

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

**Материалы
XI Всероссийской научно-технической
конференции**

ИТЭЭ–2018

ЧЕБОКСАРЫ 2018

УДК 621.3:681.518(043.2)
И74

Редакционная коллегия:

ректор А.Ю. Александров,
д-р техн. наук, профессор Г.А. Белов,
канд. техн. наук, доцент Н.М. Лазарева

*Печатается по решению Ученого совета
Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова*

Информационные технологии в электротехнике и электро-
И74 энергетике: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф.
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. 512 с.

ISBN 978-5-7677-2686-8

Обсуждаются вопросы информатизации в электротехнике и электроэнергетике, построения систем управления электротехническими объектами, проблемы математического моделирования процессов в электротехнических системах, цифровой обработки сигналов электротехники и радиоэлектроники, информационной безопасности в электроэнергетике, применения информационных технологий в высшем электротехническом и электроэнергетическом образовании.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

ISBN 978-5-7677-2686-8

УДК 621.3:681.518(043.2)
© Издательство
Чувашского университета, 2018

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель оргкомитета:

Александров А.Ю. – ректор ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»

Заместители председателя оргкомитета:

Кадышев Е.Н. – д-р экон. наук, профессор, проректор по научной работе (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Белов Г.А. – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой промышленной электроники (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Члены оргкомитета:

Дмитриков В.В. – д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича)

Потапов А.А. – д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. ред. международного журнала «Нелинейный мир» (Институт радиотехники и электроники РАН)

Евдокимов Ю.К. – д-р техн. наук, профессор (Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева)

Шихин В.А. – канд. техн. наук, доцент (Национальный исследовательский университет «МЭИ»)

Андрянов А.И. – канд. техн. наук, доцент (Брянский государственный технический университет)

Шевелев В.С. – технический директор ООО «Релематика»

Охоткин Г.П. – д-р техн. наук, доцент, декан факультета радиотехники и автоматики (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Семенов Ю.М. – д-р физ.-мат. наук, доцент (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Галанина Н.А. – д-р техн. наук, доцент (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Казенов А.А. – директор ООО «Элтехсистем»

Сергеев А.Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ОАО «ВНИИР»

Лазарева Н.М. – канд. техн. наук, доцент (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Малинин Г.В. – канд. техн. наук, доцент (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Серебрянников А.В. – канд. техн. наук, доцент (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

Литература

1. *Ванин В.К.* Анализ процессов в силовых и измерительных трансформаторах и коррекция их различных приложений / В.К. Ванин, М.Г. Попов // Релейная защита и автоматизация. 2018. №1. – С. 39–45.

2. *Ванин В.К.* Исследование нестационарных режимов работы силовых и измерительных трансформаторов / В.К. Ванин, И.В. Ванин, М.Г. Попов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 250–256.

Н.Г. Иванов, В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов
(Чебоксары, ЧГУ, НПП «ЭКРА»)

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ НАПРЯЖЕНИЯ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ЛЭП В ПАУЗЕ ЦИКЛА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Особенностью автоматического повторного включения (АПВ) длинных ЛЭП сверхвысокого напряжения, оснащенных шунтирующими реакторами (ШР), является возникновение опасных перенапряжений из-за остаточного заряда в неповрежденных фазах [1–2]. Уровень перенапряжений зависит от значения напряжения на контактах выключателя в момент включения. Одним из эффективных методов ограничения перенапряжений является управление моментом включения ЛЭП таким образом, чтобы при коммутации напряжение на контактах выключателя было минимально [1–4]. Поскольку команда включения должна подаваться на выключатель с опережением, равным времени его включения, то система управления должна обладать возможностью измерения и предсказания кривых напряжений со стороны шин системы и со стороны ЛЭП.

Электрическая сеть со стороны шин системы во время паузы АПВ находится в установившемся режиме. Поэтому напряжение системы легко предсказать на основе текущей оценки

комплексной амплитуды, полученной с помощью неадаптивных фильтров ортогональных составляющих [5].

В то же время в отключенной линии происходит колебательный разряд распределенной емкости через индуктивность реактора. Из-за высокой добротности контура разряда процесс затухает медленно, и к моменту повторного включения напряжение со стороны ЛЭП остается значительным. Характерно, что в паузе трехфазного АПВ это напряжение содержит только свободные составляющие переходного процесса, а в паузе однофазного АПВ – еще и принужденную составляющую, вносимую оставшимися в работе фазами [6]. Число составляющих свободного процесса, их частоты ω_i и коэффициенты затухания α_i однозначно определяются корнями p_i характеристического уравнения контура.

Оценим характер свободного процесса в контуре, состоящем из однопроводной ЛЭП с волновым сопротивлением

$$z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + pL_0}{G_0 + pC_0}}, \quad (1)$$

постоянной распространения волны

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + pL_0)(G_0 + pC_0)} \quad (2)$$

и реактора индуктивностью L_p , установленного в начале линии (рис. 1). В выражениях (1) и (2) R_0 , L_0 , G_0 и C_0 – удельные активное сопротивление, индуктивность, активная проводимость и емкость соответственно, l – длина ЛЭП.

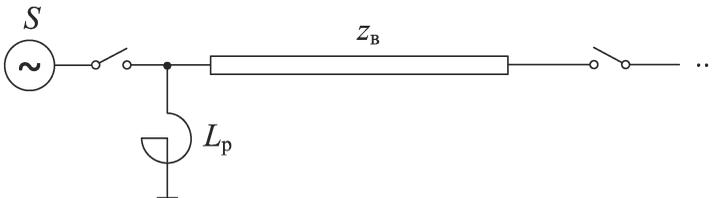


Рис. 1. Расчетная схема сети в паузе АПВ

Несмотря на простой вид характеристического уравнения системы

$$z(p) = pL_p + z_b \operatorname{cth}(\gamma l) = 0, \quad (3)$$

аналитическое определение собственных частот представляет значительной сложности. На практике это уравнение решают в два этапа [7]:

1. Графически находят приближенные значения собственных частот сопротивления $z(j\omega)$ контура, полагая, что его элементы имеют чисто реактивный характер ($R_0 = G_0 = 0$).

2. Определяют коэффициенты затухания и уточняют значения собственных частот при помощи численных методов, используя в качестве начального приближения результаты первого этапа.

Рис. 2 иллюстрирует первый этап расчета для ЛЭП длиной $l = 500$ км с удельными параметрами $R_0 = 0,0796$ Ом/км, $L_0 = 1,925$ мГн/км, $C_0 = 6,27$ нФ/км, оснащенной реактором индуктивностью $L_p = 7,76$ Гн. Для большей наглядности характеристическое уравнение (3) было записано в виде равенства

$$z_b \operatorname{cth}(\gamma l) = -pL_p, \quad (4)$$

а значения собственных частот были определены по точкам пересечения кривой $z_1(f) = z_b \operatorname{cth}(\gamma l)$ и прямой $z_2(f) = -j2\pi fL_p$.

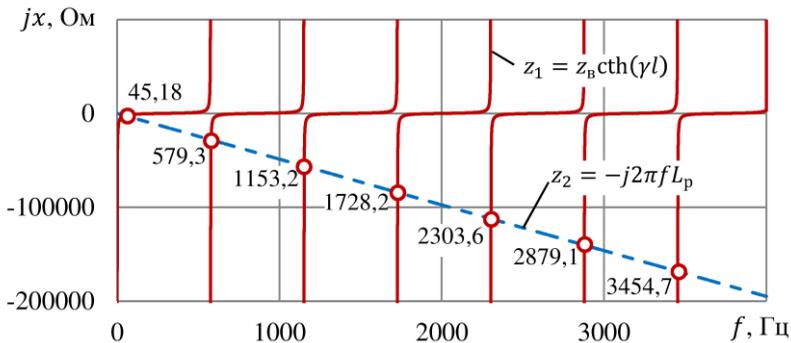


Рис. 2. Графическое решение уравнения (4). Светлыми кружочками отмечены точки, соответствующие решению. Цифры около кружочков обозначают значения частот f

Результаты второго этапа расчета приведены в таблице. Из нее видно, что высокочастотные составляющие свободного процесса быстро затухают, и к моменту повторного включения (для ЛЭП 500 кВ – через $0,35 \div 0,4$ с после отключения [8]) в напряжении остается лишь низкочастотная затухающая составляющая частоты 45,18 Гц.

Результаты второго этапа расчета

№	Частота, Гц	Постоянная времени, с
1	45,18	2,35
2	579,3	0,049
3	1153,2	0,049
4	1728,2	0,048
5	2303,6	0,048
6	2879,1	0,048
7	3454,7	0,048

Собственные частоты свободного процесса, в особенности частота первой составляющей, зависят от степени компенсации зарядной мощности ЛЭП (угол наклона прямой $z_2(f)$ на рис. 2 зависит от величины L_p). Степень компенсации может меняться в процессе работы линии. Поэтому для предсказания напряжения со стороны ЛЭП должны применяться адаптивные алгоритмы, способные во всех режимах распознать структуру сигнала, – алгоритмы адаптивного структурного анализа [9–10].

Таким образом, к моменту повторного включения ЛЭП все высокочастотные свободные составляющие в напряжении линии затухают. Поэтому при определении оптимального момента повторного включения следует учитывать только низкочастотные составляющие.

Лучшим методом прецизионного предсказания кривой напряжения ЛЭП для алгоритма управляемого включения линии является адаптивный структурный анализ.

Литература

1. *Базуткин В.В.* Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. *Бикфорд Дж.П.* Основы теории перенапряжений в электрических сетях: Пер. с англ. / Дж.П. Бикфорд, Н. Мюлине, Дж. Р. Рид. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. *Pilz G.* A algorithm for three-pole controlled auto-reclose of shunt compensated transmission lines with a optimization for the second and third pole / G. Pilz [and other] // CIGRE A3-115 Session. – 2004.
4. *Froehlich K.* Controlled closing on shunt compensated transmission lines. Part 2: Application of closing control device for high-speed autoreclosing on BC Hydro 500 kC transmission lines / K. Froehlich [and other] // IEEE trans. on power deliv. – Vol. 12. – № 2. – 1997.
5. *Антонов В.И.* Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов, А.В. Солдатов, А.И. Фомин // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1. – С. 16–25.
6. *Беляков Н.Н.* Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / Н.Н. Беляков [и др.]; под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. *Лосев С.В.* Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности / С.В. Лосев, А.Б. Чернин. – М.: Энергия, 1972.
8. *Барзам А.Б.* Системная автоматика. 4-е изд., перераб. и доп. / А.Б. Барзам. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. *Антонов В.И.* Структурный анализ входных сигналов цифровых систем релейной защиты и противоаварийной автоматики / В.И. Антонов // Электротехника. – 1995. – № 6. – С. 56–61.
10. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной энергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ.....242

*Ванин В.К., Ванин И.В., Попов М.Г., Сиренко Н.В.,
Хабаров А.А.* Расширение функциональных возможностей,
улучшение метрологических характеристик измерительных
трансформаторов тока и напряжения, обеспечение
их информационной и физической безопасности
в процессе эксплуатации242

Иванов Н.Г., Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В.
Анализ структуры напряжения компенсированной ЛЭП
в паузе цикла автоматического повторного включения249

*Александрова М.И., Антонов В.И., Наумов В.А.,
Петров В.С.* Основы выбора уставок автоматической
ликвидации асинхронного режима в многосвязных
электрических сетях254

Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н. Критерий
селективности релейной защиты энергообъекта258

Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н.
Разграничение режимов энергообъекта в ходе
их регистрации и идентификации263

Смирнова И.В., Абрамов Д.А., Белянин А.А. Применение
метода локализации в условиях насыщения
измерительных трансформаторов266

Кочетов И.Д., Мартынов М.В. Абсолютная
нераспознаваемость как критерий блокировки защиты270

Никонов И.Ю. Способ защиты дальнего резервирования ...274

Атншишкин А.Б., Петров С.Г., Терентьев Г.В. Проверка
цепей дифференциальной защиты трансформатора277

Лукина К.В., Таныгин С.А., Широкин М.Ю. Влияние
способов компенсации на содержание второй гармоники
в дифференциальном токе279

Петрушин Д.Е., Попов М.Г. Повышение
эффективности системных средств противоаварийного
управления энергосистем Мурманской области
и республики Карелия283