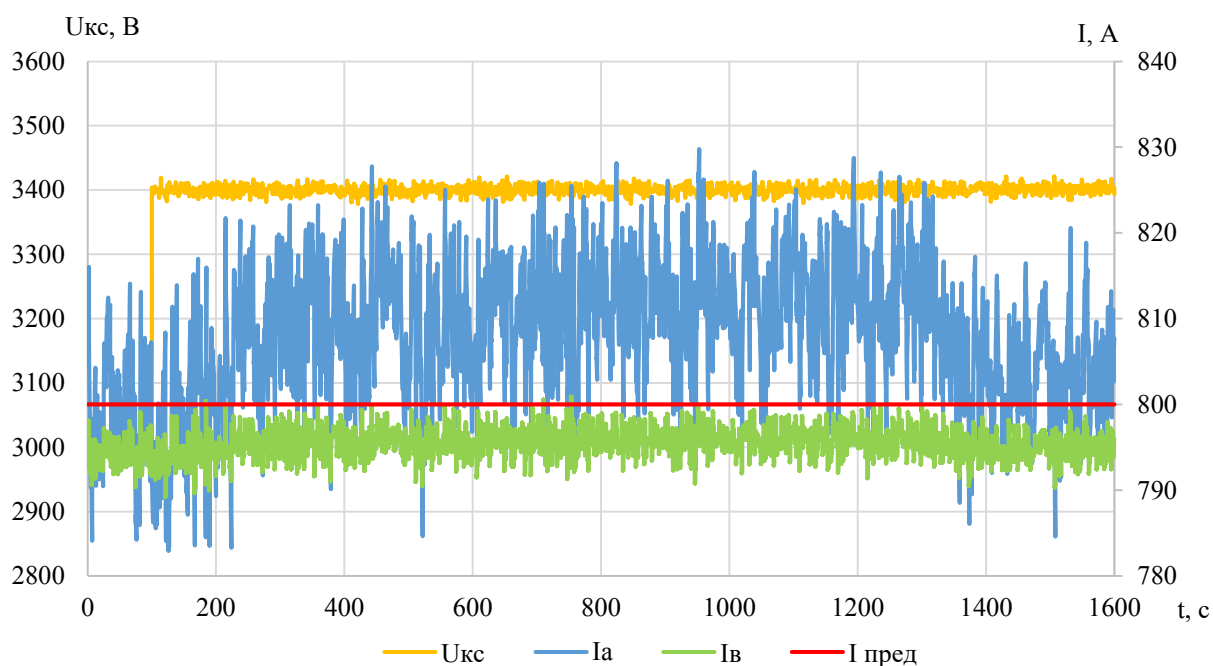


Рисунок 4.26 – Результаты моделирования тока якоря и тока возбуждения при активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети

Характеристика скорости электровоза в зависимости от фильтрации отклонения напряжения на токоприемнике приведена на рисунке 4.27.

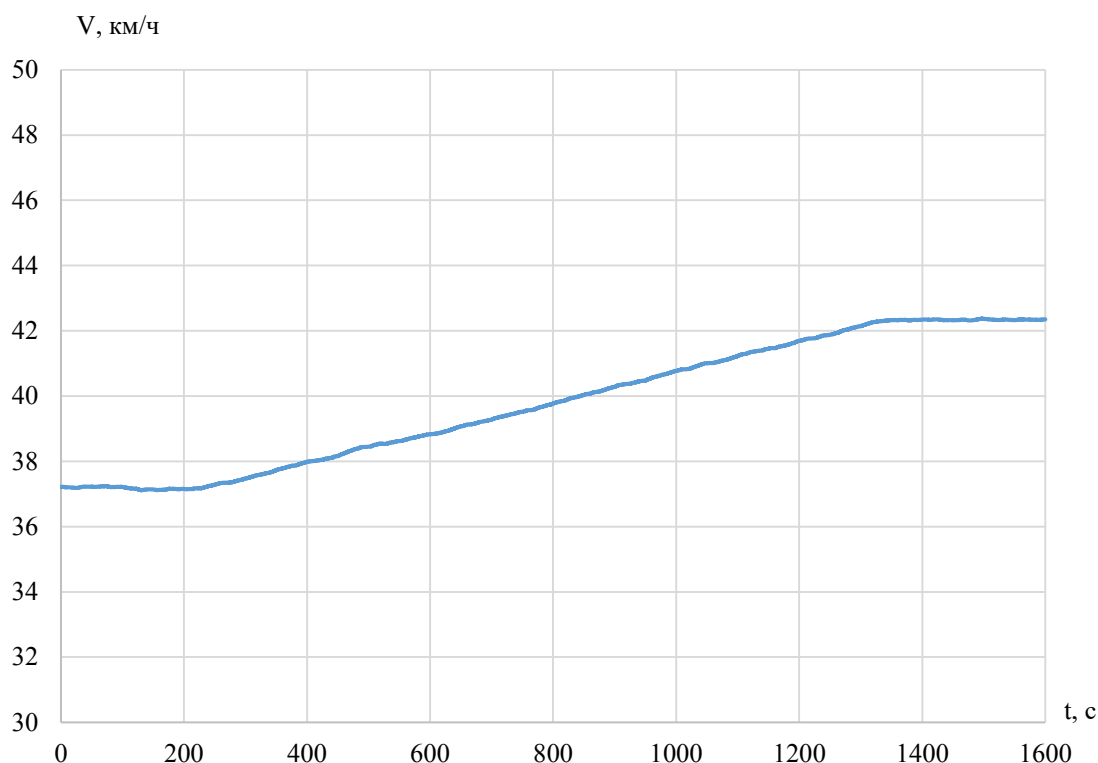


Рисунок 4.27 – Результаты моделирования скорости электровоза при активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети в режиме независимого возбуждения

4.4 Выводы по главе 4

1. Смоделирован индуктивно-емкостной пассивный фильтр низких частот. Данный фильтр позволил снизить градиент отклонения напряжения в контактной сети до 200 В/с. Однако в связи с наличием резонанса создается перерегулирование входного напряжения, выраженного его колебательностью. Увеличение значения сопротивления, индуктивности и емкости позволило исключить перерегулирование, но привело к уменьшению энергоэффективности электровоза.

2. Применение пассивных многозвенных фильтров позволило при заданных параметрах однозвенного фильтра исключить перерегулирование, однако вследствие наличия нескольких резонансов на определенных частотах фильтр пропускает помехи входного напряжения рабочего спектра.

3. Активная фильтрация помех входного напряжения имеет лучший показатель по сравнению с пассивным аналогом, градиент нарастания отфильтрованного напряжения активного фильтра $0,36 \text{ В/с}$, пассивного фильтра – 200 В/с .

4. Применение активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети в 400 В для схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 с последовательным возбуждением позволяет уменьшить амплитуду тока якоря с 880 А до 810 А .

5. Применение активной фильтрации отклонения напряжения в контактной сети в 400 В для схемы силовой цепи электровоза 2ЭС6 с независимым возбуждением позволяет уменьшить амплитуду тока якоря с 900 А до 830 А , амплитуду тока возбуждения – с 900 А до 800 А .

6. Вследствие того, что значение тока возбуждения не превышает предельного, увеличивается надежность преобразователя собственных нужд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые научно обоснованные технические решения и разработки, направленные на улучшение токовых переходных процессов в цепи тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы. Их применение позволит сократить количество отказов и неплановых ремонтов тяговых двигателей за счет повышения эффективности регулирования тока двигателей.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Анализ неисправностей тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 показал, что подавляющая доля отказов связана с потенциальным искрением на коллекторе, вызванным работой электровоза в неустановившихся режимах. Для исследования электрических переходных процессов в системе управления электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах разработана имитационная модель тягового электропривода электровоза постоянного тока для двух систем возбуждения тяговых двигателей (последовательная и независимая). Верификация модели тягового электропривода основывалась на сравнении результатов математического моделирования с результатами тепловых испытаний двигателей. В объём испытаний входил пуск двигателя с выходом в номинальный режим. В неустановившемся (пусковом) режиме максимальное расхождение характеристик напряжения, тока и частоты вращения двигателя лежит в диапазоне $\pm 10\%$, в номинальном режиме расхождение составило $\pm 1\%$.

2. Согласно данным регистратора параметров микропроцессорной системы управления и диагностики электровоза 2ЭС6 установлены максимальные значения колебаний напряжения в контактной сети на уровне 400 В. Результаты моделирования влияния максимальных отклонений напряжения контактной сети участка Сабик – Сарга на токовые переходные процессы в силовой цепи электровоза 2ЭС6 для режимов последовательного и независимого возбуждения тяговых электродвигателей показали, что максимальные броски тока якоря

и тока возбуждения превышают предельные значения. Для их снижения был увеличен максимальный уровень напряжения возбуждения тяговых двигателей с 90 В до 120 В, что позволило снизить до 82 % бросок ток якоря двигателя и до 64 % бросок тока в контуре возбуждения силовой цепи электровоза 2ЭС6. Решение по увеличению напряжения позволяет снижать максимальные токовые броски и их длительность до предельных значений, при отклонениях напряжения в контактной сети не более 200 В и реализуется за счет совершенствования элементов преобразователя собственных нужд (изменение типа тиристорov в цепи выпрямителя и количества витков в обмотках трансформатора).

3. При отклонениях напряжения более 200 В эффективность регулирования тока тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 повышена за счет применения фильтра входного напряжения. Установлено, что при использовании схемы активного фильтра будет меньший градиент изменения выходного напряжения по сравнению с пассивным. Моделирование токовых переходных процессов в силовой цепи электровоза 2ЭС6 с активной фильтрацией входного напряжения показало, что максимальные значения тока якоря и тока возбуждения снижены до 70 % и 95 % соответственно.

Перспективы дальнейшего развития данной темы могут быть связаны с совершенствованием токовых переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока в режимах электрического торможения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андросов, Н. Н. Учет вихревых токов в магнитопроводе при анализе динамических режимов машин постоянного тока / Н. Н. Андросов // Наука и транспорт сегодня: проблемы и решения: – Сб. науч. трудов УрГАПС. – Екатеринбург, 1996. – № 5 (87). – Ч.1.

2. Андросов, Н. Н. Конструкция входного фильтра электровоза постоянного тока / Н. Н. Андросов, И. С. Цихалевский, К. А. Вахрушев // Материалы конференции "Наука и образование транспорту". – 2019. – № 1. – С. 3 – 5.

3. Дядьков, А. М. Опыт применения тяговых двигателей смешанного возбуждения на магистральных электровозах / А. М. Дядьков, Д. Б. Налбандян, В. И. Зонов / Уральский электромех. ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Науч.-техн. о-во и Дом техники Свердл. дороги. – Свердловск : Б. и. – 1961. – 45 с.

4. Жиц, М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М. З. Жиц // . – Москва: Энергия, 1974. – 113 с.

5. Исаев, И. П. Устройство для плавного пуска электроподвижного состава / И. П. Исаев, Ю. М. Иньков, В. П. Феоктистов // Патент на изобретение SU 279697 A1, 05.05.1978. Заявка № 1338408 от 18.06.1969.

6. Лозановский, А. Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методами физического моделирования / А. Л. Лозановский // Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – Москва : [б. и.]. – 1963. – 20 с.

7. Кахульник, А. М. Устройство для ограничения перенапряжения / А. М. Кахульник, И. С. Крюков, Ю. И. Воронов, А. Л. Лозановский, В. И. Чернышев // Патент на изобретение SU 838880 A1, 15.06.1981. Заявка № 2815505 от 05.09.1979.

8. Мазнев, А. С. Полупроводниковые ключевые элементы в устройствах ограничения тока коллекторных двигателей / А. С. Мазнев, В. А. Баранов, А. А.

Киселев, И. П. Викулов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 4. – С. 85 – 93.

9. Мазнев, А. С. Ограничение тока тяговых двигателей электроподвижного состава с коллекторным тяговым приводом в нестационарных режимах / А. С. Мазнев, И. П. Викулов, В. А. Баранов // Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2015. – № 1 (69). – С. 59 – 71.

10. Минов, Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д. К. Минов. – М.: Транспорт, 1965.

11. Некрасов, О. А. Закономерности динамического распределения нагрузок между тяговыми двигателями / Л. А. Мугинштейн, А. А. Хацкелевич, А. В. Андреев // Вестник всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1992. – № 2. – С. 38 – 42.

12. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; Под ред. И. П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.

13. Рюденберг, Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг. – М.: Госэнергоиздат, 1955.

14. Волохов, А. Б. Устройство для регулирования напряжения последовательно соединенных тяговых электродвигателей электроподвижного состава с независимым возбуждением / А. Б. Волохов, С. Г. Волков, А. П. Марченков, В. Д. Тулупов // Патент на изобретение № 1463547, 07.03.1989. Заявка № 4288402 от 22.07.1987.

15. Тулупов, А. В. Эффективный способ шунтирования обмоток возбуждения тяговых машин / А. В. Тулупов, В. Д. Тулупов // Вестник московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2016. – № 4. – С. 92 – 99.

16. Зарифьян, А. А. Моделирование электромеханических электровозных систем / А. А. Зарифьян, Л. Н. Сорин, В. П. Янов // статья в сборнике трудов конференции "Актуальные проблемы Транссиба на рубеже веков". – 2000. – С. 40 – 42.

17. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография / В. Д. Авилов // ; М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Омский гос. ун-т путей сообщ.". – Омск : ООО "Издат. центр "Омский науч. вестн.", 2013. – 355 с.

18. Авилов, В. Д. Коммутация в тяговых двигателях с новым скользящим контактом / В. Д. Авилов // Национальные приоритеты России. – 2013. – № 3 (10). – С. 86 – 89.

19. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин; Под ред. А. С. Курбасова // Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. – М. : Транспорт, 1987. – 535 с.

20. Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин / Д-р техн. наук проф. М. Д. Находкин, кандидаты техн. наук Г. В. Василенко и В. И. Бочаров, М. А. Козорезов ; Под ред. проф. М. Д. Находкина // Учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, – 1976. – 624 с.

21. Розанов, Ю. К. Силовая электроника / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк // Учебник для вузов, 2-е изд. – М.:Издательский дом МЭИ. – 2009 – 632 с.

22. Обзор рынка – обзор результатов – Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2019 г. [Электронный ресурс] // – URL: <https://ar2019.rzd.ru/ru/performance-overview/market-overview> (дата обращения 19.10.2020).

23. Трикоз, Л. В. Снижение воздействия метеорологических изменений на транспортировку железнодорожным транспортом / Л. В. Трикоз, И. В. Багиянц // Сборник материалов Международной научно-практической интернет-конференции «Экстремальные ситуации природного характера: проблемы, факторы, последствия». – 2016. – С. 36 – 46.

24. Каминский, Н. С. Перспективы развития гибридных транспортных средств / Н. С. Каминский, М. А. Овсянко // Аллея науки. – 2019. – № 5 (32). – С. 967 – 970.

25. Охрана окружающей среды | ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] // – URL: https://old-www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=1413&layer_id=3290&refererLayerId=162&id=4162 (дата обращения 19.10.2020)

26. Феоктистов, В. П. Электрические железные дороги: учебник / под ред. проф. В.П. Феоктистова, проф. Ю.Е. Просвинова // Учебник, Моск. ун-т путей сообщения; Самарская гос. акад. путей сообщения. – Самара: СамГАПС, 2006. – 312 с.

27. История железнодорожного транспорта Советского Союза. Т. 2: 1917 – 1945 гг. – СПб., 1997. – 416 с.: ил.

28. История железнодорожного транспорта Советского Союза. Т. 3: 1945 – 1991 гг. – М., 2004. – 631 с.: ил.

29. Андрющенко, А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андрющенко, Ю. В. Бабоков, А. А. Зарифьян и др.; под ред. А. А. Зарифьяна // Учебное пособие – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 412 с.

30. Зубов, А. Н. Трансформеры встают на рельсы/ А. Н. Зубов // Гудок. – 2019. – № 60 (26669). – 3 полоса / Перспективы.

31. Мазнев, А. С. Улучшение регулировочных свойств электрического подвижного состава постоянного тока / А. С. Мазнев, А. А. Киселев // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 17 – 27.

32. Титов, Ю. В. Повышение надежности работы тяговых электродвигателей локомотивов за счет применения электроискровой обработки коллекторных пластин / Ю. В. Титов, Д. Ю. Белан, Г. Б. Тодер, А. О. Отраднова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – № 1 (21). – С. 16 – 24.

33. Силовые цепи электровозов 2ЭС6 "Синара" // Локомотив. – 2019. – № 2 (746). – С. 34 – 39.

34. Силовые цепи электровозов 2ЭС10 "Гранит" // Локомотив. – 2019. – № 6 (750). – С. 21 – 23.

35. Бочаров, В. И. Магистральные электровозы: Тяговые электрические машины / Ред. А. И. Бочаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

36. ГОСТ 33943-2016 «Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения»

37. Винокуров, В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта: / В. А. Винокуров, Д. А. Попов // Учеб. для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1986. – 510 с.

38. Жоголев, Е. Н. Исследование причин возникновения неисправностей тяговых электродвигателей на грузовых электровозах постоянного тока 2ЭС6 / Е. Н. Жоголев // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. научн. тр. – 2020. – С. 76 – 79.

39. Солтус, К. П. Привод электровоза с последовательным и смешанным возбуждением тяговых электродвигателей / К. П. Солтус, Б. И. Хоменко // Патент на изобретение RU 2444448 С1, 10.03.2012. Заявка № 2010134551/11 от 18.08.2010.

40. Бегагоин, Э. И. Теория электрической тяги. Часть II. Особенности и свойства тягового электропривода электроподвижного состава / Э. И. Бегагоин, Д. Л. Худояров, В. Я. Шамаева // Конспект лекций по дисциплине «Теория электрической тяги», Екатеринбург – 2008. – 49 с.

41. Широченко, Н. Н. Особенности тяги электровоза 2ЭС6 / Н. Н. Широченко // Локомотив. – 2016. – № 9 (717). – С. 42 – 43.

42. Отчет тягово-энергетических испытаний № ТЭЛ 001-01-18 «Определение нормы массы грузовых поездов для локомотива 2ЭС6 на участках Бабаево – Лужская, Бабаево – Санкт-Петербург в четном и нечетном направлениях» от 19.03.2018 г.

43. Отчет экспертно-аналитического управления ООО «Уральские локомотивы» по отказам тяговых электродвигателей электровоза серии 2ЭС6 за 2020, 2021 года.

44. Брон, О. Б. Круговой огонь на коллекторе машин постоянного тока / О. Б. Брон, В. С. Александров // Электричество. – 1935. – № 3.

45. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов // Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт. – 1991. – 343 с.

46. Сулейманов, Р. Я. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей постоянного тока / Р. Я. Сулейманов, С. Р. Гимаев // статья в сборнике трудов конференции "Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии". – 2013. – С. 81 – 88.

47. Лисицын, А. Л. Реальные режимы работы грузовых электровозов постоянного тока на грузонапряжённых участках / А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн // Сборник научных трудов. Сер. "Труды ВНИИЖТ". – 1985. – С. 11 – 29.

48. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов // М.: Высшая школа, – 2000. – 607 с.

49. Бублик, В. В. Анализ перенапряжений и бросков тока в обмотках тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 в переходных режимах / В. В. Бублик, О. В. Гателюк, Е. А. Третьяков, Д. В. Юрасов // Статья в сборнике трудов конференции «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов». – 2018. – С. 16 – 24.

50. Бахвалов, Ю. А. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян, П. Ю. Петров и др.; под ред. А. А. Зарифьяна // Монография. – М.: Маршрут, 2006. – 374 с.

51. Отчет экспертно-аналитического управления ООО «Уральские локомотивы» по отказам тяговых электродвигателей электровоза серии 2ЭС10 за 2020 год.

52. Тюрин, А. Р. Синтез нелинейных САУ с заданными показателями качества / А. Р. Тюрин // Материалы докладов IX международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения". – 2014. – С. 402.

53. Облизина, С. В. Изучение переходных процессов в цепи электрического тока / С. В. Облизина, В. Ф. Федоров // Теоретические и прикладные аспекты современной науки : сб. науч. тр. по матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2015. Ч. I. С. 16–18.

54. Римский, В. К. Численное моделирование переходных и установившихся процессов в электрических цепях с переменными параметрами / В. К. Римский, В. П. Берзан, В. И. Пацюк // Проблемы региональной энергетики. – 2008. – № 2. – С. 79 – 91.

55. Белов, И. Н. Расчет переходных процессов в электрической цепи переменного тока в условиях нестабильности параметров / И. Н. Белов, Д. П. Андрианов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара : Изд-во СамГТУ. – 2017. Т. 2. С. 96 – 97.

56. Мелентьев, В. С. Синтез методов измерения параметров двухполюсных электрических цепей по мгновенным значениям переходных процессов / В. С. Мелентьев, Е. В. Костенко, Т. С. Евстифеева, К. Д. Левина // Вестник самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2014. – № 1 (41). – С. 62 – 71.

57. Иванов, В. И. Порядок переходных процессов в электрических цепях / В. И. Иванов, В. Р. Киреев, В. Ф. Шаталов // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – № 4. – С. 22 – 25.

58. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов // Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М. – 1972. – 768 с.

59. Корсакова, И. М. Исследование систем автоматического управления / И. М. Корсакова // Инновационное развитие науки и образования // монография под общ. ред. Гуляева Г. Ю. – 2018. – С. 195 – 206.

60. Складчиков, М. В. Способ формирования переходных процессов в электрических цепях / М. В. Складчиков, Н. С. Никорюк // Материалы 4-й международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – 2018. – С. 7 – 11.

61. Мелентьев, В. С. Методы определения параметров переходных процессов в электрических цепях / В. С. Мелентьев // Вестник СамГТУ. Сер. : Физико-математические науки. – 2004. – №. 30. – С. 190 – 194.

62. Андросов, Н. Н. Математическое моделирование динамических режимов работы электровозов постоянного тока / Н. Н. Андросов // Методическое пособие для дипломного проектирования – Екатеринбург: УрГУПС, 2000. – 26 с.

63. Дурандин, М. Г. Работа тяговых электрических машин в неустановившихся режимах / М. Г. Дурандин // Учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 64 с.

64. Кузнецов, А. И. Математическое описание переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока с различными типами тягового электропривода / А. И. Кузнецов, Н. О. Фролов // Транспорт Урала. – 2019. – № 2 (61). – С. 76 – 79.

65. Петров, Ю. С. Методические особенности применения законов Кирхгофа для расчета электрических цепей / Ю. С. Петров, Л. В. Рогачев, А. М. Соин // Труды СКГМИ (ГТУ). – 2017. – № 24. – С. 87 – 93.

66. Андреева, Е. Г. Уравнения магнитного поля для численного исследования магнитоэлектрических машин в электротехническом комплексе / Е. Г. Андреева, А. А. Татевосян // Статья в сборнике трудов конференции "Актуальные проблемы современной науки». – 2019. – С. 64 – 69.

67. Владыкин, А. В. Разработка методики выбора конструктивных параметров энергоэффективного асинхронного тягового привода метрополитена / А. В. Владыкин // диссертация канд. техн. наук: 05.22.07 / УрГУПС. – Екатеринбург, 2018. – 154 с.

68. Кузнецов, А. И. Анализ систем возбуждения коллекторных тяговых двигателей электровозов постоянного тока / А. И. Кузнецов // Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов "Техника и технологии наземного транспорта". – 2018. – № 2 (32). – С. 51 – 55.

69. Прохоров, С. Г. Электрические машины / С. Г. Прохоров, Р. А. Хуснутдинов // Учебное пособие. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – 409 с.

70. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов, И. П // : Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

71. Даденков, Д. А. Учебный программный комплекс для расчета и анализа механических переходных процессов в системах электропривода / Д. А. Даденков, И. С Лузянин // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2013. – № 1. – С. 98 –107.

72. Соболев, В. А. Изучение переходных процессов в линейных электрических цепях с применением программного продукта MULTISIM 10.1 / В. А. Соболев // Альманах современной науки и образования. – 2014. – № 12 (90). – С. 112 – 116.

73. Малышев, М. А. Моделирование переходных процессов системы управления электропривода конвейерной сушилки / М. А. Малышев // Science Time. – 2017. – № 10 (46). – С. 27 – 34.

74. Дурандин, М. Г. Тяговые электрические машины и преобразователи: метод. указания / М. Г. Дурандин. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 45 с.

75. Кучумов, В. А. Совершенствование электрооборудования тягового подвижного состава / В. А. Кучумов, Н. Б. Никифорова // Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» – М.: Интекст, 2011. – 152 с.

76. Стенд взаимной нагрузки. Руководство по эксплуатации автоматизированного нагрузочного стенда на статических преобразователях для испытания тяговых двигателей на испытательной станции ООО «Уральские локомотивы», Верхняя Пышма. – 2008. – 26 с.

77. Кузнецов, А. И. Моделирование режимов работы тяговых электрических двигателей постоянного тока / А. И. Кузнецов, Н. О. Фролов // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 64 – 68.

78. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко // Учеб. пособие для высш. проф. образования. – 2-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 368 с.

79. Электровоз 2ЭС6. Руководство по эксплуатации электровоза грузового постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Описание и работа преобразователей и электрических машин. 2ЭС6.00.000.000 РЭЗ. – Верхняя Пышма. – 2008. – 156 с.

80. Брексон, В. В. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / В. В. Брексона // – Верхняя Пышма: ООО «Уральские локомотивы», 2015. – 328 с.

81. ГОСТ 2582-2013 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия».

82. Электродвигатель тяговый постоянного тока ЭК-810Ч. Программа и методика тепловых испытаний тяговых электродвигателей с опытными кожухами выхлопными электровоза 2ЭС6, 10 с.

83. Шапран, А. А. Теория автоматического управления / А. А. Шапран // Конспект лекций. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 147 с.

84. Каргу, Л. И. Основы автоматического регулирования и управления / Л. И. Каргу, А. П. Литвинов // Учебн. пособие для неэлектротехн. специальностей вузов. М.: "Высшая школа", 1974 – 439 с.

85. Петраков, Ю. В. Теория автоматического управления технологическими системами / Ю. В. Петраков, О. И. Драчев // Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2008. – 336 с.

86. Кузнецов, А. И. Особенности описания переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями / А. И. Кузнецов // Наука и образование транспорту. – 2019. – № 1. – С. 42 – 46.

87. Бегагоин, Э. И. Теория электрической тяги. Часть I. Основы теории тяги поездов / Д. Л. Худояров, В. Я. Шамаева // Конспект лекций по дисциплине «Теория электрической тяги». Екатеринбург, 2008. – 49 с.

88. Маклиман, В. Проектирование трансформаторов и дросселей / В. Маклиман // Справочник. 3-е изд., пересм. и доп. / Перевод с англ. Попов В. В. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 476 с.

89. Фролов, Н. О. Разработка системы управления электровоза постоянного тока / Н. О. Фролов // Методические рекомендации по выполнению курсового проекта. Екатеринбург, 2019. – 48 с.

90. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

91. Кузнецов, А. И. Влияние колебаний напряжения контактной сети на токовые переходные процессы в силовой цепи электровоза / А. И. Кузнецов // Вестник УрГУПС. – 2022. – № 2 (54). – С. 32 – 40.

92. Жилин, П. А. Рациональная механика сплошных сред / П. А. Жилин // Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 584 с.

93. Нормативное производственно-практическое издание: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 г. – М. : ОАО «РЖД». – 2016. – 515 с.

94. Железнодорожная карта профиля пути перегона Сабик – Сарга Свердловской железной дороги.

95. Кузнецов, А. И. Ограничение уровня переходных процессов в силовой цепи электровоза 2ЭС6 при резком изменении напряжения в контактной сети / А. И. Кузнецов, Н. О. Фролов // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 3 (81). – С. 33 – 40.

96. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных // – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

97. Модель двигателя постоянного тока – MATLAB & Simulink // Support // Documentation // DC Motor Model.

98. Электровоз ВЛ11. Руководство по эксплуатации / Под ред. Г. И. Чиракадзе и О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1983, 464 с.

99. Преобразователь собственных нужд электровоза 2ЭС6. Руководство по эксплуатации комплекта преобразователя собственных нужд грузового электровоза постоянного тока 2ЭС6. – 2012. – 135 с.

100. Гурина, Л. А. Электромагнитные помехи и методы защиты от них / Л. А. Гурина // Учебное пособие. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2006.

101. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин // Учеб. для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 479 с.

102. Терехин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1) / В. Б. Терехин // Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.

103. Бегагоин, Э. И. Основы теории автоматического регулирования / Э. И. Бегагоин, И. А. Кузьминых // Учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 112 с.

104. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов / А. С. Анучин // Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

105. Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники. Изд. 2-е. / А. Е. Каплянский // Учеб. пособие для электротехнических и энергетических специальностей вузов. М., «Высшая школа», 1972. – 448 с.

106. Серебряков, А. С. Трансформаторы: учебное пособие для вузов: для студентов, обучающихся по направлению подготовки 140400 "Электроэнергетика и электротехника" / А. С. Серебряков. – Москва: Изд. дом МЭИ, 2014. – 359 с.

107. Кузнецов, А. И. Уточненный расчет фильтров низких частот электровозов постоянного тока с асинхронным тяговым приводом / А. И. Кузнецов // Транспорт Урала. – 2020. – № 3 (66). – С. 100 – 103.

108. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев // Учеб. для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.

109. Осадченко, В. Х. Фильтры высоких и низких частот / В. Х. Осадченко, Я. Ю. Волкова, Ю. А. Кандрина; [под общ. ред. В. Х. Осадченко] Учеб.-метод. пособие, М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 80 с.

110. ГОСТ Р 55364–2012. Электровозы. Общие технические требования. Москва : Стандартинформ, 2013. 36 с.

111. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков // Учеб. для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт. 1999. – 464 с.

112. Электровоз 2ЭС10. Руководство по эксплуатации электровоза грузового постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Описание и работа оборудования Siemens. – Верхняя Пышма. – 2011. – 91 с.

113. Жигарев, С. Применение активных фильтров – эффективный метод улучшения качества электроэнергии / С. Жигарев // Главный энергетик. – 2009. – № 5. – С. 16 – 18.

114. Евтушенко, Ю. Схемы частотной коррекции / Ю. Евтушенко // Автозвук. – 2009. – № 10. – С. 60 – 64.

115. Kuznetsov, A. I. Application of low frequency active filters on DC electric carriers with asynchronous traction drive / A. P. Buynosov, B. S. Sergeev, B. A. Arzhannikov, N. O. Frolov, A. I. Kuznetsov // Scientific Conference on Railway Transport and Engineering (RTE 2021). – 2020. – pp. 090002. <https://doi.org/10.1063/5.0063520>.

116. Кузнецов, А. И. Устройство фильтрации скачков напряжения контактной сети постоянного тока / А. И. Кузнецов // Патент на полезную модель RU 208900 H02J 1/02, 21.01.2022. Заявка № 2021127834 от 21.09.2021.

117. Семенов, А. С. Применение активных фильтров для обеспечения качества электроэнергии / А. С. Семенов, В. А. Бондарев // Статья в сборнике трудов конференции «Молодежь в науке: новые аргументы». – 2016. – С. 164 – 167.

118. Джагаров, Н. Ф. Улучшение качества электроэнергии в электрических сетях. Обзор методов управления активными фильтрами для улучшения

качества электрической энергии / Н. Ф. Джагаров, Д. Н. Цветанов, Ю. В. Джагарова // Промышленная энергетика. – 2019. – № 6. – С. 53 – 61.

119. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл // Пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ. – 2014. – 704 с.

120. Сафронова, Ю. Ф. Лабораторная работа: Активные фильтры на основе операционного усилителя / Ю. Ф. Сафронова, М. А. Павлейно // Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург, 2019 г.

121. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович – М.: Издательский дом "Додека-XXI", 2015, 636 с.

122. Егоров, Е. Н. Активные фильтры / Е. Н. Егоров, А. А. Короновский, А. Е. Храмов // Учебно-методическое пособие, Саратов, 2010 г., 17 с.

123. Микросхема интегральная К1921ВК01Т. Техническое описание. КФДЛ.431295.057ТО, Литера А, 2015 г, 451 с.

124. Романова, Л. Д. Интегральные преобразования: / Л. Д. Романова, Т. А. Шаркунова, Т. В. Елисеева // Учеб. пособие – Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. – 80 с.

125. Романова Л. Д. Интегральные преобразования / Л. Д. Романова, Т. А. Шаркунова, Т. В. Елисеева // Учебное пособие – Пенза, 2015 г., 80 с.

126. Исламгулова, Г. Ф. Интегральное исчисление. Ряд Лейбница. Ряды Фурье / Г. Ф. Исламгулова // Учебно-методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Математика» – Уфа, 2018 г., 29 с.

127. Оржанова, Ж. К. Волновые процессы и перенапряжения в электрических сетях / Ж. К. Оржанова, С. Е. Соколов // Конспект лекций для научно-педагогической магистратуры специальности «Электроэнергетика / Алма-Аты, 2013 г., 62 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Патент РФ на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 208900**УСТРОЙСТВО ФИЛЬТРАЦИИ СКАЧКОВ
НАПРЯЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**Патентообладатель: *Общество с ограниченной
ответственностью "Уральские локомотивы" (RU)*Автор(ы): *Кузнецов Алексей Иванович (RU)*

Заявка № 2021127834

Приоритет полезной модели 21 сентября 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 21 января 2022 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 21 сентября 2031 г.Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Документы о внедрении результатов диссертационной работы


**Уральские
ЛОКОМОТИВЫ**

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Уральские локомотивы»
(ООО «Уральские локомотивы»)**

Парковая ул., д. 36, г. Верхняя Пышма,
Свердловская область, 624090
Телефон (34368) 97-4-71, (343) 379-41-40
Факс (343) 379-41-09
E-mail: mail@ulkm.ru
ОКПО 66770314, ОГРН 1106606000929
ИНН/КПП 6606033929/660850001

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Департамента
конструкторских разработок
и исследований


Е. В. Федоров

«03» 10 2022

АКТ**о внедрении результатов диссертационной работы**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Кузнецова Алексея Ивановича на тему «Повышение эффективности регулирования тока тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы» использованы на ООО «Уральские локомотивы» при выполнении проектных расчетов по оценке токовых переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока.

Элементы математической модели и подходы к моделированию, разработанные Кузнецовым А. И., использовались при создании моделей силовых цепей электровозов 2ЭС6 и 2ЭС10 в программном комплексе MATLAB/Simulink и постановке численных экспериментов для определения следующих характеристик:

- временные характеристики напряжения, тока якоря и тока возбуждения, частоты вращения тяговых электродвигателей в режиме взаимного нагружения;
- временные характеристики тока в силовой цепи при броске напряжения в контактной сети;
- величина пассивной и активной фильтрации входного напряжения электровозов.

Таким образом, результаты диссертационной работы позволили оценить влияние принятых конструкторских решений на токовые переходные процессы в силовых цепях электровозов постоянного тока и подтвердить соответствие требованиям ГОСТ Р 55364-2012 «Электровозы. Общие технические требования».

Начальник управления
проектирования подвижного состава



Д. Э. Лимонов



Интегрированная система менеджмента (ИСМ) ООО «Уральские локомотивы»
сертифицирована на соответствие требованиям международных стандартов
ISO 9001, ISO/TS 22163, ISO 14001 и ISO 45001



Рисунок Б.1 – Акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «Уральские локомотивы»



*О внедрении результатов исследования
диссертационных работ профильных
образовательных учреждений*

Результаты диссертационного исследования ассистента Уральского государственного университета путей сообщения Кузнецова Алексея Иванович, выполненного на тему: «Повышение эффективности регулирования тока тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы» внедрены в производственный процесс в Сервисном локомотивном депо «Свердловск».

Главный технолог
СЛД Свердловск




А. В. Золотухин

Общество с ограниченной ответственностью «СТМ-Сервис»
620026, г. Екатеринбург, Розы Люксембург ул., д. 51
Тел.: +7 (343) 310-33-68, факс: +7 (343) 229-35-78
E-mail: secretarctm-s@sinara-group.com

Рисунок Б.2 – Акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «СТМ-Сервис»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«Уральский государственный
университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)**
Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034
Тел./факс: (343) 221-24-44
E-mail: rector@usurt.ru
<http://www.usurt.ru>
ОКПО 01116035, ОГРН 1026602950065
ИНН/КПП 6659014366/665901001
05.10.2022 г. № 5874-056
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
работе УрГУПС


С. В. Бушуев

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
Кузнецова А. И. в учебном процессе

Выдана Кузнецову Алексею Ивановичу для предоставления в диссертационный совет 44.2.008.01 (Д 218.013.01), подтверждающая, что результаты диссертационной работы «Повышение эффективности регулирования тока тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в неустановившихся режимах работы» используются на кафедре «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения в процессе обучения студентов всех форм обучения по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» по дисциплине «Электронные преобразователи для электроподвижного состава».

Согласовано:

Заведующий кафедрой
«Электрическая тяга»



Н. О. Фролов

Рисунок Б.3 – Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс Уральского государственного университета путей сообщения