



ГОНЧАРОВ Валерий Олегович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И АНАЛИЗ
ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЛАВКИ ЛЬДА НА ПРОВОДАХ И ТРОСАХ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ**

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович

Официальные оппоненты:

Соловьева Елена Борисовна
доктор технических наук, доцент
заведующий кафедрой теоретических основ электротехники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» г. Санкт-Петербург,

Высогорец Светлана Петровна
кандидат технических наук
доцент кафедры «Диагностика Энергетического Оборудования» ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» (ОАО «НИИПТ»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 28 » мая 2019 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО СПбПУ и на сайте www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/

Автореферат разослан «___» марта 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.16,
к.т.н.



Резник Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Обеспечение надежного функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) – одна из главных задач электроэнергетики. Оледенение представляет большую угрозу для стабильной работы высоковольтных линий (ВЛ). При переходе температуры через 0°C, высокой влажности и сильном ветре на проводах и грозозащитных тросах (ГТ) образуется гололед. Наличие гололеда приводит к дополнительным нагрузкам на все элементы ВЛ, а также к повышенной восприимчивости к ветру, из-за чего возникает раскачивание проводов. Под действием веса образовавшегося льда возможен обрыв проводов и ГТ ВЛ, разрушение гирлянд изоляторов и арматуры, повреждение опор. Это приводит к вынужденному отключению линии для вывода в ремонт, что влечет за собой дополнительные капитальные вложения и трудозатраты.

Аварии, спровоцированные погодными условиями в зимний период, происходят как в России, так и за рубежом. В 2001 году оледенение проводов привело к повреждению 2500 км ВЛ в Сочинских электрических сетях. В 2008 году снежная буря в Китае привела к выводу из строя более 7541 ВЛ.

Для снижения последствий аварий, связанных с образованием гололеда на проводах и тросах ВЛ, производится профилактический прогрев проводов с помощью высоковольтных выпрямителей. Плавка льда осуществляется в соответствии со стандартом ФСК СТО 56947007-29.060.50.122-2012 и Руководящим документом 34.20.511. Данные методики регламентируют, в частности, длительность процедуры плавки, а также величину тока плавки.

Вблизи прогреваемой линии, как правило, присутствуют иные линии, находящиеся в рабочем режиме, которые являются источниками электромагнитного поля, индуцирующего ЭДС в контуре плавки. Таким образом, выпрямительные устройства испытывают влияние наведенных напряжений. Это приводит к нежелательному изменению режима работы выпрямителя. В отдельных случаях наведенные напряжения могут достигать величин, приводящих к выходу из строя выпрямителя.

В ряде случаев контур плавки содержит в качестве обратного провода землю. При этом на процесс плавки оказывают влияние характеристики заземляющего устройства (ЗУ). Поскольку ЗУ постоянно подвержены влиянию окружающей среды, их свойства не постоянны. В связи с этим актуальна разработка методики, позволяющей в полевых условиях определить схему замещения ЗУ для последующего использования в расчетах режимов плавки.

Как показывают расчеты, ток плавки содержит ряд высших гармоник, которые также желательно учитывать при рассмотрении процесса плавки для предотвращения перегрева провода или троса. Методика ФСК не учитывает тепловое действие высших гармоник тока плавки, а также эффектов наведенных ЭДС и характеристик ЗУ, учет которых оптимизирует процесс плавки. В связи с этим актуальным является создание математической модели работы высоковольтного выпрямителя, учитывающей наличие наведенной ЭДС в контуре плавки, частотные характеристики (ЧХ) проводов, ГТ и ЗУ.

В направлении создания и совершенствования математических моделей по расчету электрических цепей имеется значительный объем публикаций отечественных ученых, таких как Ю. Э. Адамьян, Л. Л. Балыбердин, В. Н. Боронин, Ю. Н. Бочаров, П. А. Бутырин, К. С. Демирчян, В. Ф. Дмитриков, Б. В. Ефимов, Е. С. Колечицкий, М. В. Костенко, С. И. Кривошеев, М. Ш. Мисриханов, М. И. Михайлов, Л. С. Перельман, В. Н. Рябченко, Н. В. Силин, Ю. А. Шершнев, С. Л. Шишигин, Ю. П. Шкарин, а также иностранных, таких как М. Hayakawa, Z. Jie, X. Shukai, W. Xu., W. Yang и L. Yuqing.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии № 14.584.21.0019 от 30.11.2015, УИ проекта RFMEFI58416X0019, тема «Влияние экспериментально полученных форм импульса тока молнии на механические характеристики композитных структур».

Цели и задачи

Целью работы является разработка и апробация универсальной математической модели для комплекса технических устройств, входящих в контур плавки льда на проводах и ГТ ВЛ, с учетом наводимых от параллельно работающих ВЛ напряжений, а также ЧХ проводов, ГТ и ЗУ.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1 Разработать методику оценки тока выпрямительного устройства с учетом ЭДС, наведенной в контуре плавки от токов близко расположенных воздушных линий.
- 2 Разработать экспресс-метод по определению схемы замещения ЗУ и определению ее параметров по экспериментально определенным импульсным характеристикам.
- 3 Выполнить исследование гармонического состава тока плавки с учетом частотных характеристик ЗУ, проводов и ГТ.
- 4 Разработать методику оценки тепловыделения в проводах и тросах с учетом их частотных свойств, а также гармонического состава тока плавки.
- 5 Рассмотреть ряд практических задач, и применить разработанные в работе методы для их решения.

Научная новизна

Исследовано влияние наведенных напряжений от токов близко расположенных воздушных линий на работу выпрямителей и разработана методика оценки изменения температуры провода.

Разработан экспресс-метод решения задачи структурного и параметрического синтеза для выбора схемы замещения ЗУ по имеющимся импульсным характеристикам в реальном масштабе времени.

Получены схемы замещения ЗУ, ГТ и проводов ВЛ, учитывающие их частотные характеристики.

Предложен способ учета высших гармоник на выбор величины тока плавки.

Теоретическая и практическая значимость работы

Показано, что в контурах плавки льда на проводах и тросах ВЛ могут наводиться напряжения, которые могут представлять угрозу для персонала и оборудования.

Обоснована необходимость учета частотных характеристик ЗУ в задачах, где в качестве обратного провода используется земля.

Разработанная экспресс-методика определения схемы замещения ЗУ может быть использована в задачах расчета стекания тока молнии с опор и получения уточненных оценок грозоупорности ВЛ.

Методология и методы исследования

В работе использовались теория цепей, методы оптимизации, методы цифровой обработки сигналов, генетический алгоритм. Решение громоздких систем уравнений выполнялось в среде Maple. Моделирование работы выпрямительного моста выполнялось в среде Simulink. Решение задачи оптимизации выполнялась в среде Matlab (номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018662772, выдано 15.10.2018 Федеральной службой по интеллектуальной собственности).

Положения, выносимые на защиту

1 Алгоритм предварительной обработки экспериментально определенных импульсных характеристик ЗУ.

2 Экспресс-метод решения задачи структурного и параметрического синтеза при получении схемы замещения ЗУ, основанный на предварительно разработанном наборе схем замещения и генетическом алгоритме.

3 Подход к сокращению числа переменных при решении задачи параметрического синтеза, основанный на предварительно выполненных аналитических исследованиях типичных частотных характеристик ЗУ.

4 Выполнение расчетов токов плавки для ряда практических задач с использованием описанных в работе методик.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждаются корректным применением классических методов теоретической электротехники и методов математического анализа, а также решением модельных задач.

Основные положения диссертационной работы докладывались и осуждались на международных конференциях, в том числе EMC Tokyo 2014, 2015, 2016, 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, на семинаре в Доме ученых им. М. Горького РАН в 2016 году, а также на кафедре «Теоретическая электротехника и электромеханика» СПбПУ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературных источников, насчитывающего 78 наименований, и двух приложений. Общий объем работы – 162 страницы. Диссертация содержит 85 рисунков и 44 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы.

Первая глава содержит примеры аварий в электроэнергетической отрасли, произошедших по причине образования льда на проводах и ГТ ВЛ. Рассмотрена процедура плавки льда при помощи высоковольтных выпрямителей. Приведены основные используемые схемы подключения высоковольтных выпрямителей. Рассмотрена существующая методика расчета режима плавки, выявлены ее недостатки.

Согласно Методическим указаниям по плавке гололеда постоянным током РД 34.20.511, профилактический нагрев провода рекомендуется производить при температуре воздуха около 0°C и скорости ветра 1–2 м/с. По сравнению с переменным током, использование постоянного тока для плавки гололеда открывает широкие возможности подбора величины тока плавки, например, при помощи тиристоров. Это облегчает контроль нагрева проводов и ГТ, что особенно актуально при нагреве тросов со встроенным оптическим кабелем. Простейшей схемой цепи для плавки льда является схема «ГТ-земля», представленная на рисунке 1. Типичные схемы плавки гололеда на ГТ и проводах ВЛ представлены в таблице 1.

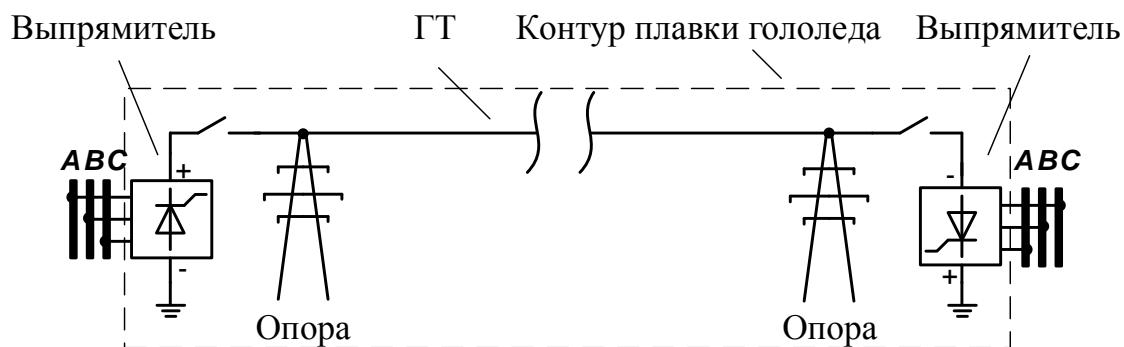


Рисунок 1 – Схема плавки гололеда «ГТ-земля»

Желательно иметь возможность производить плавку льда на ГТ ВЛ без ее отключения. Токи проводов ВЛ, находящихся на одной опоре с тросом, а также токи соседних линий, наводят ЭДС в контуре плавки, что может привести к повреждению выпрямителя.

Ток плавки имеет сложный гармонический состав, поэтому для корректного моделирования работы выпрямляющего устройства требуется учесть ЧХ ЗУ, проводов и тросов.

В ряде работ показано, что сопротивление ЗУ различно при различных частотах, что учитывается в настоящей работе использованием в расчетах схем замещения ЗУ с учетом его ЧХ. Разработана методика получения таких схем замещения в полевых условиях. Достоверная расчетная

модель необходима для получения приемлемых результатов в задачах оценки теплового действия тока, создаваемого выпрямителями при плавке гололеда на тросах и проводах ВЛ, а также при оценке грозоупорности ВЛ, эффективности работы ЗУ, а также при выработке мер по минимизации ущерба от воздействия ударов молнии в ВЛ.

Таблица 1 – Схема плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах

Название	Схема
ГТ – земля	
ГТ1,2	
ГТ1,2 – земля	
ГТ – три фазы	
ГТ1,2 – три фазы	

Для получения схемы замещения ЗУ, отражающей его ЧХ, нужно решить задачи структурного и параметрического синтеза. Под задачей структурного синтеза мы понимаем выбор количества RLC элементов схемы замещения ЗУ и способа их соединения между собой. Под задачей параметрического синтеза будем понимать задачу поиска значений каждого из элемента в схеме замещения. В работе предложены эффективные методы решения обеих задач в реальном масштабе времени. В первой главе содержится постановка этих задач, детальное рассмотрение которых выполнено во второй главе, при этом в качестве экспериментальных данных о свойствах ЗУ рассматриваются его экспериментальные характеристики, полученные импульсным методом.

Вторая глава посвящена разработке схемы замещения ЗУ на основе экспериментальных характеристик. Поскольку ЗУ подвержены деградации вследствие влияния окружающей среды, их параметры, а значит и частотные характеристики (ЧХ), не являются постоянной величиной. Для корректного расчета режимов плавки гололеда необходимо использовать схему замещения ЗУ, отражающую его реальные свойства. Становится актуальной разработка метода определения схемы замещения ЗУ в полевых условиях, непосредственно перед проведением процедуры плавки.

Экспериментальные кривые тока через ЗУ и напряжения на ЗУ, используемые в данной работе (см. рисунок 2, а), получены с использованием генератора импульсов 1,2/50 мкс с амплитудой порядка 10 кВ, создаваемых генератором, разработанным на кафедре ТВН под руководством проф. С. И. Кривошеева.

Воспользовавшись предложенным в работе Д. С. Шишигина¹ методом улучшения спектра экспериментальной функции, рассматривающим функцию $f(t)$, продолженную до $4T$, получим из экспериментальных функций $U_3(t)$ и $I_3(t)$ периодические функции $U(t)$ и $I(t)$ (см. рисунок 2, б) путем следующих преобразований:

$$U(t) = \begin{cases} U_3(t), & 0 \leq t \leq T, \\ U_3(T) - U_3(t-T), & T < t \leq 2T. \end{cases} \quad \tilde{I}(t) = \begin{cases} I_3(t), & 0 \leq t \leq T, \\ I_3(T) - I_3(t-T), & T < t \leq 2T. \end{cases}$$

$$U(t) = \begin{cases} U(t), & 0 \leq t \leq 2T, \\ U(2T) - U(t-2T), & 2T < t \leq 4T \end{cases} \quad I(t) = \begin{cases} \tilde{I}(t), & 0 \leq t \leq 2T, \\ \tilde{I}(2T) - \tilde{I}(t-2T), & 2T < t \leq 4T \end{cases}$$

Для получения ЧХ воспользуемся дискретным преобразованием Фурье для полученных функций $U(t)$ и $I(t)$:

$$U_k = \sum_{n=0}^{N-1} u(t_n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad I_k = \sum_{n=0}^{N-1} i(t_n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn},$$

где U_k, I_k – значение спектра сигнала напряжения и тока соответственно для частоты k , n – номер рассматриваемой точки, N – учетверенное количество отсчетов по времени.

¹ Шишигин Д. С. Методы теории заземлителей для анализа электромагнитной совместимости и молниезащиты электрических подстанций: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05 : защищена 19.12.17. СПб. 2017. 137 с.

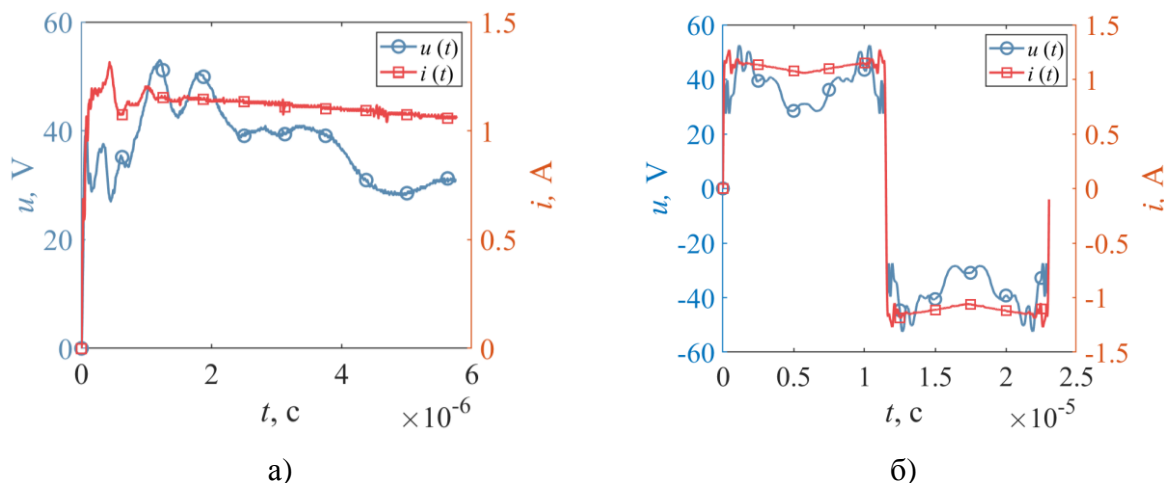


Рисунок 2 – Экспериментальные кривые тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ а) до обработки; б) после обработки

Полученные спектры амплитуд представлены на рисунке 3. Частотный диапазон, рассматриваемый в данной работе, ограничен частотой 2,5 МГц. Исключив гармоники более высокой частоты, из исследуемого сигнала одновременно удаляются составляющие высокочастотных помех.

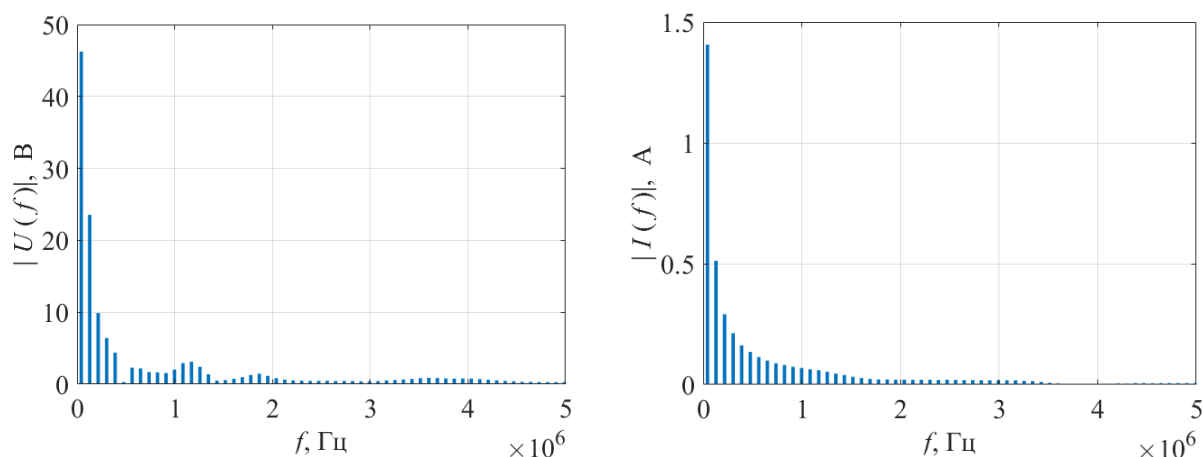


Рисунок 3 – Спектры сигналов $U(f)$ и $I(f)$, полученные в результате дискретного преобразования Фурье

В результате проведенных преобразований, из полученного спектра исключаются постоянная составляющая и паразитные гармоники. Перейдя в частотную область, определим модуль комплексного сопротивления $z(\omega)$ ЗУ в точках $\omega = \omega_k$, $\omega_1 = 2\pi/4T$, $\omega_k = (2k - 1)\omega_1$, $k = (1..N)$:

$$z(\omega_k) = \frac{U(\omega_k)}{I(\omega_k)}.$$

Обработанные экспериментальные ЧХ $U(\omega)$ и $I(\omega)$, а также рассчитанная ЧХ $z(\omega)$ представлены на рисунке 4.

На основе полученной ЧХ ЗУ $z(\omega)$ производится решение задачи синтеза схемы замещения. В работе W. Xu² был рассмотрен метод подбора схемы замещения при помощи генетического алгоритма (ГА). В качестве структуры схемы замещения был выбран набор N одинаковых ветвей с четырьмя

² Pordanjani I.R., Chung C.Y., Mazin H.E., Xu W. A Method to Construct Equivalent Circuit Model From Frequency Responses With Guaranteed Passivity // IEEE Transactions on Power Delivery. 1. 2011. Vol. 26. pp. 400-409.

пассивными элементами R , L , C и G . Описанный метод обладает хорошей сходимостью, но большое количество переменных при оптимизации делают процесс подбора долгим и неподходящим для полевых условий.

В данной работе задача синтеза разделена на задачу структурного и параметрического синтеза. Решение задачи структурного синтеза заключается в выборе графа схемы замещения и состава элементов каждой ее ветви. В качестве первичных исходных данных для решения задачи структурного синтеза предлагается использовать число и тип экстремальных точек частотной характеристики $z(\omega)$, свидетельствующих о наличии у схемы замещения резонансных частот, после чего можно синтезировать схему чисто реактивной схемы, обладающей частотной характеристикой схожего вида. Вид экстремумов (минимумы или максимумы) определяет вид резонансов в этих точках – резонанса токов или резонанса напряжений. Далее на основе формальных правил составляется одна или несколько чисто реактивных схем с тем же числом и последовательностью резонансов.

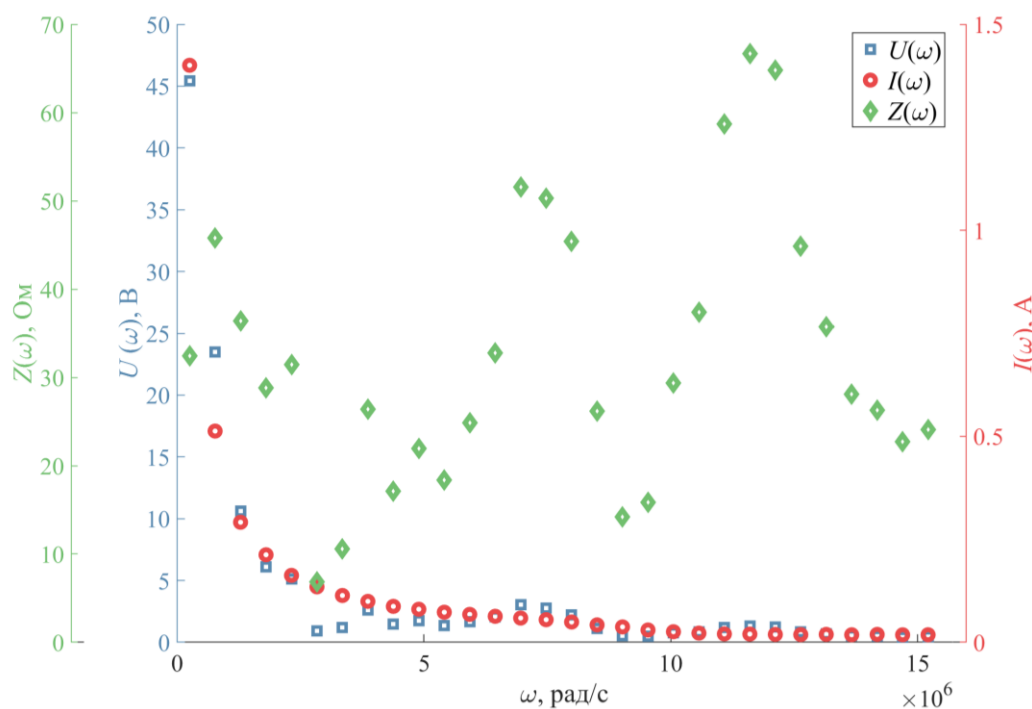


Рисунок 4 – ЧХ $U(\omega)$, $I(\omega)$ и $z(\omega)$

На рисунке 5 представлены обработанная экспериментальная ЧХ $z_1(\omega)$ и ЧХ $z_2(\omega)$ чисто реактивной схемы замещения, приведенной на рисунке 6, обладающей тремя «параллельными» и двумя «последовательными» резонансами.

Под параметрическим синтезом понимается нахождение номиналов элементов схемы замещения, структура которой уже определена нами ранее. В работах В. Gustavsen были описаны методы параметрической идентификации системы по ее частотной характеристике с помощью векторной аппроксимации, однако результатом решения может стать схема с источниками энергии, что для рассматриваемой задачи недопустимо.

Для решения этой задачи выбран ГА, моделирующий при оптимизации эволюционный процесс. Создается поколение «особей», представляющее собой набор векторов-параметров, которые

случайным образом мутируют и скрещиваются между собой. Отбор «особей» производится по значению целевой функции:

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (z(\omega_k) - z'(\omega_k, P))^2},$$

где $z(\omega_k)$ и $z'(\omega_k, P)$ – значения экспериментальной и рассчитанной ЧХ соответственно при частоте ω_k ; P – вектор параметров.

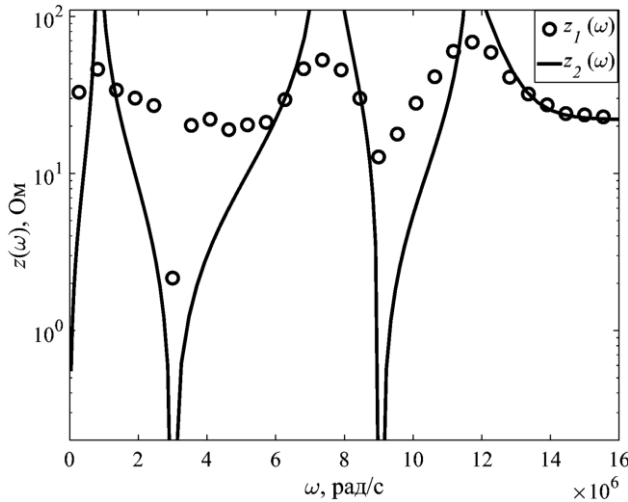


Рисунок 5 – ЧХ ЗУ $z_1(\omega)$ и ЧХ чисто реактивной схемы замещения $z_2(\omega)$

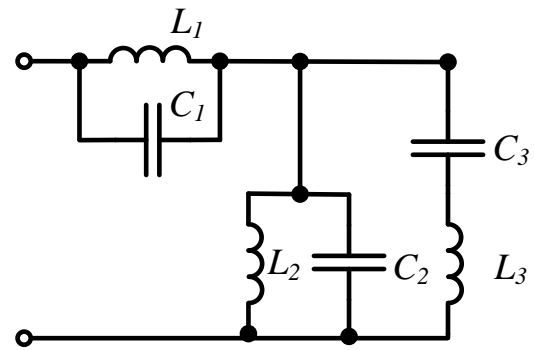


Рисунок 6 – Чисто реактивная схема, соответствующая ЧХ $z_2(\omega)$ на рисунке 5

В тексте диссертационной работы описана версия использованного ГА для настоящей постановки задачи.

Для удовлетворения сформулированного выше требования решения задачи параметрического синтеза в полевых условиях предложено следующее техническое решение: из предположения об известности резонансных частот получены зависимости параметров реактивных элементов между собой. Таким образом, при решении задачи параметрического синтеза достаточно определить номиналы активных сопротивлений и одного реактивного элемента. Количество параметров оптимизации сокращается на $(N - 1)$, где N – число реактивных элементов в схеме замещения. Рассмотрим данный подход для схемы, представленной на рисунке 6. Полное сопротивление z равно:

$$z = \omega \left(C_3 L_1 L_2 L_3 (C_1 + C_2) \omega^4 + \left((-L_1 - L_3) C_3 - L_1 (C_1 + C_2) \right) L_2 - C_3 L_1 L_3 \right) \omega^2 + L_1 + L_2 \Bigg/ \left((1 + \omega^4 C_2 C_3 L_2 L_3 + ((-C_2 - C_3) L_2 - C_3 L_3) \omega^2) (\omega^2 C_1 L_1 - 1) \right).$$

Корни полинома числителя соответствуют последовательным резонансам $\omega_{1\text{посл}}$, $\omega_{2\text{посл}}$, а корни полинома знаменателя – параллельным резонансам $\omega_{1\text{пар}}$, $\omega_{2\text{пар}}$, $\omega_{3\text{пар}}$ экспериментальной ЧХ на рисунке 5.

Один из параллельных резонансов возникает в цепи при частоте $\omega_{\text{пар1}}$, $\omega_{\text{пар2}}$ или $\omega_{\text{пар3}}$:

$$\omega_{\text{пар1/2/3}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

Один из пары параметров L_1, C_1 не является независимым, так как они связаны соотношением:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_{\text{пар1/2/3}}^2 C_1} \text{ или } C_1 = \frac{1}{\omega_{\text{пар1/2/3}}^2 L_1}$$

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \omega_{\text{посл1/2}}^4 + \omega_{\text{посл1/2}}^2 \frac{(-C_1 L_1 L_2 - C_2 L_1 L_2 - C_3 L_1 L_2 - C_3 L_1 L_3 - C_3 L_2 L_3)}{C_1 C_3 L_1 L_2 L_3 + C_2 C_3 L_1 L_2 L_3} + \frac{L_1 + L_2}{C_1 C_3 L_1 L_2 L_3 + C_2 C_3 L_1 L_2 L_3} = 0, \\ \omega_{\text{пар1/2/3}}^4 + \omega_{\text{пар1/2/3}}^2 \frac{(-L_2 C_2 - L_2 C_3 - C_3 L_3)}{C_2 C_3 L_2 L_3} + \frac{1}{C_2 C_3 L_2 L_3} = 0. \end{cases}$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \omega_{\text{пар1/2/3}}^2, \quad \alpha_2 = \omega_{\text{посл1/2}}^2, \\ A_1 &= -\frac{(-L_2 C_2 - L_2 C_3 - C_3 L_3)}{C_2 C_3 L_2 L_3}, \quad B_1 = \frac{1}{C_2 C_3 L_2 L_3}, \\ A_2 &= -\frac{(-C_1 L_1 L_2 - C_2 L_1 L_2 - C_3 L_1 L_2 - C_3 L_1 L_3 - C_3 L_2 L_3)}{C_1 C_3 L_1 L_2 L_3 + C_2 C_3 L_1 L_2 L_3}, \\ B_2 &= \frac{L_1 + L_2}{C_1 C_3 L_1 L_2 L_3 + C_2 C_3 L_1 L_2 L_3}. \end{aligned}$$

Получим:

$$\begin{cases} \alpha_2^2 + \alpha_2 \cdot (-A_2) + B_2 = 0, \\ \alpha_1^2 + \alpha_1 \cdot (-A_1) + B_1 = 0. \end{cases}$$

По формулам Виета:

$$\begin{cases} \alpha_{2-1} + \alpha_{2-2} = A_2, \\ \alpha_{2-1} \alpha_{2-2} = B_2. \end{cases}, \quad \begin{cases} \alpha_{1-1} + \alpha_{1-2} = A_1, \\ \alpha_{1-1} \alpha_{1-2} = B_1. \end{cases}$$

Решив полученные системы уравнения, получим:

$$C_2 = \frac{-B_2 C_1^2 L_1^2 + A_2 C_1 L_1 - 1}{(-C_1 (B_1 - B_2) L_1 + A_1 - A_2) L_1},$$

$$C_3 = \frac{(B_1^2 + (-A_1 A_2 + A_2^2 - 2B_2) B_1 + (B_2 + A_1 (A_1 - A_2)) B_2) \times (-B_1 C_1^2 L_1^2 + A_1 C_1 L_1 - 1) (-B_2 C_1^2 L_1^2 + A_2 C_1 L_1 - 1)}{\left((-C_1 (B_1 - B_2) L_1 + A_1 - A_2) (C_1 (A_1 B_2 - A_2 B_1) L_1 + B_1 - B_2)^2 L_1 \right)},$$

$$L_2 = \frac{(C_1 (A_1 B_2 - A_2 B_1) L_1 + B_1 - B_2) L_1}{(-B_2 C_1^2 L_1^2 + A_2 C_1 L_1 - 1) B_1},$$

$$L_3 = \frac{(-C_1 (B_1 - B_2) L_1 + A_1 - A_2)^2 \times (C_1 (A_1 B_2 - A_2 B_1) L_1 + B_1 - B_2) L_1}{\left((-B_1 C_1^2 L_1^2 + A_1 C_1 L_1 - 1) (-B_2 C_1^2 L_1^2 + A_2 C_1 L_1 - 1) \times (B_1^2 + (-A_1 A_2 + A_2^2 - 2B_2) B_1 + (B_2 + A_1 (A_1 - A_2)) B_2 \right)}.$$

Таким образом, зная резонансные частоты из ЧХ исследуемого объекта и задав значение одного реактивного параметра, можно рассчитать все остальные LC параметры. Анализ ЧХ рассматриваемой схемы позволил уменьшить количество независимых параметров на пять. Для схемы замещения

аналогичной структуры, представленной на рисунке 7, количество независимых параметров сократится с 13 до 8.

Данные производительности программы по определению схемы замещения ЗУ представлены в таблице 2. Уменьшение количества независимых параметров при решении задачи параметрического синтеза позволило значительно сократить время работы процессора со 190,5 мин. до 15,05 с (почти в 760 раз) при качественно идентичных результатах (отличие в значении целевой функции менее 1 %).

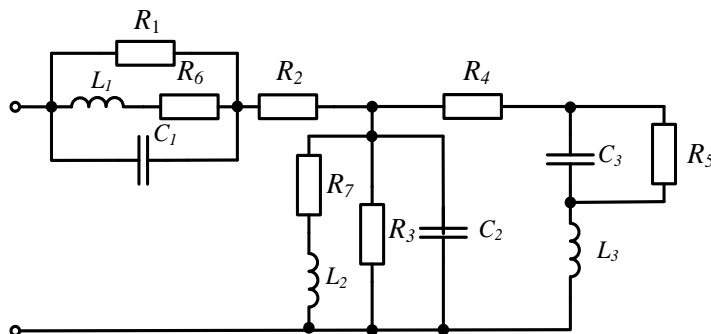


Рисунок 7 – Схема замещения ЗУ

Таблица 2 – Данные производительности работы программы по определению схемы замещения ЗУ

Число параметров оптимизации	Размер поколения	Количество поколений	Время счета	Значение целевой функции
6	2 000	25	15,05 с	$2,857 \cdot 10^{-1}$
13	40 000	50	190,5 мин.	$2,864 \cdot 10^{-1}$

ЭВМ: ОС Windows 7 64 бит, ЦП Intel Core i5 4690k 4 x 3,5 ГГц, ОЗУ 32 ГБ

ЧХ полученных схем замещения представлены на рисунке 8. Визуально результат при оптимизированном решении выглядит значительно лучше за счет более качественного повторения первого параллельного резонанса на частоте $7,7 \cdot 10^5$ рад/с.

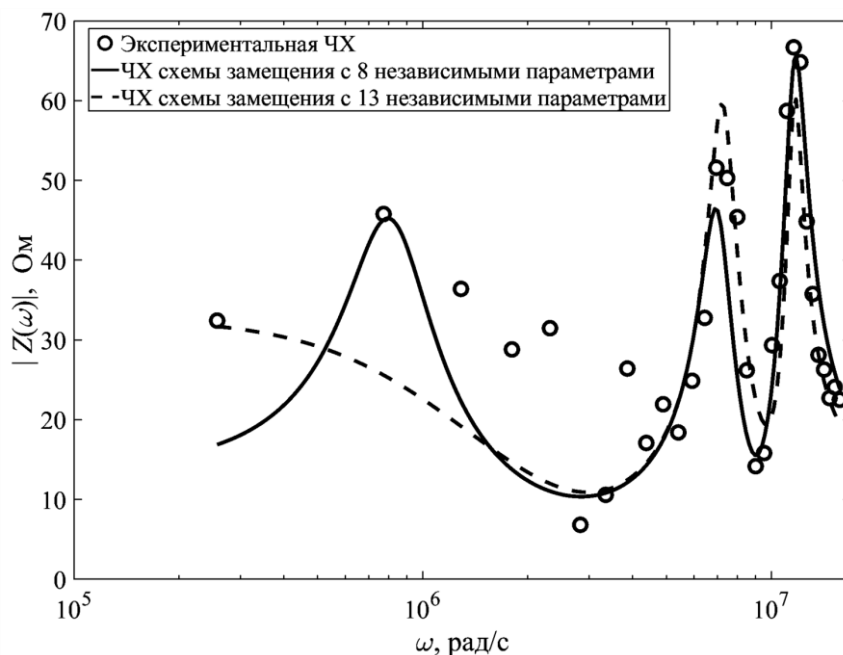


Рисунок 8 – Экспериментальная ЧХ и ЧХ полученных схем замещения

Рассмотренная схема замещения по количеству резонансов является одной из наиболее сложных, которые встречаются на практике. Все рассмотренные в работе схемы замещения структурированы по количеству и последовательности резонансов. В рамках работы была разработана расчетная программа, написанная на языке Matlab. В программу включена база типовых схем замещения. Для каждой схемы проведен анализ зависимостей параметров реактивных элементов между собой. Благодаря проведенной оптимизации, а также за счет подобранных параметров генетического алгоритма, время работы программы составляет около 15 с для самых сложных схем.

В третьей главе выполнена оценка ЭДС, наведенных в контуре плавки от токов ВЛ, полученная при предположении об идеальной проводимости земли. В общем случае наведенную ЭДС в контуре можно рассчитать, используя закон электромагнитной индукции и векторный магнитный потенциал A .

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} \oint_{L_1} A \cdot dl_1.$$

В частном случае, если рассматривать бесконечно протяженные параллельные провода (рисунок 9), величину магнитной индукции для каждой точки можно рассчитать:

$$\dot{E} = -j\omega I \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{b}{a},$$

где l – длина линии.

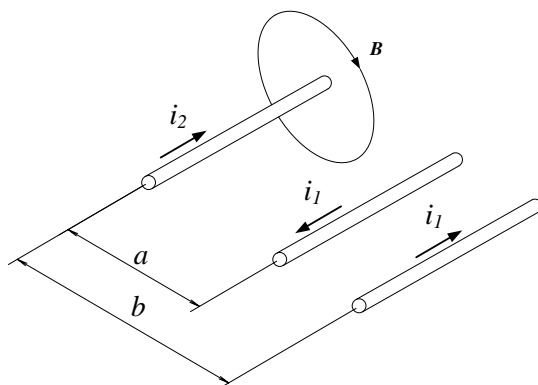


Рисунок 9 – Ток в проводе i_2 наводит ЭДС \mathcal{E} в параллельно расположенной рамке

В расчетах влияния ВЛ на соседние линии необходимо учитывать поверхностный эффект в земле. В работах J. Carson, Г. А. Гринберга, Б. Э. Бонштедта описаны методики учета влияния проводящей земли, однако расчеты на их основе на практике сложны и трудоемки. В настоящей работе принято допущение об идеально проводимой земле. При таком допущении для каждого проводника с током строится его зеркальное изображение.

Рассмотрим работу системы плавки гололеда при различных схемах контура плавки. На рисунке 10 представлен условный участок сближения четырех ВЛ. Будем считать, что плавка льда осуществляется на ВЛ1, при этом остальные линии не отключены и работают в нормальном режиме. Будем рассматривать такое распределение фазовых сдвигов токов в проводах, при которых модуль

наведенной ЭДС в контуре ГТ2–ГТ2' будет максимальным. Результирующие наведенные ЭДС в каждом контуре приведены в таблице 3.

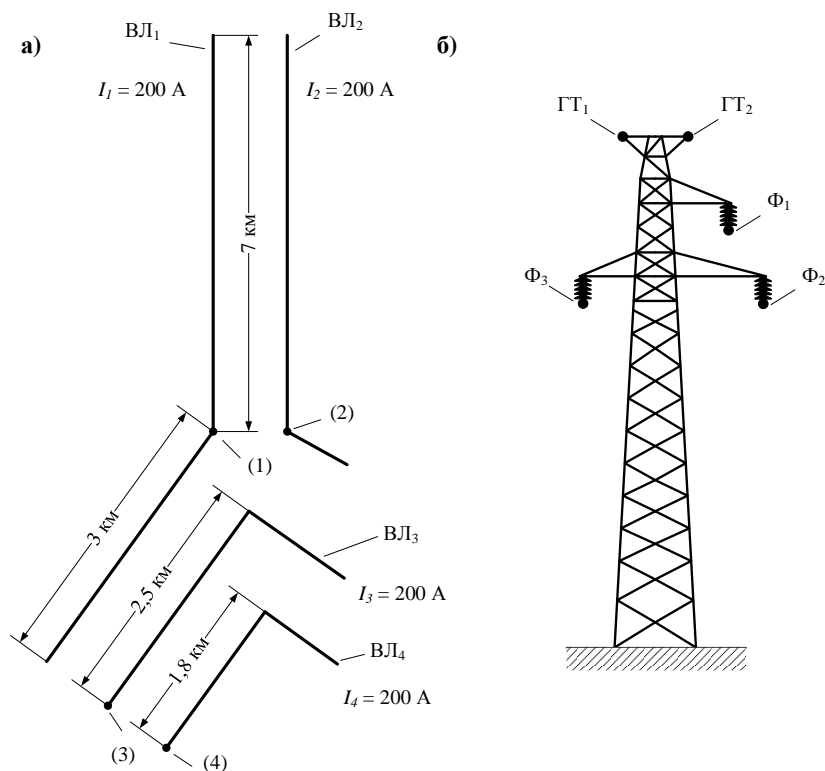


Рисунок 10 – Данные для расчета:

(а) карта участка ЛЭП; б) обозначение проводов и ГТ

Таблица 3 – Результирующие комплексные наведенные ЭДС в контурах

Схема плавки	ЭДС, В				
	ГТ1–ГТ1'	ГТ2–ГТ2'	Φ1– Φ1'	Φ2– Φ2'	Φ3– Φ3'
ГТ – земля	512∠-49°	535∠-47°	–	–	–
ГТ1 – 2					
ГТ1,2 – земля					
ГТ – три фазы	35∠-46°	39∠-47	50∠-34°	77∠-14°	36∠-25°
ГТ1,2 – три фазы					

В четвертой главе представлены результаты компьютерного моделирования работы выпрямляющего устройства в условиях наличия наведенной ЭДС в контуре плавки с учетом частотных характеристик ЗУ, проводов и ГТ. Приведены оценки вклада каждого приближения в конечный результат.

Схема замещения системы плавки гололеда представлена на рисунке 11. Обогреваемый участок провода или троса подсоединяется к разъединителям K_1 и K_2 .

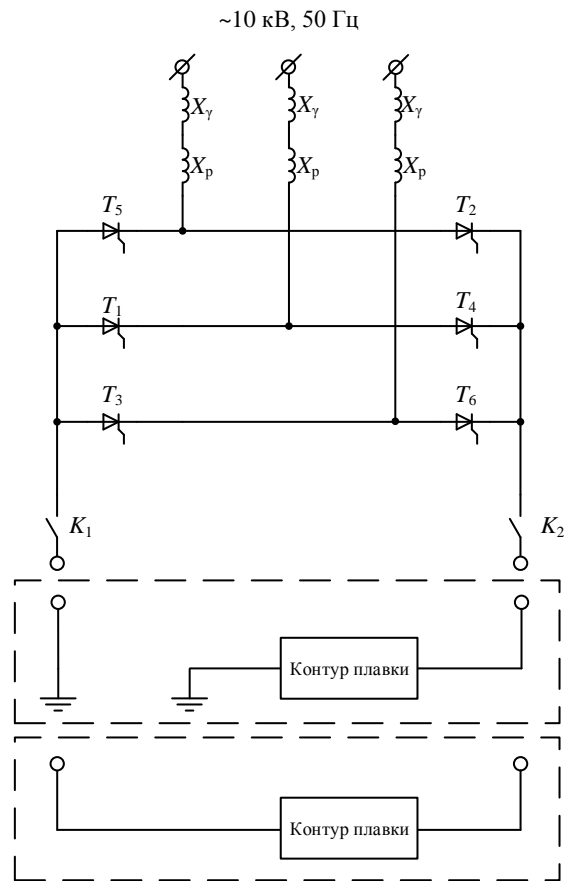


Рисунок 11 – Схема замещения системы плавки гололеда.

X_y – реактивное сопротивление сети, X_p – реактивное сопротивление реактора, T – управляемые тиристоры, K_1, K_2 – разъединители

На рисунке 12 представлены кривые тока плавки при наличии и отсутствии наведенных напряжений.

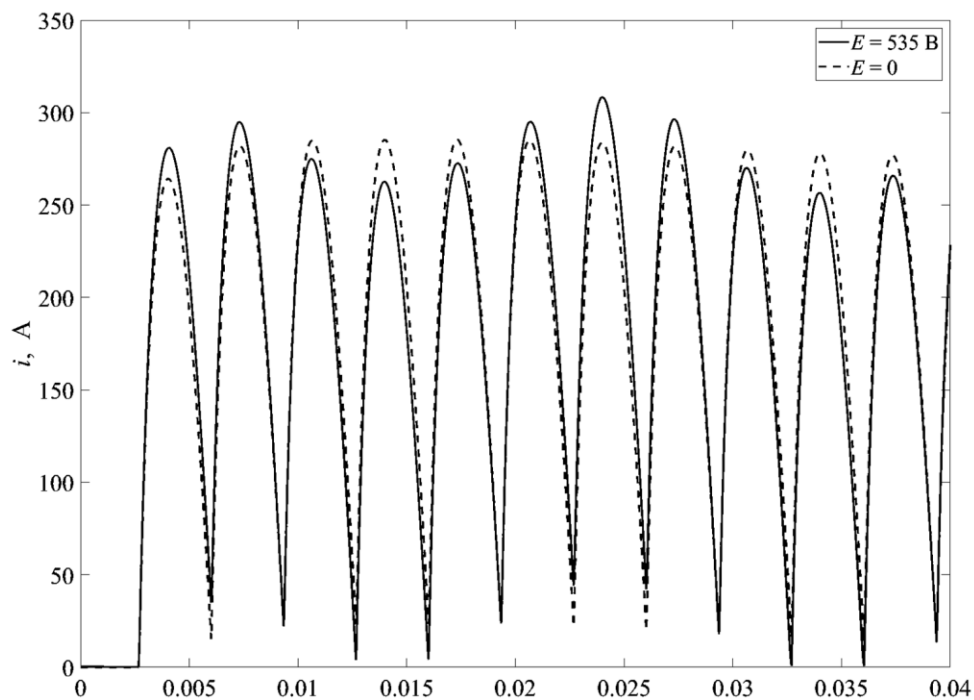


Рисунок 12 – Кривые тока в схеме плавки «ГТ – земля» при наличии и отсутствии наведенной ЭДС в контуре

Требуемый ток плавки $I_{пл_треб}$, необходимый для удаления гололеда с проводов или тросов в течение заданного временного периода рассчитывается из следующего уравнения:

$$I_{пл_треб}^2 \cdot R_t \cdot \Delta\tau = q_v \cdot \Delta\tau + q_{из} \cdot \Delta\tau + Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где R_t – сопротивление обогреваемого провода или троса (Ом); $\Delta\tau$ – длительность процедуры плавки (с); q_v – мощность, отводимая за счет конвекции в воздухе (Вт/м); $q_{из}$ – мощность, отводимая за счет излучения (Вт/м); Q_1 – тепло, затрачиваемое на нагрев проводника (Дж/м); Q_2 – тепло, затрачиваемое на нагрев льда (Дж/м); Q_3 – тепло, затрачиваемое на плавление льда (Дж/м).

В методике ФСК не учитываются высшие гармоники в составе тока плавки. Выделив из полученной кривой тока плавки постоянную составляющую и высшие гармоники, уравнение теплового баланса примет следующий вид:

$$\left(\sum_{k=1}^N I_k^2 \cdot R_{kt} \right) \cdot \Delta\tau = q_v \cdot \Delta\tau + q_{из} \cdot \Delta\tau + Q_1 + Q_2 + Q_3$$

где I_k – ток k -ой гармоники (А); R_{kt} – эквивалентное сопротивление обогреваемого провода или троса для k -ой гармоники (Ом).

В приложении А представлен перечень типовых схем замещения с приведенными видами ЧХ. Для каждой типовой схемы указано число переменных, используемое при решении задачи параметрического синтеза в виде дроби – первое число указывает полное число переменных, второе число указывает число переменных, оставшихся после проведения предварительно проведенных аналитических исследований (см. приложение Б).

В приложении Б представлены выкладки аналитических исследований по сокращению числа переменных в решении задачи параметрического синтеза. Представлены решения для трех наиболее сложных «типажей» схем замещения из приложения А.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Оледенение проводов и тросов представляет большую угрозу для стабильной работы ЭЭС. Анализ современного состояния вопроса показал, что существующие методики расчета тока плавки не учитывают гармонический состав тока плавки. В работе создана и апробирована модель всего контура плавки, учитывающая ЧХ ГТ, проводов ВЛ и ЗУ. Модель также включает выпрямитель, создающий ток плавки и являющийся возможным источником гармоник. Произведена оценка тепловыделения от тока плавки. Показано, что для режимов прерывистого тока высшие гармоники вносят существенный (до 90% от теплового действия постоянной составляющей) вклад в общее тепловыделение. Показано существенное отличие тока плавки при использовании резистивных схем замещения и схем, учитывающих частотные свойства ЗУ и ГТ.

2 Разработан экспресс-метод определения схемы замещения ЗУ по его экспериментально определенным характеристикам. Метод реализован в виде программы, написанной на языке Matlab, дающей возможность получать схему замещения ЗУ в реальном масштабе времени. Метод

ориентирован на совместное использование с приборами контроля электромагнитных характеристик ЗУ опор ВЛ и распределительных устройств. Разработанный комплекс типовых схем замещения и программы по решению задачи параметрического синтеза позволяет получать в реальном масштабе времени схемы замещения на основании ЧХ в диапазоне до 2,5 МГц. Благодаря этому метод может быть использован и для выработки мер для повышения грозоупорности ВЛ. Метод также может применяться для мониторинга состояния ЗУ, определения необходимости его ремонта (восстановления), прогнозирования сроков работы.

3 Устройства, создающие ток плавки, в большинстве случаев располагаются в зоне работы ВЛ, являющихся источниками электромагнитного излучения. В работе оценены напряжения, наводимые в контуре плавки и способные повлиять на процедуру плавки гололеда и работу выпрямительного устройства для большого количество вариантов взаимного расположения ВЛ и контура плавки. Полученные оценки наведенных напряжений являются «оценками сверху». При этом показано, что наведенная ЭДС в контуре плавки вносит слабое (до 3 %) влияние на общее тепловыделение, однако напряжения на выпрямителе, обусловленной наведенной ЭДС может достигать нескольких сотен вольт.

4 В целом, в работе создана методика расчета тока плавки гололеда на проводах и ГТ ВЛ, учитывающая все основные влияющие на этот процесс факторы.

Основные публикации автора по теме работы

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1 Гончаров В.О., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И. Методика оценки молниестойкости элементов ветроэнергетических установок из композитных материалов // Известия НТЦ Единой энергетической системы, № 76, 2017. С. 36-47.

2 Goncharov V., Natreba K., Korovkin N., Vinogradov S., Hayakawa M., Repin A., Shershnev A., Silin N. Estimation of Induced EMF Value in Ground Wire During Ice-Melting Procedure // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Tokyo. 2014. pp. 805-808.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

Гончаров В.О. Определение схемы замещения заземляющего устройства по экспериментальной частотной характеристике, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018662772, 15.10.2018.

Прочие публикации:

1 Гончаров В.О. Оценка величины наведенной ЭДС в грозозащитном тросе во время плавки гололеда // Перспективы развития науки и образования. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. В 7 частях. Часть II. Москва. 2013. С. 155-156.

2 Goncharov V., Korovkin N., Silin N. Modelling of Ice-Melting Circuit under Influence of EMF Induced by the Currents of Overhead Lines // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. 2014. Vol. 13. pp. 476-484.

3 Goncharov V., Korovkin N., Silin N. Influence of EMF Induced by Currents of Overhead Lines on RMS Value of Ice-Melting Current // Proceedings of 2015 ElConRusNW. St. Petersburg. 2015. pp. 221-226.

4 Goncharov V., Korovkin N. Calculation of Induced EMF by Overhead Lines // Proceedings of 2016 ElConRusNW. St. Petersburg. 2016. pp. 608-610.

5 Goncharov V., Korovkin N., Krivosheev S. Evaluation of Lightning-Resistant Samples of Composite Heavy-Duty Blades of Wind Generators // Proceedings of 2017 ElConRusNW. St. Petersburg. 2017. pp. 1550-1552.