

На правах рукописи

Соловьев Сергей Викторович



**ПОВЫШЕНИЕ ПЕРЕДАВАЕМОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Егоров Андрей Валентинович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра теоретической электротехники электрификации нефтяной и газовой промышленности, заведующий кафедрой.

Герасимов Сергей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», кафедра диспетчерского управления энергосистемами, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 25 декабря 2017 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 октября 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В связи с ежегодным увеличением темпов роста нагрузки промышленных предприятий, а в частности добывающего и обрабатывающего сегмента топливно-энергетического комплекса, требуется увеличение передаваемой активной мощности. Распределительные сети, питающие предприятия, в основном работают на среднем уровне напряжения, что обуславливается мощностью потребителей на подобных объектах.

С увеличением мощности потребителя, требуется увеличение передаваемой активной мощности распределительных сетей предприятий. Существует большое количество методов, позволяющих обеспечить увеличение передаваемой активной мощности. Однако при условии, что провода линии еще не выработали срок службы, их замена не требуется. Кроме того, замена проводников связана со значительным вложением денежных средств, при значительном удалении конечного потребителя от распределительной подстанции предприятия, со сложностью замены на многих добывающих комплексах, а также с простым предприятием, что влечет за собой значительные убытки. В этом случае, следует обеспечить увеличение передаваемой активной мощности без замены проводов.

Проблемы повышения передаваемой активной мощности актуальны и рассматриваются в сетях высокого уровня напряжения, с присущими только этому уровню напряжения особенностями. Однако, в этом случае слабо обозначается связь между линией передачи и конкретным предприятием.

Проработанность

Известны способы увеличения передаваемой активной мощности в электротехнических комплексах предприятий, к которым относятся устройства продольной и поперечной компенсации реактивной мощности и использование вольто-добавочных трансформаторов в разных видах. Решением этой проблемы, занимались такие ученые как: J. Arrilaga, Ю.Б. Прибытков, А.А. Глазунов, С.В. Смоловик, E.W. Kimbark и другие. Однако, указанными авторами не даны сравнительные характеристики различных способов, позволяющие выбрать из них наиболее эффективный. До сих пор в распределительной сети предприятия на среднем уровне напряжения не

рассматривалась возможность перевода питания нагрузки с переменного на постоянный ток и не определена эффективность такого перевода.

Увеличение передаваемой активной мощности путем перевода трехпроводной линии электропередач рассматривалось лишь для сетей высокого и сверхвысокого напряжений. Идея перевода линий электропередач среднего уровня напряжения на постоянный ток была рассмотрена только в одной работе (G. Bathurst), при этом данная концепция не рассматривается для распределительных сетей промышленных предприятий.

С учетом вышесказанного, выявление и отчасти разработка наиболее эффективного способа по увеличению передаваемой активной мощности распределительных сетей среднего напряжения электротехнического комплекса предприятия является актуальной задачей и имеет практическое значение.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки): п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; п.2. Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Цель работы

Повышение передаваемой активной мощности в распределительной сети переменного тока среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятий путем обоснованного выбора наиболее эффективного технического решения.

Основные задачи исследования

1. Анализ существующих способов повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей переменного тока.

2. Определение зависимостей передаваемой переменным и постоянным током активной мощности от параметров распределительной сети предприятия и его нагрузки.

3. Разработка критериев, обеспечивающих обоснованный выбор способа повышения передаваемой активной мощности в распределительной сети.

4. Выявление наиболее эффективных по разработанному критерию способов перевода линии электропередачи на постоянный ток.

5. Оценка эффективности применения предлагаемых способов повышения передаваемой активной мощности в эксплуатируемых распределительных сетях промышленных предприятий.

Идея работы

Повышение передаваемой активной мощности в распределительных сетях среднего напряжения промышленного предприятия должно осуществляться с использованием компенсирующих устройств или перевода линии переменного на постоянный ток с учетом разработанного критерия запаса по активной мощности.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм выбора способа повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей среднего уровня напряжения на основе аналитических выражений, учитывающих ограничения по допустимому напряжению и току с учетом статических характеристик нагрузки.

2. Разработан критерий выбора способа увеличения передаваемой активной мощности распределительных сетей в виде коэффициента запаса по мощности, позволяющий выбрать наиболее эффективный способ увеличения передаваемой мощности в электротехнических комплексах предприятий.

3. Получены зависимости передаваемой активной мощности трехпроводной линии от ее параметров при использовании компенсирующих устройств либо изменении рода тока.

4. Обоснован способ передачи электроэнергии, при переходе на постоянный ток с последующим циклическим переключением проводов, позволяющий увеличить предел по допустимому действующему значению тока в распределительной сети.

Достоверность выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждается применением апробированных методов математического и имитационного моделирования и достаточной сходимостью результатов математического и имитационного моделирования схем электроснабжения среднего уровня напряжения.

Практическая значимость работы

Заключается в том, что зависимости и разработанный критерий максимума передаваемой активной мощности, полученный в ходе исследования, позволяют осуществлять выбор способа увеличения передаваемой активной мощности. Разработанный метод передачи электроэнергии путем переключения проводов трехпроводной линии в распределительных сетях постоянного тока позволяет существенно увеличить передаваемую активную мощность за счет возможности увеличения протекающего тока и напряжения.

Разработана имитационная модель, позволяющая оценить передаваемую в нагрузку активную мощность линии в радиальной распределительной сети, с учетом статических характеристик нагрузки сетей. Разработана имитационная модель, позволяющая оценить активную мощность, передаваемую в линии постоянного тока с переключением проводов по принципу «один прямой, два обратных».

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей и электроснабжения, математического моделирования электрических цепей с использованием пакета *MATLAB*, интерполяции и аппроксимации данных.

Реализация выводов и рекомендаций работы

Применение критерия при выборе способа повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей среднего уровня напряжения без замены проводов, а также разработанного способа передачи электроэнергии путем переключения проводов в трехпроводной линии постоянного тока рекомендуется к внедрению ОАО «Северсталь».

Личный вклад автора

1. Разработана математическая и имитационная модель распределительной сети, позволяющая оценить изменение

передаваемой активной мощности распределительной сети при изменении ее параметров.

2. Проведены аналитические исследования, на основе которых были разработаны критерий и метод выбора параметров технических устройств, требуемых для увеличения передаваемой активной мощности распределительной сети.

3. Проведены аналитические исследования, в ходе которых определены наиболее эффективные по критерию повышения передаваемой активной мощности способы перевода трехпроводной линии распределительной сети переменного тока на постоянный ток.

4. Разработана математическая и имитационная модели, оценивающие увеличение передаваемой активной мощности распределительной сети при изменении рода тока.

5. Разработан метод выбора емкости сглаживающего конденсатора в трехпроводной системе электропередачи постоянного тока.

6. Установлен оптимальный период переключения проводов, при передаче электроэнергии постоянным по трем проводам способом «один прямой, два обратных» в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов по току.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Выбор способа повышения пропускной способности и передаваемой активной мощности распределительной сети среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятия в случае применения компенсаторов потерь напряжения следует осуществлять исходя из разработанного алгоритма, в основу которого положены аналитические выражения, учитывающие ограничения по допустимому напряжению и току с учетом статической характеристики нагрузки, что позволит наиболее эффективно использовать существующую систему передачи электроэнергии без увеличения сечения проводов.

2. При переводе трехпроводной линии электропередач среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятия с переменного на постоянный ток следует выбирать способ передачи электроэнергии, использующий землю в качестве проводника, при невозможности использования земли в электропередаче, следует выбирать способ с попеременным переключением проводов, период переключения которых зависит от допустимого тока проводов и

индуктивности линии электропередачи, что позволяет увеличить пропускную способность линии электропередачи не менее, чем на 11 %.

Апробация

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на: II-ом международном научно-техническом семинаре «Современные разработки в области электроснабжения и электропривода», г. Санкт-Петербург, 26 апреля 2016 г.; Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, 27-29 октября 2016 г.; Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017», г. Санкт-Петербург, 23-24 марта 2017.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 99 наименований, изложена на 144 страницах машинописного текста и содержит 54 рисунка, 2 таблицы, 1 приложение.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Выбор способа повышения пропускной способности и передаваемой активной мощности распределительной сети среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятия в случае применения компенсаторов потерь напряжения следует осуществлять исходя из разработанного алгоритма, в основу которого положены аналитические выражения, учитывающие ограничения по допустимому напряжению и току с учетом статической характеристики нагрузки, что позволит наиболее эффективно использовать существующую систему передачи электроэнергии без увеличения сечения проводов.

В качестве объекта исследования в работе принята система среднего уровня напряжения электроснабжения предприятия, включающая в себя радиальные линии при синусоидальных напряжении и токе.

На основе аналитических исследований и при условии (ГОСТ 29322-2014), что напряжения в узлах нагрузки ограничено в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения U_n , получены выражения для передаваемой активной мощности и пропускной способности линии (что соответствует максимуму передаваемой активной мощности). Выражения представляют собой зависимости от параметров линии и нагрузки при условии применения как продольных, так и поперечных компенсаторов потерь напряжения:

- для передаваемой мощности

$$P_n = \frac{0,18U_n^2}{R_{\text{л}} \cdot (1 + tg\varphi_n tg\varphi_{\text{л}})}, \quad (1)$$

где U_n – номинальное напряжение линии, В; $R_{\text{л}}$ – активное сопротивление линии, Ом; $tg\varphi_n$ – отношение реактивного сопротивления нагрузки к активному; $tg\varphi_{\text{л}}$ – отношение реактивного сопротивления линии к активному.

- для пропускной способности

$$P_n = \frac{0,18U_n^2}{R_{\text{л}}}. \quad (2)$$

На рисунке 1 показаны зависимости передаваемой активной мощности от $\operatorname{tg}\varphi_n$ и $\operatorname{tg}\varphi_d$ в реальном диапазоне их изменения.

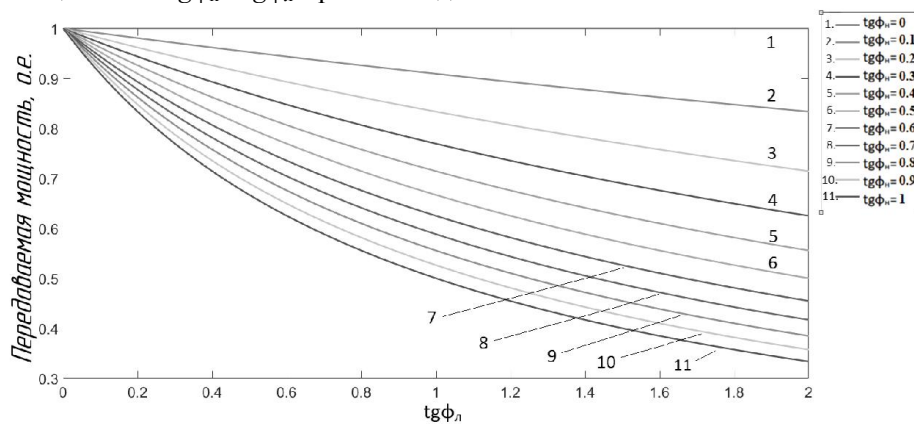


Рисунок 1 – Зависимость пропускной способности линии от тангенса угла линии и тангенса угла нагрузки

Установлено, что величина пропускной способности линии может превышать минимально-возможную величину передаваемой мощности в три раза. Утверждение справедливо только в случае неучета статической характеристики нагрузки.

На основе разработанной компьютерной модели был проведен анализ учета статической характеристики нагрузки. Выявлено, что ее неучет может привести к значительной ошибке при определении величины передаваемой активной мощности и превышать 10 %.

Структурная схема компьютерной модели, реализованной в среде *MATLAB Simulink*, представлена на рисунке 2.

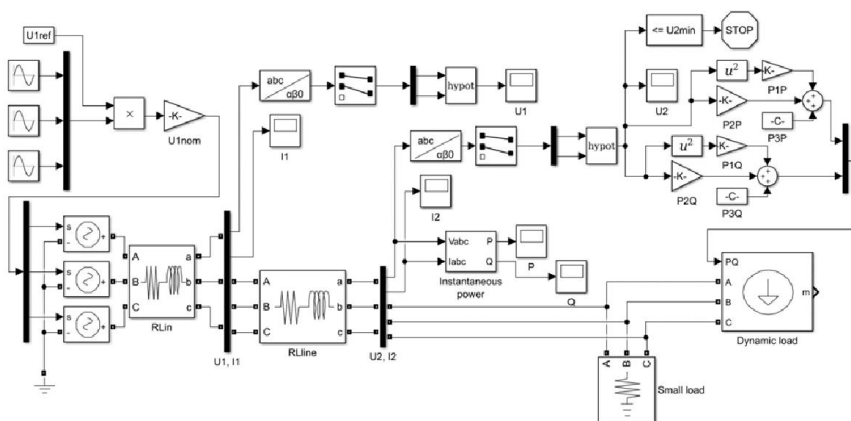


Рисунок 2 – Структурная схема компьютерной модели нагрузки, подключенной к сети, с учётом её внутреннего импеданса, а также статических характеристик нагрузки

Получено аналитическое выражение зависимости пропускной способности и передаваемой активной мощности от параметров распределительной линии, исходя из второго ограничения по допустимому току в линии электропередачи, в случае использования существующей линии без изменения параметров провода;

- для передаваемой мощности:

$$P_H = \frac{1,56U_H I_{max}}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi_H}}, \quad (3)$$

где I_{max} – допустимый ток линии, А;

- для пропускной способности:

$$P_H = 1,56U_H I_{max}. \quad (4)$$

Полученные результаты аналитического исследования и исследования на компьютерной модели позволили сформировать алгоритм определения пропускной способности и передаваемой активной мощности в сети среднего напряжения при использовании компенсирующих устройств и с учетом или без учета статических характеристик. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.

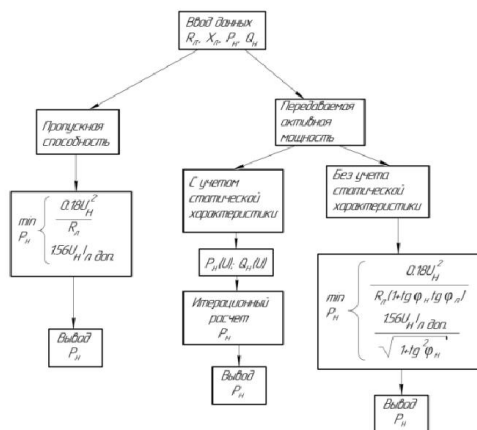


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма определения пропускной способности и передаваемой активной мощности.

В основу алгоритма положены аналитические зависимости, полученные в работе. Алгоритм подразумевает использование разработанной компьютерной модели.

2. При переводе трехпроводной линии электропередач среднего уровня напряжения с переменного на постоянный ток следует выбирать способ передачи электроэнергии использующий землю в качестве проводника, при невозможности использования земли в электропередаче следует выбирать способ с попеременным переключением проводов, период которого зависит от активного сопротивления проводов и емкости сглаживающего конденсатора, что позволяет увеличить пропускную способность линии электропередачи не менее, чем на 11 %.

Для определения способов передачи электроэнергии постоянным током по трехпроводной линии, максимально повышающих коэффициент запаса по мощности, были рассмотрены способы передачи электроэнергии: по двум проводам, по двум проводам с периодическим их переключением, по трем проводам по схеме «один прямой, два обратных» с переключением проводов и без переключения проводов и по трем проводам с возвратом тока по земле.

Для сравнения представленных способов были построены зависимости коэффициента запаса по мощности каждого из методов от параметров нагрузки. Коэффициент запаса по мощности (K_{3M}) показывает во сколько раз можно увеличить передаваемую активную мощность при переводе линии на постоянный ток. Было установлено, что наибольший K_{3M} достигается при смене рода тока способом, предполагающим возврат тока по земле. Вторым по эффективности оказывается способ передачи по схеме «один прямой, два обратных» с переключением проводов.

С учетом фактора снижения K_{3M} на постоянном токе такой способ обеспечивает повышение пропускной способности линии электропередачи в 2,34 раза, так как увеличивается коэффициент запаса по току (K_{d3T}):

$$K_{d3T} = \frac{I_{max}}{I_{dвз}} = 3 \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos\varphi_n} \approx \frac{K_{3T}}{0,427 \cdot \cos\varphi_n}, \quad (5)$$

и коэффициент запаса по напряжению (K_{d3H}):

$$K_{d3H} = \frac{5,47}{K_{эл}} \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}\varphi_n^2}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos\varphi_n^2 + 0,4 - 0,9 \cos\varphi_n}} \cdot K_{3H}. \quad (6)$$

Зависимость K_{3M} линии электропередачи с использованием земли для возврата тока приведена на рисунке 4. Видно, что от изменения реактивного сопротивления линии коэффициент запаса по мощности в рассматриваемых пределах не зависит, ограничение на передаваемую мощность накладывается только током линии.

На рисунке 5 представлена зависимость увеличения коэффициента запаса по мощности от параметров линии и нагрузки при использовании способа передачи электроэнергии «один прямой, два обратных» с переключением проводов.

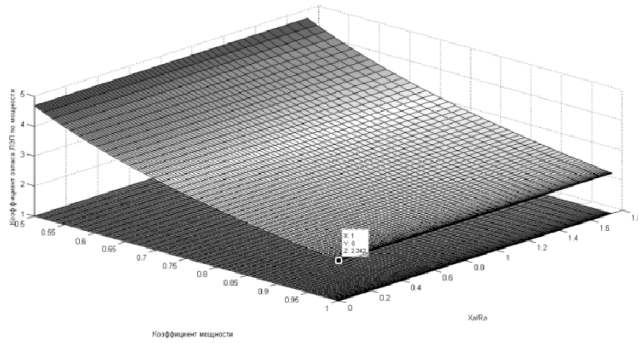


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента запаса по мощности с возвратом по земле от параметров линии и нагрузки

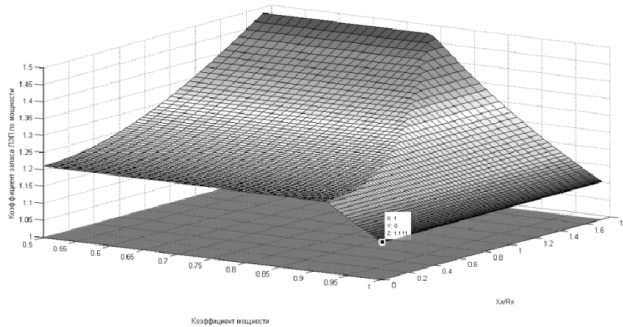


Рисунок 5 – Зависимость увеличения коэффициента запаса по мощности от параметров линии и нагрузки

Ток может быть увеличен за счет повторно-кратковременной перегрузки проводов линии, при этом температура провода находится в динамическом равновесии. Поэтому K_{d3T} определяется как:

$$K_{d3T} = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} = \frac{\sqrt{12} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} \approx \frac{K_{3T}}{0,9 \cdot \cos \varphi_n}, \quad (7)$$

а K_{d3N} определяется как:

$$K_{d3N} = 1,21 \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos^2 \varphi_n + 0,4 - 0,9 \cos \varphi_n}} \cdot K_{3N}. \quad (8)$$

Зависимость K_{3M} при переводе ЛЭП на постоянный ток способом «один прямой, два обратных» с переключением проводов от ее параметров и коэффициента мощности нагрузки представлена на рисунке 5. Видно, что пропускная способность линии электропередачи при переходе повышается на 11 %.

Для подтверждения эффективности передачи электроэнергии по трем проводам способом «один прямой, два обратных» при работе проводов в режиме повторно-кратковременной перегрузки в динамике изменения токов, напряжений и температуры проводов линии было проведено имитационное моделирование. Модель была разработана в программном пакете *MATLAB Simulink*. Компьютерное моделирование проводилось одновременно для линий постоянного и переменного тока.

В состав линии электропередачи постоянного тока входит сглаживающий конденсатор, емкость которого определяется из условия допустимого провала напряжения на нагрузке в момент переключения проводов по формуле 9:

$$C = \frac{P}{U_{d2}^2 \cdot k_u} \frac{L_L}{R_L} \cdot 0,9, \quad (9)$$

где P – передаваемая нагрузке активная мощность, Вт; k_u – коэффициент, равный отношению величины провала напряжения к его нормальной величине; R_L – активное сопротивление линии электропередачи, Ом; L_L – индуктивность линии электропередачи, Гн.

На рисунке 6 представлен процесс разряда/заряда конденсатора, емкость которого определена по формуле 9 с коэффициентом k_u равным 0,01.

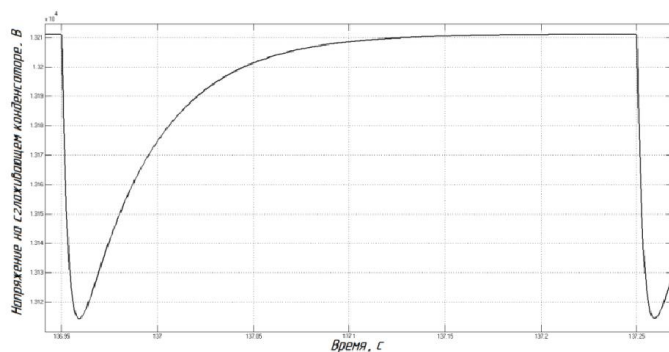


Рисунок 6 – Переходный процесс в цепи конденсатора

Установлено, что период переключения прямо пропорционален амплитуде колебаний температуры. В работе период переключения выбран так, чтобы гарантировался перезаряд сглаживающего конденсатора.

$$\frac{1}{3}T \geq 5 \cdot \frac{3}{2} \cdot R_{\text{л}} C. \quad (10)$$

На рисунке 7 представлены результаты моделирования передачи электроэнергии по линии схемы «один прямой, два обратных» с повторно-кратковременной перегрузкой проводов по току. Активная мощность для примера была принята равной 2 МВт, что соответствует средней мощности нагрузки распределительного пункта в горнодобывающей отрасли. Видно, что колебания температуры не превышают отметки 70 °С, что по условию моделирования является максимально допустимой температурой проводов линии, при этом передаваемая по линии активная мощность увеличена на 14 %, с 2,231 МВт до 2,542 МВт, напряжение на нагрузке составляет 94 % от номинального.

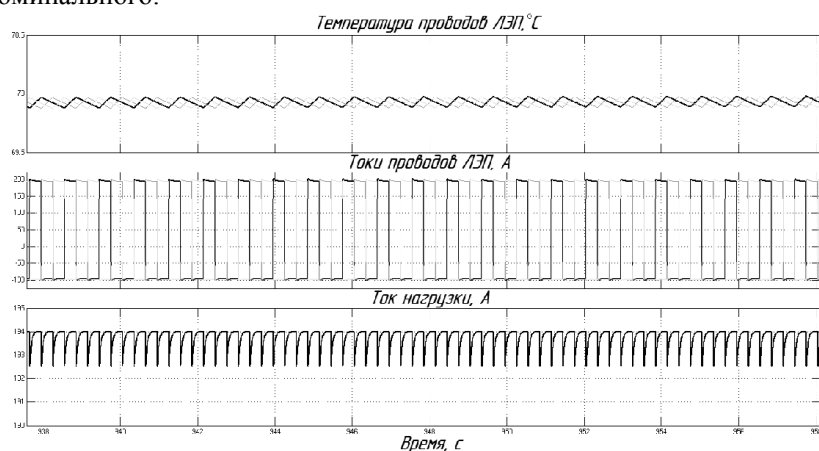


Рисунок 7 – Результаты моделирования передачи электроэнергии

Основные результаты, полученные в работе, были апробированы на примере распределительной сети среднего напряжения шахты «Воргашорская».

Исходными условиями являются параметры:

$U_n = 6 \text{ кВ}$; $R_1 = 0,135 \text{ Ом}$, $X_1 = 0,0219 \text{ Ом}$, $X_p = 0,8 \text{ Ом}$,
 $R_2 = 0,154 \text{ Ом}$, $X_2 = 0,113 \text{ Ом}$, $R_3 = 0,375 \text{ Ом}$, $X_3 = 0,263 \text{ Ом}$, где R_n , X_n –
активное и реактивное сопротивления n-ого участка распределительной
цепи; $\text{tg}\varphi_n = 0,5$ – отношение реактивной и активной мощности
нагрузки.

В результате моделирования в пакете программ *MATLAB* Simulink
было установлено, что из всех предлагаемых способов повышения
передаваемой активной мощности (пропускной способности) наиболее
эффективным является перевод линии на постоянный ток с
попеременным переключением проводов, увеличивая передаваемую
активную мощность в 2,23 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа решает актуальную научно-техническую задачу увеличения передаваемой по трехпроводной линии электропередачи активной мощности без внесения изменений в ее конструкцию.

1. Обоснована актуальность и проанализированы способы повышения пропускной способности и передаваемой активной мощности линии для распределительных сетей среднего уровня напряжения без внесения в них конструктивных изменений, к которым относятся:

- устройства продольной и поперечной компенсации;
- вольто-добавочный трансформатор;
- смена рода тока.

2. Аналитическим путем получены выражения для определения пропускной способности и передаваемой активной мощности радиальной линии электропередачи переменного тока в зависимости от параметров линии и нагрузки. Выявлены зависимости передаваемой по линии активной мощности от $tg\varphi_n$ и $tg\varphi_{л.}$. Установлено, что при $tg\varphi_n = 1$ и $tg\varphi_{л.} = 2$ передаваемая активная мощность меньше пропускной способности в 3 раза.

3. Для определения передаваемой активной мощности с учетом статических характеристик нагрузки в среде *MATLAB Simulink* была разработана имитационная модель линии электропередачи переменного тока, питающей активно-индуктивную нагрузку. Установлено, что определение передаваемой активной мощности без учета статических характеристик нагрузки приводит к относительной погрешности вычислений ее значения более 10 %.

4. Разработан алгоритм определения передаваемой по линии переменного тока активной мощности. Алгоритм позволяет по данным о величине номинальных значений реактивной и активной мощности нагрузки и активном и реактивном сопротивлении линии электропередачи рассчитать пропускную способность линии и передаваемую по ней активную мощность.

5. Введен критерий $K_{зм}$, величина которого характеризует повышение передаваемой активной мощности при смене рода тока линии. На основании введенного критерия проведена оценка эффективности различных способов перевода линии на постоянный

ток. Установлено, что наиболее эффективным по критерию увеличения передаваемой активной мощности способом перевода трехпроводной линии на постоянный ток является способ, предполагающий использование земли в качестве проводника. K_{3M} при этом увеличивается не менее чем в 2,34 раза. Вторым по эффективности является способ передачи электроэнергии способом «один прямой, два обратных» в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов. K_{3M} при этом увеличивается не менее чем на 11 %.

6. Разработан метод определения емкости сглаживающего конденсатора, применяемого в трехпроводной линии постоянного тока для поддержания напряжения на нагрузке, и оптимального по длительности периода переключения проводов линии электропередачи, при передаче по линии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки. Емкость конденсатора выбирается из максимально-допустимого падения напряжения на нагрузке, с учетом передаваемой по линии активной мощности, а также параметров самой линии электропередачи, с определением периода ее переключения.

7. В программном пакете *MATLAB Simulink* была разработана имитационная модель линии электропередачи постоянного тока, учитывающая изменение температуры проводов линии в динамике их переключения. На основании полученных путем моделирования временных зависимостей подтверждены результаты полученные аналитически. Согласно полученным данным коэффициент запаса по мощности трехпроводной линии постоянного тока работающей в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов по току больше коэффициента запаса по мощности линии переменного тока на 14 %.

8. Разработанный метод оценки повышения передаваемой активной мощности был апробирован на примере распределительной сети угольной шахты «Воргашорская». Установлено, что при переводе ее на постоянный ток, передаваемая активная мощность по критерию запаса по напряжению увеличивается в 2,23 раза, что больше на 57 %, чем при совместном использовании УПК и УПОК.

Основные положения работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Соловьев С.В. Особенности микросети на постоянном токе с использованием ветрогенераторов // Электротехнические комплексы и системы управления, № 3, Воронеж. – 2015. – С. 50–54.

2. Соловьев С.В. Сравнение эффективности передачи электроэнергии на примере ЛЭП постоянного и переменного тока // Международный научно-исследовательский журнал, № 6, Екатеринбург. – 2016. – С. 170–175.

3. Соловьев С.В. Перевод трехпроводной линии электропередач среднего уровня напряжения на постоянный ток // Известия ТулГУ, № 5, Тула. – 2017. – С. 353–361.

Прочие издания:

4. Соловьев С.В. Анализ экономической эффективности ЛЭП постоянного тока в сравнении с переменным током // Научная дискуссия. Вопросы технических наук, № 5, Москва. – 2016. – С. 90–96.

5. Соловьев С.В. Обзор способов электрификации районов со слаборазвитой электроэнергетической инфраструктурой // Сборник трудов Международной научно-технической конференции “Инновации и перспективы развития горного и электромеханики IPDME - 2017 машиностроения”, Санкт-Петербург. – 2017. – С. 215–219.