

На правах рукописи



Бойчевский Александр Валерьевич

ОГРАНИЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
НА КОНДЕНСАТОРЕ ФИЛЬТРА ТИРИСТОРНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТРАМВАЙНЫМИ ВАГОНАМИ
ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Шпиганович Александр Николаевич.

Официальные оппоненты:

Бабокин Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика и энергоэффективность горных предприятий» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»;

Бородин Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 года в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, административный корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан « 07 » октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Телегин Валерий Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Городской транспорт, основанный на использовании электрической энергии, является важной составной частью городской инфраструктуры, так как он не только социально значим, но и в огромной степени способствует преодолению экологических проблем современной городской среды. При этом для современного этапа развития пассажирского городского электрического транспорта, работающего на постоянном напряжении, характерно широкое использование тиристорно-импульсных систем управления (ТИСУ), существенно повышающих экономичность его работы. Однако, успешное использование ТИСУ неразрывно связано с решением ряда проблем, одной из которых является проблема обеспечения ТИСУ эффективной и быстродействующей защитой от всех возможных видов перенапряжений. Особенно это касается защит ТИСУ, установленных на трамвайных вагонах городского электротранспорта, так как несмотря на значительный объём исследований, проведённых в области создания средств защиты электрооборудования от перенапряжений, вопросы эффективного гашения перенапряжений на них решены не полностью. В частности, не решён вопрос эффективного ограничения коммутационных перенапряжений, обусловленных сбросом электромагнитной энергии индуктивности тяговой сети в конденсатор фильтра ТИСУ при отключении внешних коротких замыканий, вызванных аварийными кратковременными перемыканиями типа «троллей-рельс» в системах электроснабжения городского электрического транспорта. Этот вид перенапряжений характеризуется значительной величиной и распределённостью электромагнитной энергии, запасаемой в индуктивности тяговой трамвайной сети при аварийных режимах, высокой кратностью и быстротечностью достижения максимальных уровней, что не позволяет эффективно гасить их при помощи известных средств защиты в указанного класса сетях постоянного тока.

Поэтому исследования по разработке эффективных средств ограничения коммутационных перенапряжений на конденсаторе фильтра ТИСУ трамвайных вагонов, обусловленных отключением токов коротких замыканий типа «троллей-рельс», являются актуальными, так как в конечном итоге способствуют повышению надёжности работы трамвайных вагонов, оснащённых тиристорно-импульсными системами управления и исключению аварийных ситуаций на городском электрическом транспорте.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются средства защиты ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта от коммутационных перенапряжений. Предметом исследования являются коммутационные перенапряжения, появляющиеся на входе ТИСУ трамвайных вагонов при аварийных режимах в системе электроснабжения городского электрического транспорта, а также средства защиты от них, основанные на использовании демпфирующих свойств линейных резисторов и конденсатора фильтра ТИСУ.

Целью работы является эффективное снижение коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов, обусловленных сбросом электромагнитной энергии индуктивности тяговой сети в конденсатор фильтра ТИСУ

при отключении аварийных токов короткого замыкания типа «троллей-рельс» в системе электроснабжения городского электрического транспорта.

Идея работы базируется на разработке способа и реализующего его устройства защиты ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений, основанных на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра ТИСУ и трёх линейных резисторов, вводимых в цепь гашения перенапряжений по алгоритму, обеспечивающему глубокое ограничение коммутационных перенапряжений за счет оптимального поглощения энергии перенапряжения.

Для достижения сформулированной цели основными задачами диссертационной работы являются:

1. Разработка способа, основанного на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра ТИСУ и линейных резисторов, способного обеспечить при энергиях перенапряжений в тысячи джоулей глубокое ограничение коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта.

2. Теоретическое исследование по оптимизации предлагаемого способа с целью вывода аналитических зависимостей, связывающих между собой энергию перенапряжения, величину емкости конденсатора фильтра ТИСУ, значения сопротивлений демпфирующих резисторов и соответствующий им возможный минимум максимального выброса напряжения на входе ТИСУ трамвайного вагона.

3. Разработка инженерной методики выбора оптимальных значений емкости конденсатора фильтра ТИСУ трамвайного вагона и сопротивлений демпфирующих резисторов, обеспечивающих требуемые параметры гашения коммутационных перенапряжений, обусловленных электромагнитной энергией, запасаемой в индуктивности тяговой сети при отключении аварийных режимов в системе электроснабжения городского электрического транспорта постоянного тока.

4. Разработка принципиальной схемы устройства, реализующего предложенный способ ограничения коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона городского электрического транспорта и инженерной методики выбора демпфирующих резисторов по энергии, рассеиваемой в них в процессе ограничения коммутационных перенапряжений.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Поставленные в работе задачи решались на основе анализа теоретических работ, авторских свидетельств и патентов ученых и специалистов в области защиты электрооборудования от перенапряжений, системного подхода с использованием методов математического моделирования, методов расчета переходных процессов в электрических цепях, методов оптимизации, методов интегрального исчисления и экспериментальных исследований с применением ЭВМ.

Научные результаты, выносимые на защиту.

1. Исследования коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов, обусловленных отключением аварийных токов короткого замыкания в системе электроснабжения городского электрического транспорта.

2. Способ глубокого ограничения коммутационных перенапряжений, основанный на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра

ТИСУ и трёх линейных резисторов, вводимых на короткое время в цепь гашения перенапряжений, позволяющий в наиболее тяжелом режиме, с точки зрения возникновения перенапряжений повышенных уровней, обеспечить снижение их кратности на входе ТИСУ трамвайных вагонов до безопасных значений.

3. Исследования по оптимизации предложенного способа, позволившие получить аналитические зависимости, связывающие между собой энергию перенапряжения, оптимальные значения сопротивлений демпфирующих резисторов и емкости конденсатора фильтра ТИСУ, индуктивность тяговой сети и соответствующую им минимально возможную кратность перенапряжения на входе ТИСУ трамвайного вагона.

4. Принципиальная схема устройства, реализующего способ защиты ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений с тремя демпфирующими резисторными звеньями.

5. Инженерная методика выбора демпфирующих резисторов по энергии, рассеиваемой в них в процессе ограничения коммутационных перенапряжений, основанная на использовании, полученных в результате исследования, аналитических выражений, связывающих между собой энергию, выделяемую в демпфирующих резисторах за цикл демпфирования перенапряжения, массу их токопроводящих резистивных элементов, удельную теплоемкость и температуру нагрева.

Научная новизна результатов исследования заключается:

- в определении и выявлении (на основе исследований) параметров коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов, обусловленных сбросом в конденсатор фильтра ТИСУ электромагнитной энергии, запасённой в индуктивности тяговой сети при протекании в ней аварийных токов короткого замыкания, что позволило установить: высокую вероятность их возникновения при любых кратковременных переключениях типа «троллей-рельс»; высокий уровень их кратности, достигающий до 3,64 единиц; быстротечность её достижения (за 11,1...12,2 мс), а также обосновать невозможность их эффективного гашения при помощи непосредственного применения существующих средств защиты от перенапряжений.

- в предложенном способе защиты ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений, основанном на перераспределении энергии перенапряжения между конденсатором фильтра ТИСУ и тремя линейными демпфирующими резисторами, отличающимся оптимальным алгоритмом поглощения энергии перенапряжения, базирующемся на учете: значений напряжений на конденсаторе фильтра ТИСУ, при которых в цепь гашения перенапряжений вводятся демпфирующие резисторы и выводятся из неё; величин сопротивлений демпфирующих резисторов; длительности их участия в процессе гашения перенапряжения; емкости конденсатора фильтра ТИСУ; индуктивности тяговой сети и энергии перенапряжения, что позволяет повысить эффективность защиты ТИСУ до требуемых уровней. Оригинальность решения по способу защищена патентом РФ на изобретение.

- в аналитических зависимостях и разработанной на их основе инженерной методики выбора оптимальных параметров предложенного способа, позволяющих без решения существенно нелинейной задачи математического про-

граммирования определять оптимальные значения сопротивлений демпфирующих резисторов и ёмкости конденсатора фильтра ТИСУ, обеспечивающих требуемую минимальную кратность коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона. Инженерная методика основана на использовании программы для ЭВМ, на которую получено свидетельство о государственной регистрации.

- в разработанном устройстве защиты ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта от коммутационных перенапряжений, отличающимся тем, что оно благодаря трем демпфирующим резисторным ветвям с блоками гашения силовых тиристоров, шунтирующему и восстанавливающему узлам, обеспечивает техническую реализацию предложенного способа защиты ТИСУ от коммутационных перенапряжений. Устройство защищено патентом РФ на изобретение.

- в инженерной методике выбора демпфирующих резисторов по энергии, рассеиваемой в них в процессе ограничения коммутационных перенапряжений, позволяющей при технической реализации устройств защиты с тремя демпфирующими резисторными звеньями проводить выбор по мощности числа токопроводящих элементов для демпфирующих резисторов без расчетов в каждом конкретном случае переходных токов и операций интегрирования, что существенно упрощает практическое применение предложенного способа и реализующего его устройства защиты от перенапряжений ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта.

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается: результатами теоретических исследований уровней перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов, выполненных на основании анализа их промышленной эксплуатации и сопоставимостью с экспериментальными данными, представленными другими исследователями; формулировкой задачи исследования, исходя из всестороннего анализа используемых средств защиты от перенапряжений; применением для теоретических исследований апробированных математических методов и методов теории электрических цепей; уровнем допущений, принятых при разработке электрической и математической моделей с учетом их согласованности с физическими представлениями о процессах перенапряжений.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

- в полученных теоретических результатах, позволяющих создавать на основе использования демпфирующих линейных резисторов и конденсатора оптимальные средства защиты от входных коммутационных перенапряжений с глубоким уровнем их ограничения для любого электрооборудования, работающего в протяженных сетях постоянного тока с распределенной индуктивностью;

- в разработанном способе и реализующем его устройстве защиты, позволяющем в наиболее тяжелом режиме, с точки зрения возникновения перенапряжений повышенных уровней, обеспечить снижение их кратности на входе ТИСУ трамвайных вагонов в пределах: с 3,64 до 1,124 единиц – при максимальных энергиях перенапряжения; и с 3,0 до 1,055 единиц – при минимальных энергиях перенапряжения;

- в инженерных методиках выбора оптимальных параметров демпфирующих

резисторов, что существенно упрощает практическую реализацию предложенного устройства защиты ТИСУ от коммутационных перенапряжений.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы, касающиеся исследования коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов, принципиальной схемы устройства защиты от них и инженерных методик выбора оптимальных параметров демпфирующих резисторов, приняты к использованию в Муниципальном унитарном предприятии «Липецкий пассажирский транспорт» с ожидаемым экономическим эффектом до 50...70 тысяч рублей на каждый трамвай, оснащенный ТИСУ, а также используются в учебных дисциплинах «Техника высоких напряжений в устройствах электрической тяги» и «Техника высоких напряжений» на кафедре «Электрооборудования» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Тематика диссертационной работы соответствует первому пункту области исследования специальности 05.09.03 – Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: международная научно-практическая заочная конференция «Энергетика и энергоэффективные технологии» (г. Липецк, 2011 г.); международная конференция с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (г. Тамбов, 2014 г.); XIV международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г. Орёл, 2016 г.); V Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (г. Тамбов, 2018 г.).

Публикация результатов исследования. По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, из них 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 тезисов докладов на международных конференциях, 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, включающего 142 наименования и 10 приложений. Общий объём диссертации составляет 199 страниц, в том числе 129 страниц основного текста, 22 рисунка и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, указаны объект и предмет исследования, сформулированы цель, идея и задачи работы, раскрыты её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, показано соответствие работы тематике научной специальности, представлены научные результаты, выносимые на защиту, а также результаты апробации и реализации работы.

В первой главе проведен анализ возможных видов коммутационных перенапряжений, появляющихся на элементах ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта, который показал, что наиболее опасным из них (с точки зрения максимально возможных кратностей) являются перенапряжения, обусловленные сбросом электромагнитной энергии индуктивности тяговой сети в конденсатор фильтра ТИСУ при отключении аварийных токов короткого замыкания в системе электроснабжения городского электрического транспорта. Рассмотрение условий их возникновения показало, что они могут появляться на входе ТИСУ трамвайного вагона при: отключении внешних коротких замыканий, вызванных кратковременными переключениями в тяговой сети типа «троллей-рельс»; аварийных отключениях других трамвайных вагонов, работающих в той же тяговой сети; подключении пантографа к троллею тяговой сети, находящейся в режиме отключения аварийного короткого замыкания.

Аналитические и экспериментальные исследования с применением ЭВМ данного вида перенапряжений по электрической модели системы «тяговая сеть-ТИСУ-трамвайный вагон», позволяющей адекватно оценивать реальные параметры перенапряжений в наиболее неблагоприятной ситуации (отключение кратковременных переключений типа «троллей-рельс»), позволили получить значения этих параметров в любой точке трамвайной тяговой сети в зависимости от величины отключаемого тока короткого замыкания (рисунок 1).

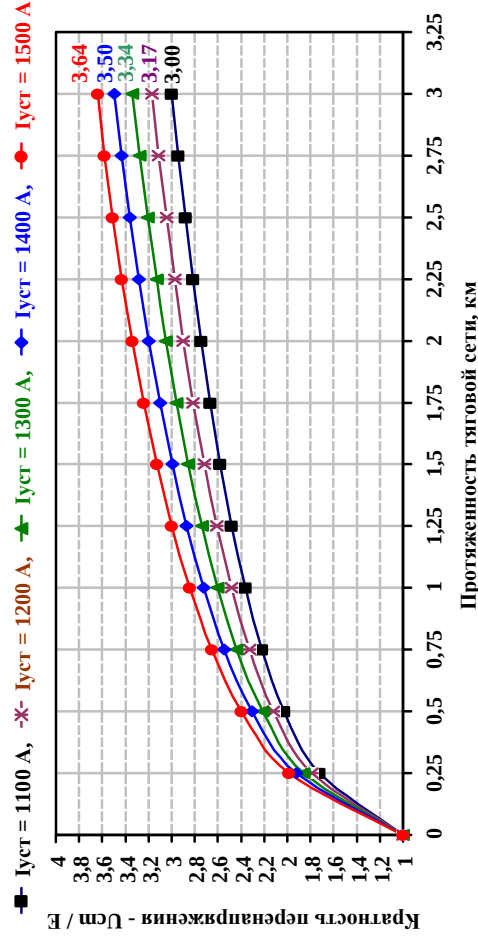
Анализ полученных зависимостей показывает: перенапряжения, появляющиеся на входе ТИСУ трамвайных вагонов при аварийных режимах, обусловленных кратковременными переключениями типа «троллей-рельс», характеризуются высоким уровнем, достигающим по кратности 3,64 единиц; длительность достижения ими максимальных кратностей лежит в пределах от 11,1 мс. до 12,2 мс; энергия, запасаемая в индуктивности тяговой сети, составляет тысячи джоулей и носит распределенный характер; время достижения током короткого замыкания значений токов уставки незначительно – не превышает 3,5 мс, что указывает на высокую вероятность возникновения этого вида перенапряжений при любых кратковременных переключениях типа «троллей-рельс» и возможность их частого появления.

Поэтому необходимы устройства, обеспечивающие их ограничение до безопасного уровня.

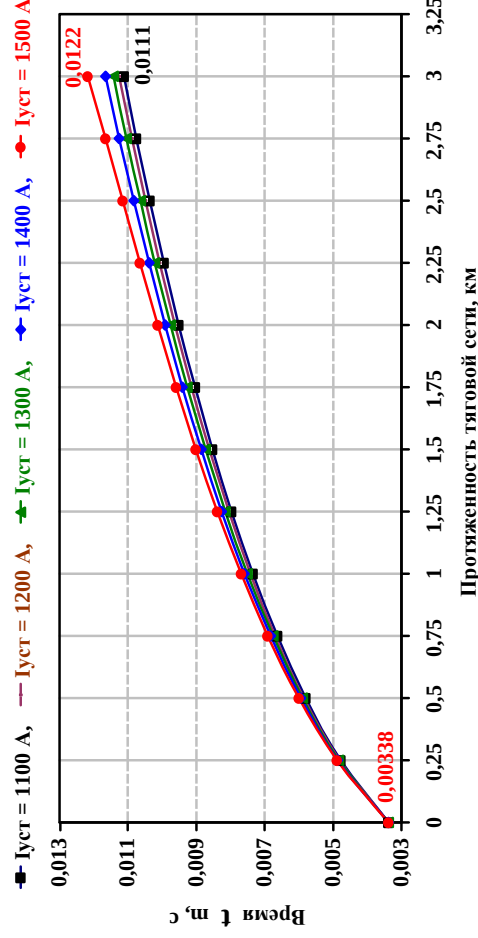
Во второй главе проведен обзор литературных источников, авторских свидетельств и патентов в области защиты электрооборудования от перенапряжений. На основе их анализа установлено, что непосредственное применение существующих средств защиты не сможет, на данном этапе их разработки, обеспечить глубокого (с кратностью ниже двух) ограничения коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона, обусловленных сбросом электромагнитной энергии индуктивности тяговой сети в конденсатор фильтра ТИСУ при отключении аварийных токов короткого замыкания типа «троллей-рельс» в системе электроснабжения городского электрического транспорта.

На основании выполненного анализа сформулированы задачи исследования по обеспечению глубокого ограничения на входе ТИСУ трамвайного вагона указанного вида коммутационных перенапряжений. Для решения поставленных

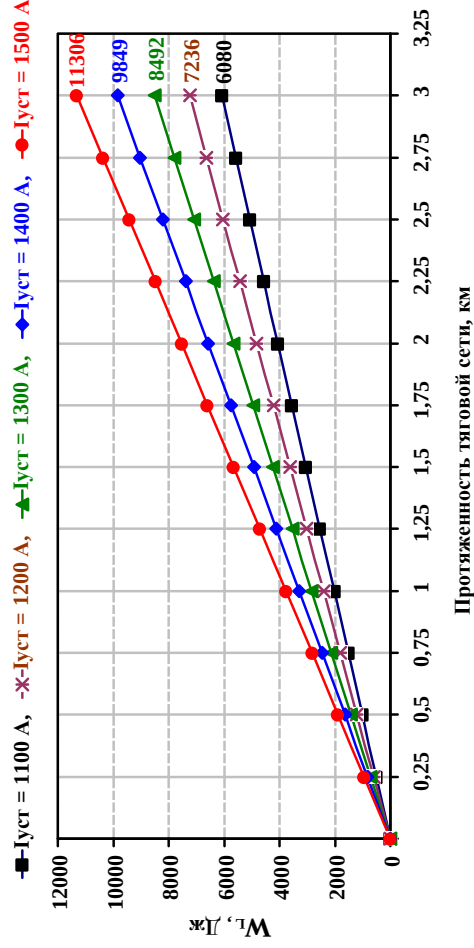
Кратность перенапряжений на входе ТИСУ



Длительность достижения максимальных кратностей перенапряжений



Энергия, поступающая на вход ТИСУ



Времени достижения током короткого замыкания значений токов уставок защиты

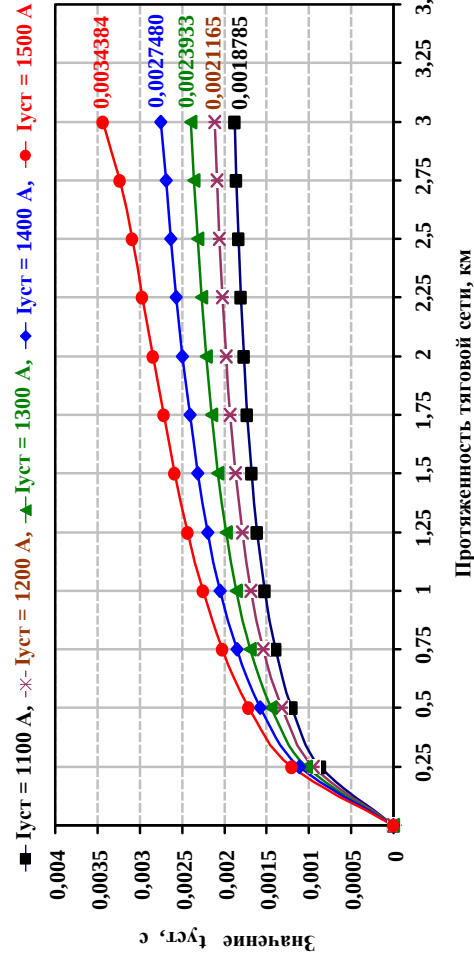


Рисунок – 1 Результаты исследования коммутационных перенапряжений, обусловленных сбросом электромагнитной энергии индуктивности тяговой сети в конденсатор фильтра ТИСУ при аварийных коротких замыканиях типа «троллей-рельс»

задач проведено обоснование разработки способа и реализующего его устройства защиты, основанных на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра ТИСУ и трех линейных резисторов, а также основных допущений, принимаемых при проведении теоретических исследований по оптимизации предлагаемого в диссертации способа защиты на минимум перенапряжений.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой способа с тремя демпфирующими резисторными звеньями, способного обеспечить эффективную защиту ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений при отключении аварийных токов короткого замыкания типа «троллей-рельс» в системе электроснабжения городского электрического транспорта. Способ организован следующим образом.

При появлении (после отключения в тяговой контактной сети короткого замыкания – ключ K размыкается, рисунок 2) на входе ТИСУ трамвайного вагона перенапряжения, к конденсатору фильтра ТИСУ в момент t_1 одновременно подключаются, при помощи тиристорных ключей K_1 , K_2 и K_3 , демпфирующие резисторы R_1 , R_2 и R_3 . Это приводит к ограничению на конденсаторе фильтра максимального выброса напряжения U_{cm} , (который бы имел место без подключения демпфирующих резисторов) до величины U_{cm1} , (рисунок 3). После снижения напряжения $u_c(t)$ до некоторой величины $u_c(t_2)$, в момент t_2 от конденсатора фильтра ТИСУ отключают демпфирующий резистор R_3 , что приводит к повторному забросу напряжения $u_c(t)$ до значения U_{cm2} . На следующем этапе ограничения напряжения в момент t_3 от конденсатора фильтра ТИСУ отключают демпфирующий резистор R_2 , что приводит к третьему забросу напряжения $u_c(t)$ до значения U_{cm3} . И, наконец, в момент t_4 , когда напряжение $u_c(t)$ достигнет, после заброса до U_{cm3} , значения $u_c(t_4)$, происходит отключение демпфирующего резистора R_1 , в силу чего на входе ТИСУ наблюдается четвертый заброс напряжения до величины U_{cm4} . Выводом резистора R_1 процесс ограничения входного перенапряжения заканчивается.

Таким образом, при предлагаемом способе, процесс ограничения коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона (конденсаторе фильтра C_Φ) сводится к замене максимального уровня входного напряжения U_{cm} , который имел бы место на входе ТИСУ без применения способа, четырьмя максимальными забросами напряжений U_{cm1} , U_{cm2} , U_{cm3} и U_{cm4} , обусловленными логикой работы предлагаемого способа.

Экспериментальные исследования с применением ЭВМ показывают, что кратности этих забросов напряжений зависят: от значений напряжений на конденсаторе фильтра ТИСУ – $u_c(t_1)$, $u_c(t_2)$, $u_c(t_3)$ и $u_c(t_4)$, при которых в цепь гашения перенапряжений вводятся демпфирующие резисторы и выводятся из неё, величин сопротивлений демпфирующих резисторов R_1 , R_2 , R_3 , длительности их участия в процессе гашения перенапряжения, емкости конденсатора фильтра ТИСУ, индуктивности тяговой сети и энергии перенапряжения. Причем для каждого конкретного случая существует определенный набор оптимальных значений указанных параметров, обеспечивающих, при заданной энергии перенапряжения, минимум максимальных выбросов напряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона на всем интервале демпфирования входных перенапряже-

ний. Поэтому возникает задача в определении оптимальных значений указанных параметров и установлению аналитических зависимостей, связывающих их, так как без этого невозможно обеспечить эффективность предлагаемого способа.

Подобная задача относится к классу существенно нелинейных задач математического программирования. Целевой функцией является функция напряжения на конденсаторе фильтра $u_c(t)$ ТИСУ, которая в переходном режиме состоит из пяти интервалов:

1) $0 \leq t < t_1$ – интервал времени до введения в цепь гашения демпфирующих резисторов. На этом интервале в процессе гашения перенапряжения участвует только конденсатор фильтра ТИСУ;



Рисунок 2 – Схема к пояснению способа защиты от коммутационных перенапряжений, основанного на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра ТИСУ и трёх линейных резисторов

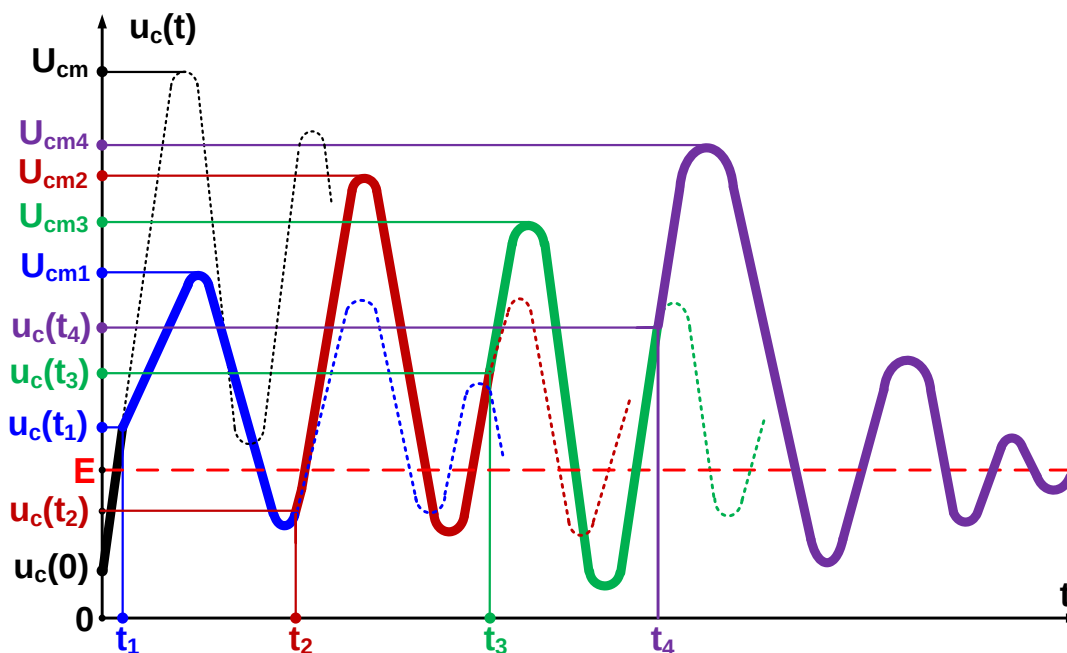


Рисунок 3 – Изменение напряжения на входе ТИСУ трамвайного вагона при способе защиты от коммутационных перенапряжений, основанном на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра ТИСУ и трёх линейных резисторов

2) $t_1 \leq t < t_2$ – интервал времени, в течение которого в процессе ограничения перенапряжения одновременно участвуют конденсатор фильтра ТИСУ и все демпфирующие резисторы;

3) $t_2 \leq t < t_3$ – интервал времени, после отключения демпфирующего резистора R_3 . В процессе ограничения перенапряжения одновременно участвуют конденсатор фильтра ТИСУ и демпфирующие резисторы R_1 и R_2 ;

4) $t_3 \leq t < t_4$ – интервал времени, после отключения демпфирующего резистора R_2 . В процессе ограничения перенапряжения одновременно участвуют конденсатор фильтра ТИСУ и демпфирующий резистор R_1 ;

5) $t \geq t_4$ – интервал времени после отключения резистора R_1 . В процессе ограничения перенапряжения участвует только конденсатор фильтра ТИСУ трамвайного вагона.

Каждому из этих интервалов времени соответствует свое трансцендентное выражение этой функции. Необходимо выбрать длины интервалов (моменты вывода демпфирующих резисторов из процесса гашения перенапряжений) и параметры функции напряжения $u_c(t)$ таким образом, чтобы обеспечился минимум глобальных максимумов напряжений U_{cm1} , U_{cm2} , U_{cm3} , и U_{cm4} на всем интервале демпфирования входных перенапряжений.

Данная задача решалась на основе системного подхода.

Вначале для каждого из участков демпфирования перенапряжений находятся аналитические зависимости для напряжений на конденсаторе фильтра ТИСУ и из них определяются выражения для определения максимальных выбросов напряжений U_{cm1} , U_{cm2} , U_{cm3} , и U_{cm4} на входе ТИСУ трамвайного вагона.

Затем полученные для U_{cm1} , U_{cm2} , U_{cm3} , и U_{cm4} выражения минимизируются известным методом экстремума по значениям напряжения на конденсаторе фильтра $u_c(t_1)$, $u_c(t_2)$, $u_c(t_3)$ и $u_c(t_4)$, при которых происходят подключение и последующее отключение демпфирующих резисторов.

Далее, минимизированные по значениям $u_c(t_1)$, $u_c(t_2)$, $u_c(t_3)$ и $u_c(t_4)$, выражения для определения максимальных выбросов напряжения на входе ТИСУ минимизируются вновь, но уже по величинам сопротивлений демпфирующих резисторов, при условии равенства U_{cm1} , U_{cm2} , U_{cm3} , и U_{cm4} и неизменности индуктивности тяговой сети.

И, наконец, полученные в результате такой двойной минимизации выражения для определения U_{cm1} , U_{cm2} , U_{cm3} , и U_{cm4} исследуются на минимакс в функции от величины индуктивности тяговой сети, так как при движении трамвая индуктивности тяговой сети по отношению к входу ТИСУ, а, следовательно, и электромагнитная энергия, сбрасываемая при аварийных режимах в конденсатор фильтра ТИСУ трамвайного вагона, непрерывно меняются.

Такой подход позволил получить решение указанной выше задачи нелинейного программирования в виде аналитических зависимостей, связывающих между собой оптимальные значения сопротивлений демпфирующих резисторов и емкости конденсатора фильтра ТИСУ, которые в совокупности позволяют в наиболее тяжелом режиме обеспечить снижение кратности перенапряжения на входе ТИСУ трамвайного вагона в 2,84...3,23 раза. Эти зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned}
& - \text{для } \beta_0 < 2, \quad k_{02} \cdot \beta_0 > 2, \quad k_{01} \cdot \beta_0 > 2: \\
& \left\{ \begin{aligned} k_{02} &= 1 + \exp \left[(\beta_0 : \sqrt{4 - \beta_0^2}) \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{4 - \beta_0^2} : \beta_0 \right) \right]; \\ k_{01} &= k_{02} + \left[2 : \left(k_{02} \cdot \beta_0 - \sqrt{k_{02}^2 \cdot \beta_0^2 - 4} \right) \right]^{\frac{k_{02} \cdot \beta_0}{\sqrt{k_{02}^2 \cdot \beta_0^2 - 4}}}; \\ \gamma &= k_{01} \cdot \beta_0 + \beta_0 \left[2 : \left(k_{01} \cdot \beta_0 - \sqrt{k_{01}^2 \cdot \beta_0^2 - 4} \right) \right]^{\frac{k_{01} \cdot \beta_0}{\sqrt{k_{01}^2 \cdot \beta_0^2 - 4}}}. \end{aligned} \right. \quad (1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \text{для } \beta_0 < 2, \quad k_{02} \cdot \beta_0 < 2, \quad k_{01} \cdot \beta_0 > 2: \\
& \left\{ \begin{aligned} k_{02} &= 1 + \exp \left[(\beta_0 : \sqrt{4 - \beta_0^2}) \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{4 - \beta_0^2} : \beta_0 \right) \right]; \\ k_{01} &= k_{02} + \exp \left[\left(k_{02} \cdot \beta_0 : \sqrt{4 - k_{02}^2 \cdot \beta_0^2} \right) \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{4 - k_{02}^2 \cdot \beta_0^2} : (k_{02} \cdot \beta_0) \right) \right]; \\ \gamma &= k_{01} \cdot \beta_0 + \beta_0 \left[2 : \left(k_{01} \cdot \beta_0 - \sqrt{k_{01}^2 \cdot \beta_0^2 - 4} \right) \right]^{\frac{k_{01} \cdot \beta_0}{\sqrt{k_{01}^2 \cdot \beta_0^2 - 4}}}. \end{aligned} \right. \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \text{для } \beta_0 < 2, \quad k_{02} \cdot \beta_0 < 2, \quad k_{01} \cdot \beta_0 < 2: \\
& \left\{ \begin{aligned} k_{02} &= 1 + \exp \left[(\beta_0 : \sqrt{4 - \beta_0^2}) \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{4 - \beta_0^2} : \beta_0 \right) \right]; \\ k_{01} &= k_{02} + \exp \left[\left(k_{02} \cdot \beta_0 : \sqrt{4 - k_{02}^2 \cdot \beta_0^2} \right) \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{4 - k_{02}^2 \cdot \beta_0^2} : (k_{02} \cdot \beta_0) \right) \right]; \\ \gamma &= k_{01} \cdot \beta_0 + \beta_0 \cdot \exp \left[\left(k_{01} \cdot \beta_0 : \sqrt{4 - k_{01}^2 \cdot \beta_0^2} \right) \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{4 - k_{01}^2 \cdot \beta_0^2} : (k_{01} \cdot \beta_0) \right) \right]. \end{aligned} \right. \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\text{где } \beta_0 = \frac{1}{R_{01}} \sqrt{\frac{L_{\text{э}} + L_{\text{ф}}}{C_{0\text{ф}}}}, \quad (4)$$

$$k_{02} = \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}}, \quad (5)$$

$$k_{01} = \frac{R_{01}}{R_{03}} + k_{02}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{i_L(t_1)}{E} \sqrt{\frac{L_{\text{э}} + L_{\text{ф}}}{C_{0\text{ф}}}}, \quad (7)$$

R_{01} , R_{02} , R_{03} и $C_{0\text{ф}}$ – оптимальные значения сопротивлений демпфирующих резисторов и ёмкости конденсатора фильтра ТИСУ трамвайного вагона, обеспечивающие справедливость выражений (1)-(4).

При этом, в силу равенства между собой напряжений $U_{\text{см1}}$, $U_{\text{см2}}$, $U_{\text{см3}}$ и $U_{\text{см4}}$, максимальная кратность перенапряжения на входе ТИСУ трамвайного вагона при предложенном способе ограничения коммутационных перенапряжений определяется, с учетом коэффициента затухания k_3 , вносимого эквивалентным активным сопротивлением трамвайной тяговой сети, из выражения:

$$(U_{\text{см0}} : E) = k_3(1 + \beta_0). \quad (8)$$

Полученные зависимости позволяют при практическом использовании предложенного способа ограничения коммутационных перенапряжений определять: либо оптимальные значения ёмкости конденсатора фильтра $C_{0ф}$ ТИСУ и сопротивлений демпфирующих резисторов R_{01} , R_{02} и R_{03} , обеспечивающих требуемый уровень гашения перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона; либо при заданном значении емкости конденсатора фильтра ТИСУ, соответствующие значения минимально возможной кратности перенапряжения и сопротивлений демпфирующих резисторов, обеспечивающих эту кратность перенапряжения. Блок-схема решения указанных задач приведена на рисунке 4.

Однако, при использовании полученных аналитических выражений (1)-(8) возникает необходимость в решении нелинейных трансцендентных уравнений, что существенно затрудняет их использование. Особенно это касается задач второго типа, так как возникает необходимость в решении нелинейных систем уравнений (1)-(3) с целью определения коэффициентов β_0 , k_{02} и k_{01} по значению γ . Учитывая, что аналитического решения указанных систем по определению коэффициентов β_0 , k_{02} и k_{01} по значению γ получить не возможно, то это обстоятельство фактически делает для производителей невозможным использование выражений (1)-(8) при решении данной задачи.

Поэтому для обеспечения практического использования выражений (1)-(8), а, следовательно, и возможности применения предложенного способа защиты от коммутационных перенапряжений, была разработана инженерная методика, основанная на использовании программы для ЭВМ, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программ.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с технической реализацией предложенного способа. Принципиальная схема устройства, разработанная с учетом требований, которые необходимо учитывать при технической реализации средств защиты от перенапряжений, приведена на рисунке 5. Она состоит из трех однотипных демпфирующих ветвей, включающих в себя демпфирующие резисторы R_{10} , R_{17} , R_{23} , включенные соответственно в цепи силовых тиристоров V_{14} , V_{24} , V_{34} . Силовые тиристоры снабжены схемами гашения, обеспечивающими их отключение.

К демпфирующим резисторам подключены элементы времени, обеспечивающие требуемую задержку времени на отключение силовых тиристоров.

Схема также включает в себя шунтирующий узел, выполненный на резисторе R_7 и тиристоре V_9 со схемой гашения. Данный узел исключает повторное введение в цепь гашения демпфирующих резисторов при перенапряжениях, обусловленных логикой работы схемы.

Для восстановления схемы в исходное состояние в ней предусмотрен восстанавливающий узел, выполненный на тиристоре V_1 со схемой гашения, тиристоре V_2 и трансформаторе Tr_1 .

Такая схемная реализация устройства защиты позволяет организовать логику его работы таким образом, чтобы оно в полной мере реализовало, при условии, что сопротивления демпфирующих резисторов будут соответствовать оптимальным значениям, предложенный способ ограничения перенапряжений

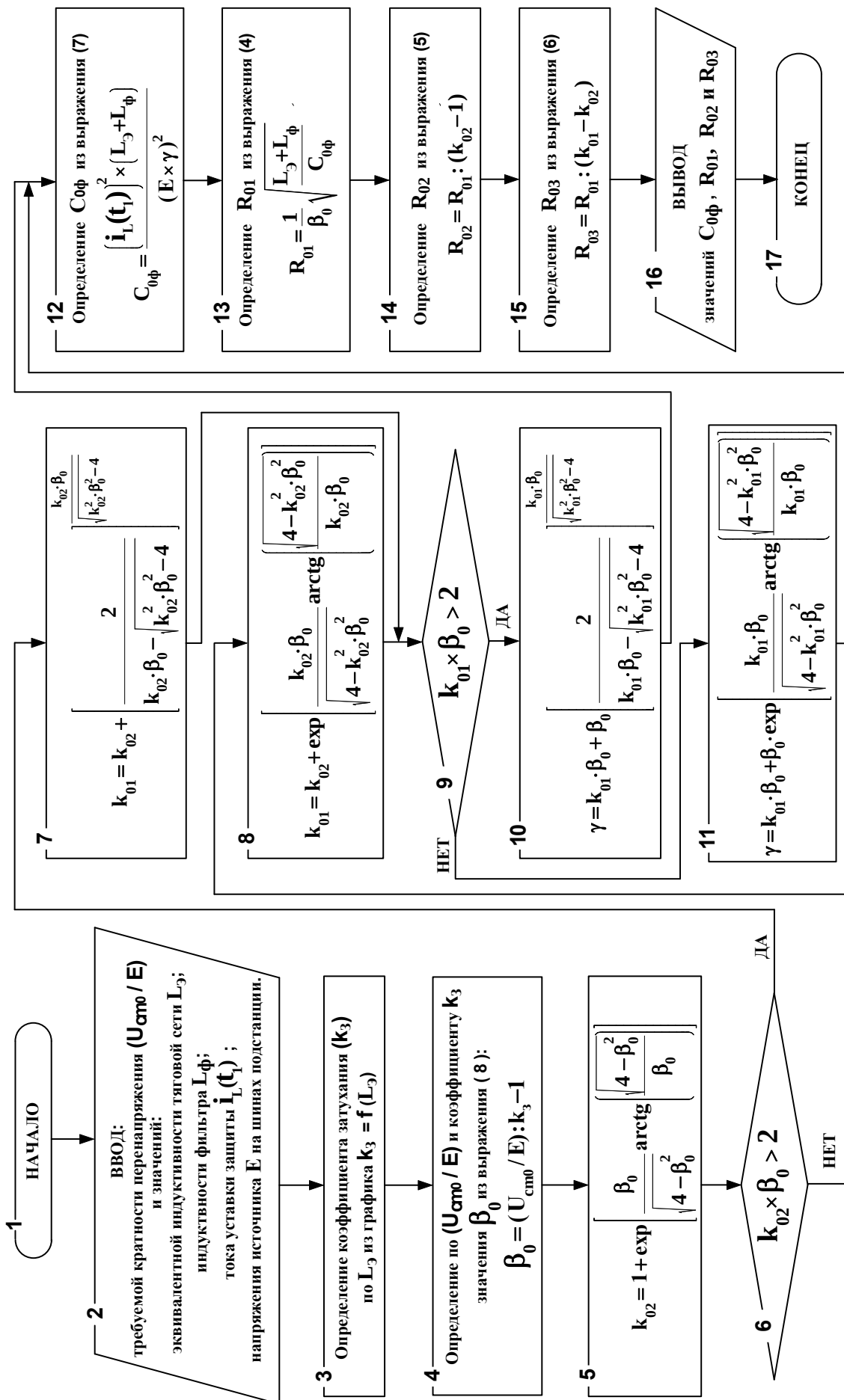


Рисунок 4 – Блок-схема программы определения оптимальных значений ёмкости конденсатора фильтра $C_{0ф}$ ТИСУ и сопротивлений демпфирующих резисторов R_{01} , R_{02} и R_{03} , обеспечивающих требуемый уровень гашения перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона

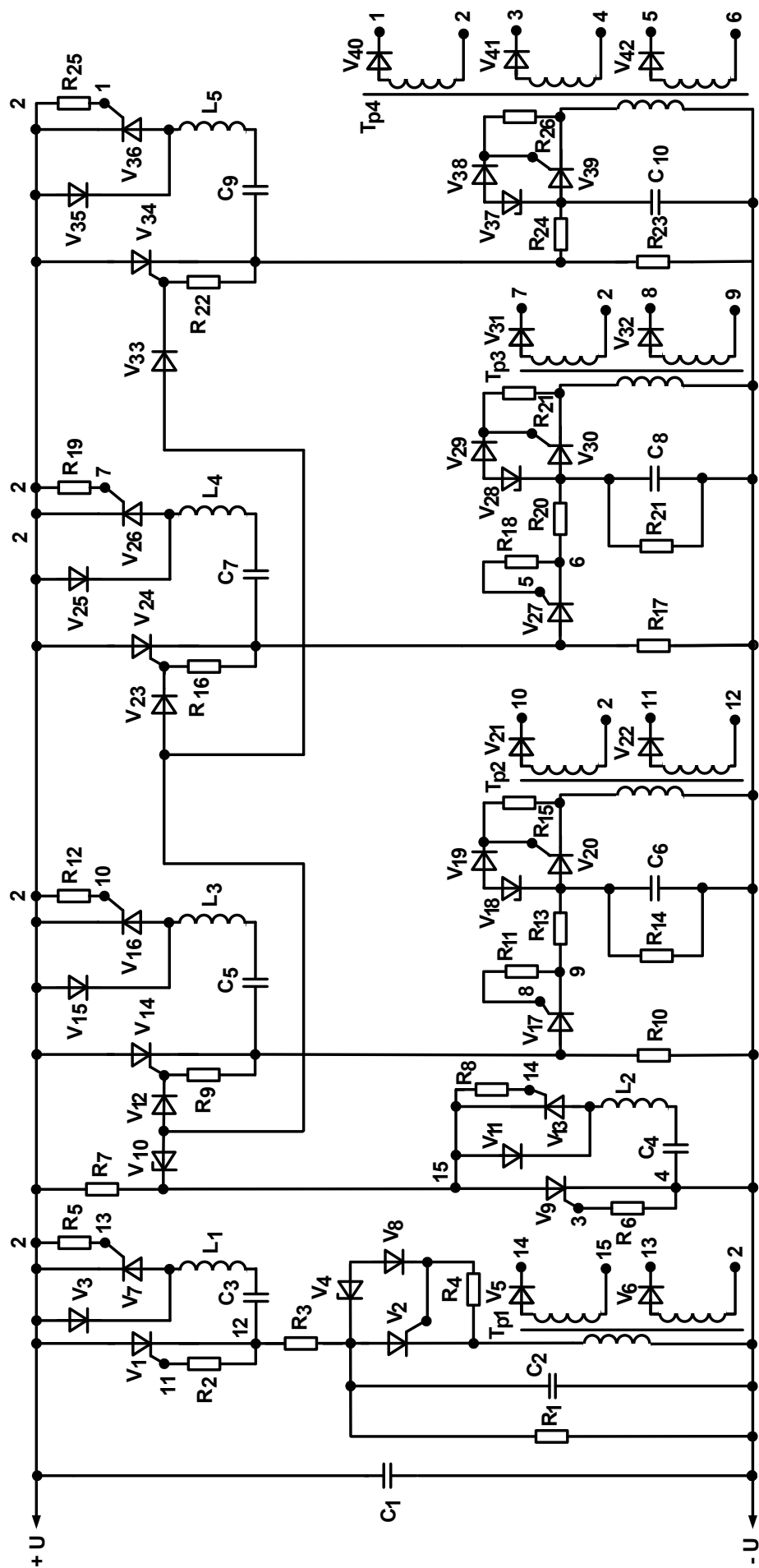


Рисунок 5 – Принципиальная схема устройства защиты ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта от коммутационных перенапряжений с тремя демпфирующими звеньями

на входе ТИСУ трамвайного вагона с кратностью ниже двух единиц в любой точке тяговой сети.

При этом, с целью облегчения технической реализации предложенного устройства защиты ТИСУ, была разработана инженерная методика выбора по мощности числа токопроводящих элементов для демпфирующих резисторов. Методика основана на полученных в работе аналитических зависимостях, позволяющих определять энергии, рассеиваемые в демпфирующих резисторах в процессе ограничения коммутационных перенапряжений, без расчетов в каждом конкретном случае переходных токов и операций интегрирования. Основные этапы определения этой энергии представлены рисунке 6.

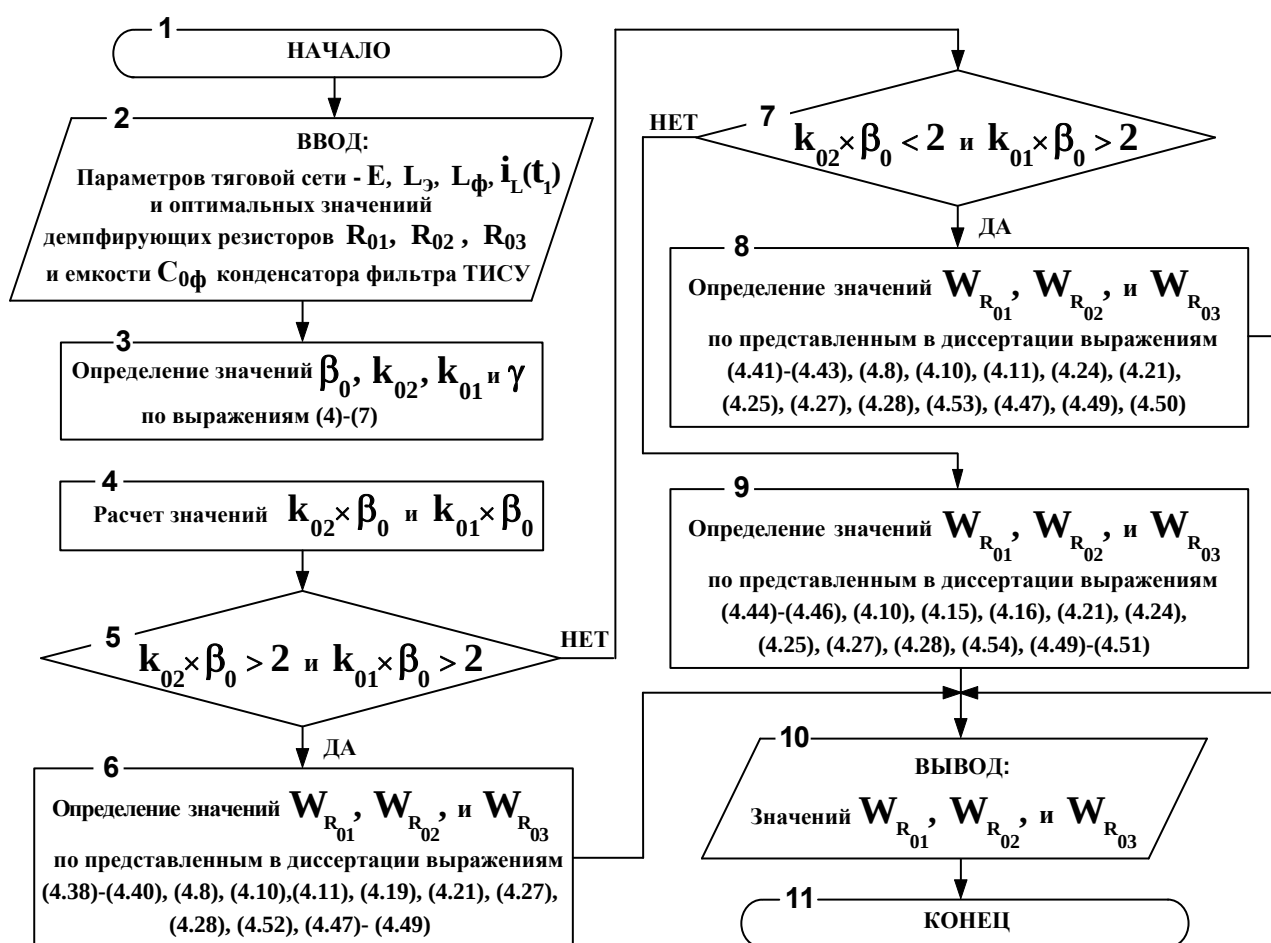


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма определения энергий, рассеиваемых в демпфирующих резисторах в процессе ограничения коммутационных перенапряжений при помощи способа с тремя демпфирующими звеньями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных исследований предложены оригинальные теоретические и практические решения, в совокупности представляющие собой научное достижение в области разработки средств защиты от перенапряжений

ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений, что имеет существенное значение для городского электрического транспорта. При этом поставлена и решена задача по эффективной защите ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений, обусловленных сбросом электромагнитной энергии индуктивности тяговой сети в конденсатор входного фильтра ТИСУ при отключении аварийных токов короткого замыкания типа «троллей-рельс» в системе электроснабжения городского электрического транспорта.

Основные результаты диссертации и выводов сводятся к следующему:

1. Проведены исследования коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов, обусловленных отключением аварийных токов короткого замыкания в системе электроснабжения городского электрического транспорта, позволившие установить: высокую вероятность их возникновения при любых кратковременных переключениях типа «троллей-рельс»; высокий уровень их кратности, достигающий до 3,64 единиц, и быстротечность её достижения (находится в пределах 11,1...12,2 мс), а также обосновать невозможность их эффективного гашения при помощи непосредственного применения существующих средств защиты от перенапряжений.

2. Предложен и обоснован способ глубокого ограничения коммутационных перенапряжений, основанный на использовании демпфирующих свойств конденсатора фильтра ТИСУ и трёх линейных резисторов, вводимых на короткое время в цепь гашения перенапряжений, позволяющий в наиболее тяжелом режиме, с точки зрения возникновения перенапряжений повышенных уровней, обеспечивать снижение их кратности на входе ТИСУ трамвайных вагонов в пределах: с 3,64 до 1,124 единиц – при максимальных энергиях перенапряжения; и с 3,0 до 1,055 единиц – при минимальных энергиях перенапряжения (при условии, что емкость конденсатора фильтра ТИСУ трамвайного вагона находится в пределах 4800...5000 мкФ). Оригинальность решения по способу защищена патентом РФ на изобретение за № 2625168.

3. Проведены исследования по оптимизации предложенного способа, позволившие получить аналитические зависимости и на их основе разработать инженерную методику, основанную на использовании программы для ЭВМ, позволяющей без решения существенно нелинейной задачи математического программирования определять оптимальные значения демпфирующих резисторов и ёмкость конденсатора фильтра ТИСУ, обеспечивающих требуемую минимальную кратность коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона. На программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ за № 2017617705.

4. Определены требования, которые необходимо учитывать при технической реализации средств защиты от перенапряжений, и на их основе разработана принципиальная схема устройства, реализующего способ защиты ТИСУ трамвайных вагонов от коммутационных перенапряжений с тремя демпфирующими резисторными звеньями. Устройство защищено патентом РФ на изобретение за № 2625168.

5. Разработана инженерная методика выбора демпфирующих резисторов по энергии, рассеиваемой в них в процессе ограничения коммутационных перенапря-

жений, позволяющая при технической реализации устройства защиты с тремя демпфирующими резисторными звеньями проводить выбор по мощности числа токопроводящих элементов для демпфирующих резисторов без расчетов в каждом конкретном случае переходных токов и операций интегрирования, что существенно упрощает практическое применение предложенного способа и реализующего его устройства защиты от перенапряжений ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Shpiganovich, A.N., Boychevskiy A.V. Research of switching overvoltages at filter's capacitor of SCR's controls of tramcars by emergency operation of urban electrical transport's traction systems. // Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja. 2014. №2. P. 9-13.

2. Shpiganovich, A.N., Boychevskiy A.V. Assessment of the impact resistance of traction network on the level of switching surges at inlet thyristor-pulse systems of tramcars of urban electric transport control // Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja. 2015. №1. P. 3-6.

3. Шпиганович А.Н., Бойчевский А.В. Схемная реализация демпфирующего резисторного узла ограничения коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона городского электрического транспорта // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. №2. С. 8-10.

4. Шпиганович А.Н., Бойчевский А.В. Выбор демпфирующих резисторов по энергии для устройства ограничения коммутационных перенапряжений с тремя демпфирующими резисторами // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2018. № 1. С. 3-11.

Публикации в других научных изданиях

5. Анализ коммутационных перенапряжений в тяговых сетях электрифицированного транспорта Липецка / А.Н. Шпиганович, А.В. Бойчевский // Сборник докладов V международной научно-практической заочной конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии», г. Липецк, 15-16 декабря 2011. Изд-во ЛГТУ, 2012. С. 52-54.

6. Исследование коммутационных перенапряжений на конденсаторах фильтра тиристорно-импульсных систем управления трамвайными вагонами / А.Н. Шпиганович, А.В. Бойчевский // Тез. докл. на международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», г. Тамбов, 23-25 апреля 2014. Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2014. С. 159-161.

7. Защита тиристорно-импульсных систем управления городского электрического транспорта от коммутационных перенапряжений / А.Н. Шпиганович, А.В. Бойчевский // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век», г. Орёл, 15 марта – 30 июня 2016. Изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, 2016. С. 25-26.

8. Ограничение коммутационных перенапряжений на входе ТИСУ трамвайных вагонов при отключении аварийных токов короткого замыкания в системе электроснабжения городского электрического транспорта / А.Н. Шпиганович, А.В. Бойчевский // Материалы V международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах», г. Тамбов, 4-6 июня 2018. Изд-во Першина Р.В., 2018. С. 308-310.

Патент и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

9. Патент RU 2625168 С1, МПК Н02Н 9/04. Способ и реализующее его устройство защиты от коммутационных перенапряжений тиристорно-импульсных систем управления трамвайными вагонами городского электрического транспорта / Бойчевский А.В., Шпиганович А.Н. (RU); патентообладатель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (RU) – 2016134565; заяв. 23.08.2016; опубл. 12.07.2017, Бюл. №20.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617705. Определение оптимальных значений ёмкости конденсатора фильтра ТИСУ и сопротивлений демпфирующих резисторов, обеспечивающих требуемый уровень гашения перенапряжений на входе ТИСУ трамвайного вагона / Бойчевский А.В. (RU); патентообладатель Бойчевский А.В. (RU); – 2017614704; заяв. 19.05.2017; опубл. 11.07.2017, Реестр программ для ЭВМ.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1, 5, 6] – провел анализ возможных видов коммутационных перенапряжений, воздействующих на элементы ТИСУ трамвайных вагонов городского электрического транспорта, на основе которого выявил, исследовал и обосновал, что наиболее опасным из них является перенапряжение, обусловленное электромагнитной энергией индуктивности тяговой сети, сбрасываемой в конденсатор фильтра ТИСУ при отключении аварийных токов короткого замыкания типа «троллей-рельс»; [2] – на основании исследования установил зависимость коэффициента затухания, вносимого эквивалентным активным сопротивлением трамвайной тяговой сети на уровень коммутационных перенапряжений, от эквивалентной индуктивности тяговой сети; [3] – предложил схемную реализацию демпфирующего резисторного звена; [7, 8, 9] – провел оптимизацию способа с тремя демпфирующими резисторными звеньями, вывел аналитические зависимости, связывающие между собой оптимальные значения сопротивлений демпфирующих резисторов, емкости конденсатора фильтра ТИСУ и кратность перенапряжения, совместно с соавтором разработал схему защиты ТИСУ от перенапряжений с тремя демпфирующими звеньями; [4] – разработал инженерную методику выбора демпфирующих резисторов по энергии, рассеиваемой в них в процессе ограничения коммутационных перенапряжений.

Подписано в печать 30.09.2019. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Печ. л. 1,0. Тираж 125 экз. Заказ № 637.
Издательство Липецкого государственного технического университета.
Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ.
398055 Липецк, ул. Московская, 30.