

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем

На правах рукописи

ГОНЧАРОВ Валерий Олегович

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

Направление 13.06.01 – Электро- и теплотехника

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург – 2018

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре Института энергетики и транспортных систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: **Коровкин Николай Владимирович**,
доктор технических наук, профессор

Научный руководитель: **Коровкин Николай Владимирович**,
доктор технических наук, профессор

Рецензент: **Нетреба Кирилл Иванович**
Ген. директор ООО «АйдисТехнологии»

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Обеспечение надежного функционирования электроэнергетической системы – одна из главных задач электроэнергетики. Данный вопрос остро стоит в регионах с холодным климатом, и особенно – в приморских регионах, таких как Сахалин, Камчатка и Чукотка. При переходе температуры через 0°C, высокой влажности и сильном ветре на проводах и грозозащитных тросах образуется гололед. Наличие гололеда приводит к дополнительным нагрузкам на все элементы воздушных линий (ВЛ), а также к повышенной восприимчивости к ветру, из-за чего возникает раскачивание проводов. Под действием веса образовавшегося льда возможен обрыв проводов и грозозащитных тросов (ГТ) воздушных линий, 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 зачастую 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, к увеличению или уменьшению тока плавки. 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 ЗУ. Поскольку ЗУ

постоянно подвержены влиянию окружающей среды, их свойства не постоянны. Является актуальным разработка метода, позволяющего в полевых условиях определить схему замещения ЗУ для последующего использования в расчетах режимов плавки.

Кроме того, как показывают расчеты, ток плавки содержит ряд высших гармоник, которые также желательно учитывать при рассмотрении процесса плавки, поскольку эквивалентное активное сопротивление контура плавки зависит от частоты.

Методика ФСК не учитывает тепловое действие высших гармоник в токе 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 проводов, ГТ и ЗУ.

Цели и задачи исследования

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 частотных характеристик 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 выбору структуры схемы замещения ЗУ и определению ее параметров по экспериментально определенным переходным характеристикам.
- 3 Выполнить исследование гармонического состава тока плавки с учетом частотных характеристик ЗУ, проводов и ГТ.
- 4 Разработать методику оценки температуры провода при нагреве током, создаваемым выпрямительным устройством с учетом гармонического состава тока и присутствия наведенных напряжений в контуре 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.

Предложен способ учета влияния, вносимого высшими гармониками тока, а также частотных характеристик ЗУ, проводов и ГТ на процесс плавки гололеда.

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

Теоретическая и практическая значимость

Показано, что в контурах плавки льда на проводах и тросах ВЛ могут наводиться напряжения, величины которых существенным образом влияют на процесс плавки гололеда, и показана необходимость их учета при выборе режимов плавки.

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 оценки получения уточненных оценок грозоупорности ВЛ.

Апробация работы

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 обсуждались на международных конференциях, в том числе EMC Tokyo 2014, 2015, 2016, 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, а также на семинаре в Доме ученых им. М. Горького РАН в 2016 году.

Основные публикации автора по теме работы

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 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.

3 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.

4 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.

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

6 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.

7 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.

Представление научного доклада: основные положения

1 Алгоритм предварительной обработки экспериментально определенных переходных 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.

Содержание работы

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

Первая глава содержит описание процесса 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 представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – Схема плавки гололеда «ГТ-земля»

Таблица 1 – Схема плавки гололеда на ГТ

Название	Схема
ГТ-земля	
ГТ1,2	
ГТ1,2-земля	

Желательно иметь возможность производить плавку льда на ГТ ВЛ без ее отключения. Однако, 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 частотные характеристики ЗУ, проводов и тросов.

В ряде работ показано, что сопротивление ЗУ различно при различных частотах, что учитывается в настоящей работе построением и использованием в расчетах схем замещения ЗУ, содержащих реактивные элементы. 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.

Для получения схемы замещения ЗУ, отражающей его частотные характеристики, нужно решить задачи структурного и параметрического синтеза. Под задачей структурного синтеза здесь понимается 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 переходные характеристики.

Вторая глава посвящена разработке схемы замещения ЗУ на основе его экспериментально определенной переходной характеристики. 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 актуальным 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.

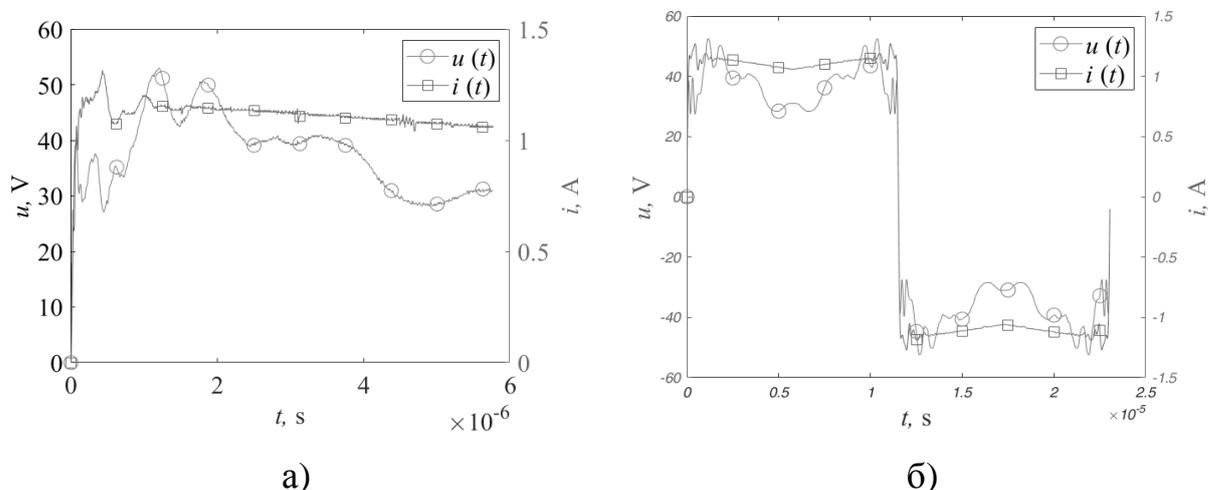


Рисунок 2 – Экспериментальные кривые тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ а) до обработки; б) после обработки

Воспользовавшись предложенным в работе Д. С. Шишигина¹ методом улучшения спектра функции, рассматривающий функцию $f(t)$, продолженную до $4T$, получим из экспериментальных функция $U_{\text{Э}}(t)$ и $I_{\text{Э}}(t)$ периодические функции $U(t)$ и $I(t)$ путем следующих преобразований:

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

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

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

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

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.

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.

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. Обработанные временные характеристики $U(t)$ и $I(t)$ представлены на рисунке 2, б.

Напряжение и ток, полученные с помощью такого преобразования, представлены на рисунке 2, б. В результате из полученного спектра исключаются постоянная составляющая и паразитные гармоники. Перейдя в частотную область, определим модуль комплексного сопротивления $z(\omega)$ ЗУ в точках $\omega=\omega_k, \omega_1=2\pi/4T, \omega_k=(2k-1)\omega_1, k=(1..N)$:

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

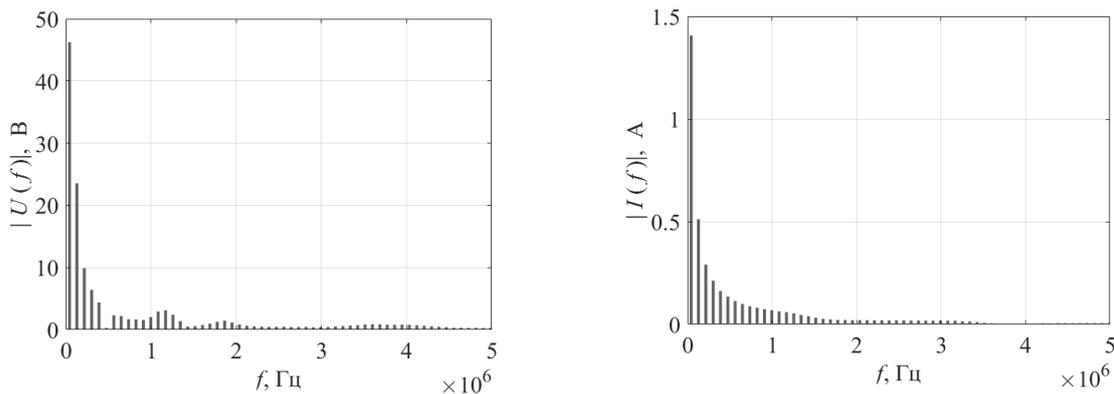


Рисунок 3 – Спектры сигналов $U(f)$ и $I(f)$, полученные в результате дискретного преобразования Фурье

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 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 или напряжений. Далее на основе формальных правил составляется одна или несколько чисто реактивных схем с тем же числом и последовательностью резонансов.

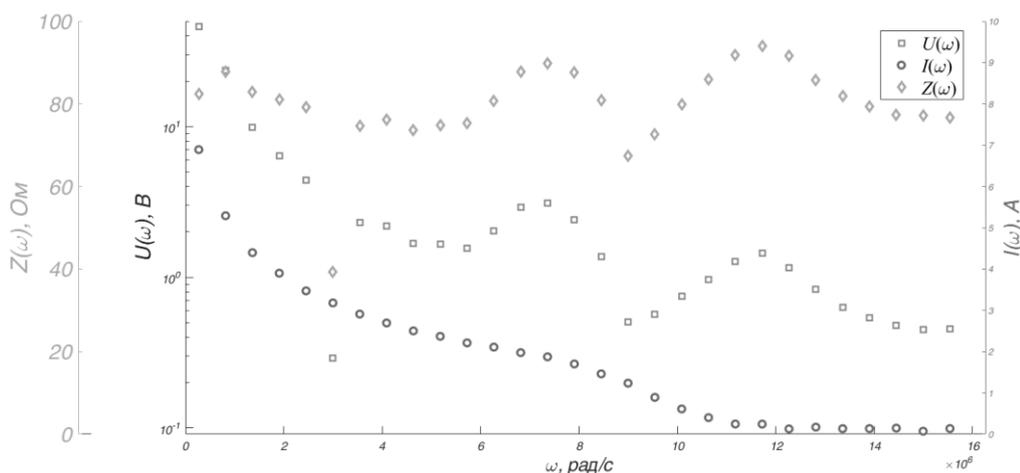


Рисунок 4 – ЧХ $U(\omega)$, $I(\omega)$ и $z(\omega)$

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.

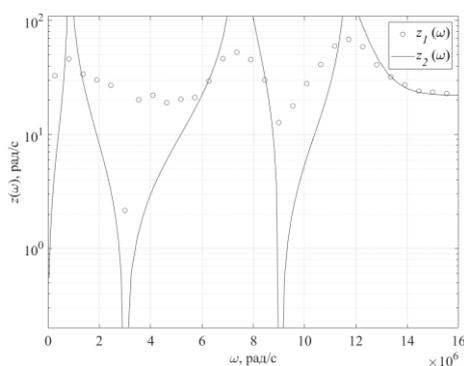


Рисунок 5 – ЧХ ЗУ $z_1(\omega)$ и ЧХ чисто реактивной схемы замещения $z_2(\omega)$

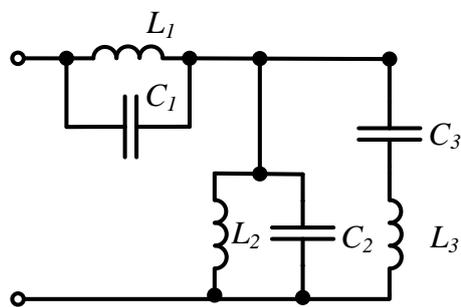


Рисунок 6 – Чисто реактивная схема, соответствующая ЧХ $z_2(\omega)$ на рисунке 5

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 генетический алгоритм, 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:

$$f_{\text{fitness}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_k^N \left| \frac{z_1(\omega_k) - z_2(\omega_k)}{z_1(\omega_k)} \right|^2},$$

где N – количество рассматриваемых точек ЧХ, $z_1(\omega_k)$ – экспериментальная ЧХ, $z_2(\omega_k)$ – ЧХ схемы замещения.

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: на основании известных резонансных частот получены зависимости параметров реактивных элементов между собой; при решении задачи параметрического синтеза определяются номиналы активных сопротивлений и одного реактивного элемента. Таким образом, 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:

$$\frac{-j(C_3L_1L_2L_3(C_1 + C_2)\omega^4 + (((-L_1 - L_3)C_3 - L_1(C_1 + C_2))L_2 - C_3L_1L_3)\omega^2 + L_1 + L_2)\omega}{(1 + \omega^4C_2C_3L_2L_3 + ((-C_2 - C_3)L_2 - C_3L_3)\omega^2)(\omega^2C_1L_1 - 1)}.$$

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.

Обозначим $\alpha = \omega^2$, тогда приведенное квадратное уравнение числителя будет выглядеть:

$$\alpha^2 + \frac{(-C_1L_1L_2 - C_2L_1L_2 - C_3L_1L_2 - C_3L_1L_3 - C_3L_2L_3)\alpha}{C_1C_3L_1L_2L_3 + C_2C_3L_1L_2L_3} + \frac{L_1 + L_2}{C_1C_3L_1L_2L_3 + C_2C_3L_1L_2L_3} = 0.$$

Один из корней знаменателя $\omega_{1/2/3\text{пар}}$ находится из решения уравнения:

$$\omega_{1/2/3\text{пар}}^2 L_1 C_1 - 1 = 0.$$

Определив резонансную частоту $\omega_{1/2/3\text{пар}}$ из полученной ЧХ, представленной на рисунке 5, один из пары параметров L_1 , C_1 можно найти с помощью выражений:

$$L_1 = \sqrt{\frac{1}{\omega_{1/2/3\text{пар}}^2 C_1}} \quad \text{или} \quad C_1 = \sqrt{\frac{1}{\omega_{1/2/3\text{пар}}^2 L_1}}.$$

Два других корня можно найти, решив следующее уравнение:

$$\alpha^2 + \frac{(-L_2 C_2 - L_2 C_3 - C_3 L_3) \alpha}{L_2 L_3 C_3 C_2} + \frac{1}{C_2 C_3 L_2 L_3} = 0.$$

Введем следующие обозначения:

$$S_1 = -\frac{-L_2 C_2 - L_2 C_3 - C_3 L_3}{L_2 L_3 C_3 C_2}, \quad P_1 = \frac{1}{C_2 C_3 L_2 L_3},$$

$$S_2 = -\frac{-C_1 L_1 L_2 - C_2 L_1 L_2 - C_3 L_1 L_2 - C_3 L_1 L_3 - C_3 L_2 L_3}{C_1 C_3 L_1 L_2 L_3 + C_2 C_3 L_1 L_2 L_3}, \quad P_2 = \frac{L_1 + L_2}{C_1 C_3 L_1 L_2 L_3 + C_2 C_3 L_1 L_2 L_3}.$$

Оставшихся два корня знаменателя и два корня числителя можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha^2 + \alpha \cdot (-S_2) + P_2 = 0; \\ \alpha^2 + \alpha \cdot (-S_1) + P_1 = 0. \end{cases}$$

Согласно формулам Виета, корни уравнений связаны с коэффициентами многочленов следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 = S_2; & \alpha_3 + \alpha_4 = S_1; \\ \alpha_1 \alpha_2 = P_2. & \alpha_3 \alpha_4 = P_1. \end{cases}$$

Так как $\alpha_1 = \omega_{1\text{посл}}^2$, $\alpha_2 = \omega_{2\text{посл}}^2$, $\alpha_3 = \omega_{1/2/3\text{пар}}^2$, $\alpha_4 = \omega_{1/2/3\text{пар}}^2$, то рассматриваемая система уравнений допускает аналитическое решение:

$$C_2 = \frac{-B_3 C_1^2 L_1^2 + A_3 C_1 L_1 - 1}{(-C_1 (B_2 - B_3) L_1 + A_2 - A_3) L_1},$$

$$C_3 = \left(-B_3 C_1^2 L_1^2 + A_3 C_1 L_1 - 1 \right) \left(B_2^2 + (-A_2 A_3 + A_3^2 - 2B_3) B_2 + B_3 (B_3 + A_2 (A_2 - A_3)) \right) \times$$

$$\left(-B_2 C_1^2 L_1^2 + A_2 C_1 L_1 - 1 \right) / \left(\left(C_1 (A_2 B_3 - A_3 B_2) L_1 + B_2 - B_3 \right)^2 \times \right.$$

$$\left. \times (-C_1 (B_2 - B_3) L_1 + A_2 - A_3) L_1 \right),$$

$$L_2 = \frac{(C_1 (A_2 B_3 - A_3 B_2) L_1 + B_2 - B_3) L_1}{(-B_3 C_1^2 L_1^2 + A_3 C_1 L_1 - 1) B_2},$$

$$L_3 = (C_1(A_2B_3 - A_3B_2)L_1 + B_2 - B_3)(-C_1(B_2 - B_3)L_1 + A_2 - A_3)^2 L_1 / ((-B_3C_1^2L_1^2 + A_3C_1L_1 - 1) \times (B_2^2 + (-A_2A_3 + A_3^2 - 2B_3)B_2 + B_3(B_3 + A_2(A_2 - A_3))))(-B_2C_1^2L_1^2 + A_2C_1L_1 - 1).$$

Таким образом, зная резонансные частоты из ЧХ исследуемого объекта и задав значение одного реактивного параметра, можно рассчитать все остальные L и C 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 11 до 6.

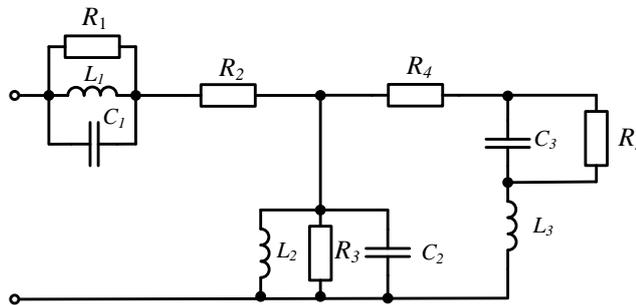


Рисунок 7 – Схема замещения ЗУ

ЧХ полученных схем замещения представлены на рисунке 8. Как видно, ЧХ полученной схемы замещения соответствует виду экспериментальной ЧХ. Несмотря на гораздо большее время работы программы без использования аналитических выкладок и численно лучшему полученному значению целевой функции, ЧХ полученной схемы замещения значительно хуже соответствует экспериментальной ЧХ. Это объясняется особенностями целевой функции. Лучшего результата можно добиться с использованием так называемых весовых функций, указывающих алгоритму, какие точки ЧХ представляют большую «ценность». Но использование целевых функций требует анализа каждой отдельной ЧХ, что не представляется возможным для выполнения в полевых условиях.

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 не превышает 15 с для самых сложных схем.

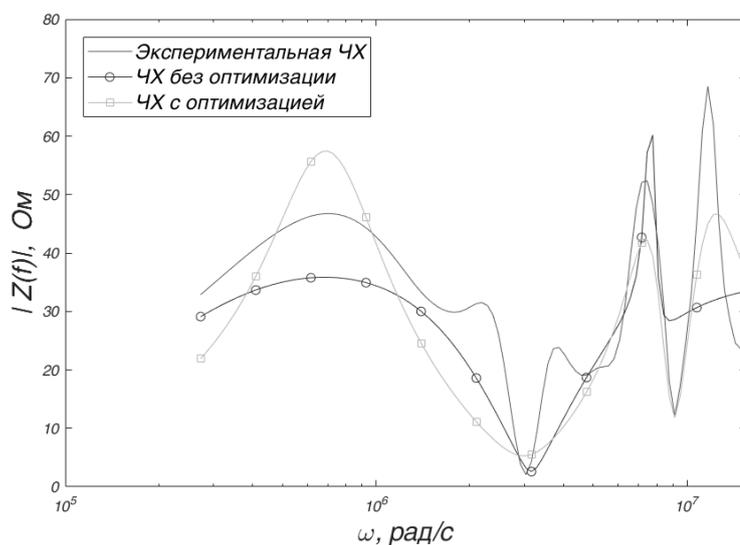


Рисунок 8 – Экспериментальная ЧХ и ЧХ полученных схем замещения

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 .

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

В частном случае, если рассматривать наведенную ЭДС током в бесконечно длинном проводе, расположенным параллельно длинной стороне рамки (рисунок 9), величину магнитной индукции для каждой точки можно рассчитать:

$$\dot{E} = -j\omega I \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{b}{a}, \quad (1)$$

где l – длина линии.

При скрещивающемся расположении проводов (см. рисунок 10) выражение для наведенной ЭДС:

$$\dot{E} = j\omega i \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\operatorname{tg} \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1} \left(a \ln \frac{b}{a} + (b+d) \ln \frac{a+d}{b+d} \right) - (b-a) \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1} \ln \frac{a+d}{b} \right). \quad (2)$$

В настоящей работе принято допущение об идеально проводимой земле. При таком допущении для каждого проводника с током строится его зеркальное изображение.

На рисунке 11 представлена карта участка энергосети. ВЛ 1, на которой осуществляется плавка гололеда, находится вблизи ВЛ 2, 3 и 4. Все ВЛ работают в номинальном режиме. На рисунке 11, б указаны размеры опор 220 кВ, используемых для ВЛ. Все номинальные токи в проводах приняты равными 200 А.

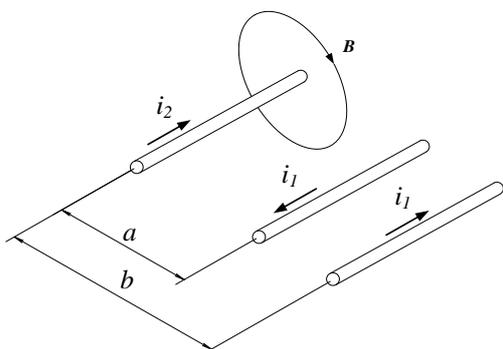


Рисунок 9 – Ток в проводе i_2 наводит ЭДС ε в параллельно расположенной рамке

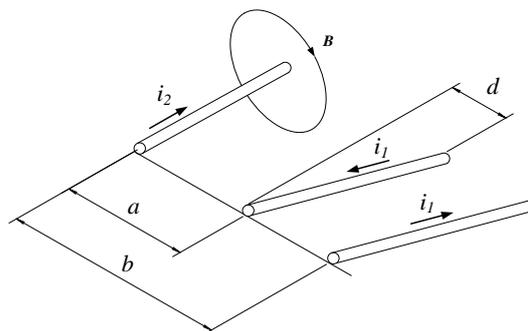


Рисунок 10 – Ток в проводе i_2 наводит ЭДС ε в непараллельно расположенной рамке

Произведем расчет наведенной ЭДС в контурах ГТ1 и ГТ2. контурах плавки при использовании схем «ГТ-земля» и «ГТ1,2-земля». Результаты расчета приведены в таблице 2.

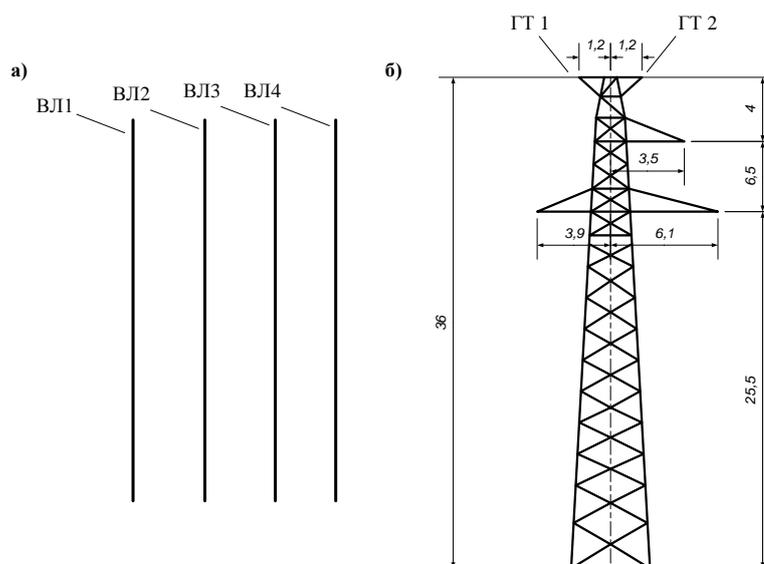


Рисунок 11 – Данные для расчета. а) Карта участка ЛЭП. б) Габаритные размеры опор (в метрах).

Таблица 2 – Наведенные ЭДС

Обозначение	Наведенная ЭДС, В/км
E_1 , ГТ1	89,3
E_2 , ГТ2	93,1

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.

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:

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

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

Заключение

1 Показана актуальность учета влияния электромагнитного излучения на процесс плавки льда на проводах и ГТ ВЛ.

2 Показано, что ток плавки имеет сложный гармонический состав. Полученные оценки теплового потока тока плавки позволяют улучшить существующие утвержденные методики по расчету режима плавки гололеда.

3 Приведены оценки наведенной ЭДС для контуров плавки различной конфигурации. Показано, что наибольшую опасность для работы высоковольтного выпрямителя представляют схемы с использованием земли в качестве обратного провода, когда площадь поверхности контура максимальная.

4 Рассмотрены типовые схемы замещения для всех типов ЗУ. Проведен анализ экстремумов их частотных характеристик и разработаны расчетные выражения, которые, при известных резонансных частотах, позволяют уменьшить число переменных при решении задачи параметрического синтеза.

5 Разработана компьютерная программа, способная в реальном масштабе времени по загруженной экспериментальной частотной характеристике составить схему замещения ЗУ в диапазоне частот до 2,5 МГц.

Аспирант Гончаров Валерий Олегович