

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ 6 (10) кВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ С УЧЁТОМ РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

**А.В. Коржов**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Рассматриваются результаты экспериментального исследования по оценке изменения параметров частичных разрядов на действующих кабельных линиях 6 (10) кВ с бумажной пропитанной изоляцией. Представлены примеры вариации параметров частичных разрядов и диаграмм распределения частичных разрядов по фазе и амплитуде с учётом климатических условий и режимов работы кабельной линии с бумажной пропитанной изоляцией. Рассмотрены вопросы математического моделирования эквивалентных схем замещения диэлектрика по оценке параметров частичных разрядов в изоляции кабельных линий 6 (10) кВ с учётом режимов работы в условиях городских электрических сетей. Разработана виртуальная имитационная модель, на основе схем замещения изоляции, для оценки изменения параметров частичных разрядов при влиянии дефектов в диэлектрике друг на друга с учётом ранее установленных экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* кабель, изоляция, частичные разряды, схема замещения.

## **Введение**

Под действием приложенного напряжения в ослабленных местах изоляции (в газовых включениях) или в местах резкого усиления ЭП, в кабельных линиях 6 (10) кВ (КЛ), особенно с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ), могут наблюдаться частичные разряды (ЧР), приводящие к росту дендритов и последующему пробое изоляции. В настоящее время теория роста дендритов в изоляции КЛ под действием ЧР в полном объёме не разработана и считается, что она имеет сложный стохастический характер [1–6]. Причиной этого является комплекс взаимосвязанных физико-химических задач, показывающих необходимость изучения зависимостей характеристик ЧР от различных эксплуатационных факторов.

Как правило, математическое моделирование ЧР в изоляции проводят, используя эквивалентную схему замещения диэлектрика с набором ёмкостей [3–6]. Минимально необходимы три ёмкости: ёмкость, замещающая целый участок изоляции, ёмкость включения и ёмкость, эквивалентирующая объём диэлектрика между воздушным включением и электродом. Однако в настоящее время зарубежные исследователи справедливо отмечают [5, 6], что необходима корректировка данной классической схемы замещения изоляции при ЧР, которая известна как ёмкостная модель, разработанная Gemant и Philippoff в 1932 г. Кроме того, указывается, что существует значительное отставание в разработке виртуальных математических моделей по оценке параметров ЧР, по сравнению с разработкой приборов для их диагностики, что затрудняет трактовку получаемых диагностических данных на практике.

Таким образом, необходимо продолжить исследования по оценке параметров ЧР на дейст-

вующих КЛ с учётом их режимов работы и разработке виртуальных моделей для верификации получаемых данных.

Целью данной работы была поставлена задача оценки вариации параметров ЧР на действующих КЛ и разработка виртуальной модели на основе схем замещения с применением пакета MATLAB Simulink (лицензионный пакет ЮУрГУ (НИУ), <http://supercomputer.susu.ac.ru>).

## **Методика экспериментальных исследований на действующих КЛ**

Оценка изменения параметров ЧР на действующих КЛ производилась в режиме мониторинга до нескольких суток в зависимости от режимов работы КЛ, величины нагрузки, по схеме рис. 1. В качестве объекта исследования с 2009 по 2013 г. были выбраны 9 КЛ (предприятия МУП НМПЭС, г. Нефтекамск) длиной от 330 до 2770 м разных типов: ААШв 3×120 мм<sup>2</sup>; 3×150 мм<sup>2</sup>; 3×185 мм<sup>2</sup>; АСБ 3×120 мм<sup>2</sup>; ААБл 3×50 мм<sup>2</sup>; 3×150 мм<sup>2</sup>. Применялось диагностирующее устройство R-400 и калибровочный генератор GKI-2 (ООО «Димрус», г. Пермь), лаборатория ЛВИ-1М и мост P-5026. Анализировались следующие параметры ЧР: амплитуда (Q02, мВ); интенсивность (PDI), мВт; количество импульсов.

На рис. 2 представлен пример изменения параметров ЧР при изменении климатических условий и режима работы на примере двух из обследуемых КЛ.

Проведённые экспериментальные исследования изменения параметров ЧР с учётом режимов работы действующих КЛ в условиях городской распределительной сети показали, что в процессе замеров параметров ЧР могут наблюдаться флуктуации их параметров. Данные изменения в преде-



Рис. 1. Экспериментальные исследования в ячейке ввода КЛ в ТП: 1 – КЛ; 2 – устройство по оценке параметров ЧР; 3 – заземляющий проводник КЛ; 4 – высокочастотный датчик ЧР RFCT-5

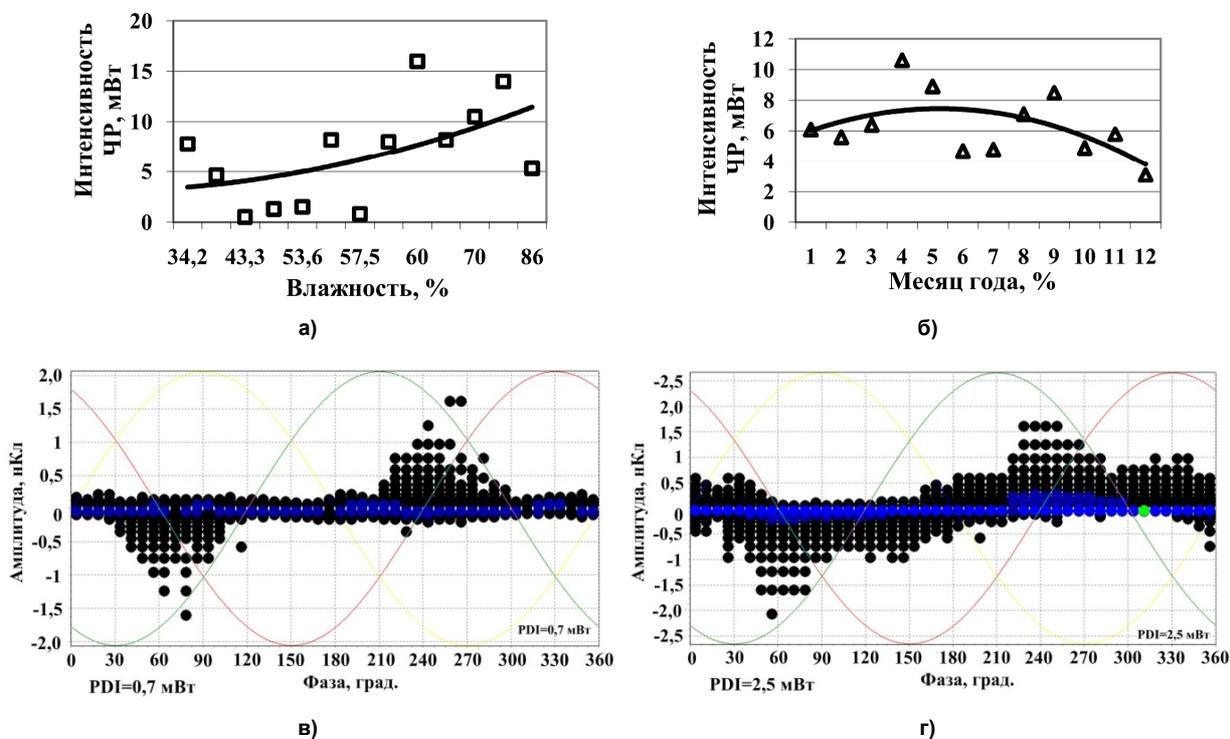


Рис. 2. Оценка изменения параметров ЧР в процессе эксплуатации действующих КЛ: а, б – от метеорологических параметров; в, г – диаграммы распределения ЧР по фазе и амплитуде: в – КЛ под напряжением, без нагрузки; г – КЛ под нагрузкой 50 А

лах небольшого промежутка времени, как правило, группируются вокруг некоторого среднего значения, а вот в процессе старения изоляции интенсивность ЧР может изменяться в разы в сторону роста.

В результате исследований было установлено, что на значимое изменение параметров ЧР в изоляции КЛ с БПИ оказывают влияние:

1) грунтово-климатические параметры (особенно увлажнение почвы), вероятное слабое место – это выполненные муфты и имеющиеся дефекты защитных покровов КЛ;

- 2) испытания КЛ повышенным выпрямленным напряжением;
- 3) режим однофазного замыкания на землю;
- 4) режимы коротких замыканий в кабельной сети;
- 5) изменение характера токовой нагрузки КЛ.

### Математическое моделирование ЧР в изоляции

Согласно ГОСТ 23436–83 для изоляции силовых кабелей до 10 кВ применяют однослойную кабельную бумагу марок К-080, К-120, К-170

(толщиной 80, 120 и 170 мкм соответственно). Известно, что наиболее распространённая обмотка жил кабеля с многослойной БПИ выполняется с отрицательным перекрытием (с зазором в пределах 0,5–2 мм), перекрытие составляет 30–35 % от шага намотки рис. 3, в. Поры и зазоры заполняются в процессе сушки и пропитки пропитывающим составом. Повторные циклы нагрева охлаждения кабеля (тепловое дыхание) приводят к перемещению как пропиточного состава, так и воздушных включений (ВВ). Поэтому наибольший интерес представляют усложнённые схемы для оценки взаимного влияния ВВ друг на друга. Так, например, ранее нами было установлено вероятное продольное науглероживание слоёв БПИ, рис. 3, б. Данное обугливание приводит к появлению тангенциальной составляющей ЭП в слоях БПИ, а как следствие – к росту вероятности пробоя в слабом месте БПИ кабеля. Поставим задачу провести оценку данного факта.

Воздушные включения в БПИ КЛ могут располагаться случайным образом. Рассмотрим элементарный участок БПИ (диэлектрика), рис. 3, в. Выделенный участок включает два газовых (воздушных) включения (толщина  $d_{ВВ} = 120$  мкм). На рис. 3, г представлена эквивалентная схема замещения рис. 3, в, в качестве допущения, проведена по формуле для плоского конденсатора. Согласно справочным данным диэлектрическая проницаемость масла принята 2,2, а пропитанной бумаги 3,5. Толщина БПИ кабеля от жилы к оболочке принята  $d_{БПИ} = 5,75$  мм, при этом воздушные включения находятся посередине и вытянуты вдоль зазора с размерами: ширина 2 мм и длина 2 мм;

ёмкости приняты  $C_{ВВ1} = C_{ВВ2} = 2,95 \cdot 10^{-13}$  Ф. Ёмкости, эквивалентирующие объём диэлектрика между воздушным включением и электродом, приняты  $C_{БПИ} = 4,401 \cdot 10^{-14}$  Ф. Ёмкость, замещающая целый участок изоляции принята, согласно справочным данным,  $C_{И} = 2,13 \cdot 10^{-8}$  Ф (согласно [7] погонное значение ёмкости жилы относительно оболочки равно 0,213 мкФ/км). Ёмкости, замещающие объёмы диэлектрика и эквивалентирующие продольные связи между двумя ВВ, согласно схеме на рис. 3, г, приняты:  $C_{12} = C_{21} = 1,74 \cdot 10^{-13}$  Ф.

Анализ процессов, происходящих при ЧР на примере рассматриваемой схемы, проведём как процессы коммутации с учётом замыкания ключа, указанного на рис. 3, г, шунтирующего ёмкость  $C_{ВВ2}$ . При этом во многих случаях важно увидеть влияние разряда на ток, протекающий через ёмкость другого включения, а также напряжения на ней. Для реализации вычислений необходимо рассмотреть переходный процесс, протекающий в данной схеме при замыкании ключа.

Решение задачи можно рассмотреть по следующему алгоритму (расчёт проведён на примере ранее приведённых данных):

1. Проводится анализ докоммутационного установившегося режима, при этом схема замещения преобразуется к виду рис. 3, д. После преобразования напряжение на ёмкости ВВ2 как функция от времени примет вид:

$$u_{СВВ2}(t) = U_m \sin(\omega t + \psi) \approx 582 \sin(\omega t - 33). \quad (1)$$

2. Определяется время возникновения первого ЧР ( $t_1 = 4,8 \cdot 10^{-3}$ ) по условию достижения напря-

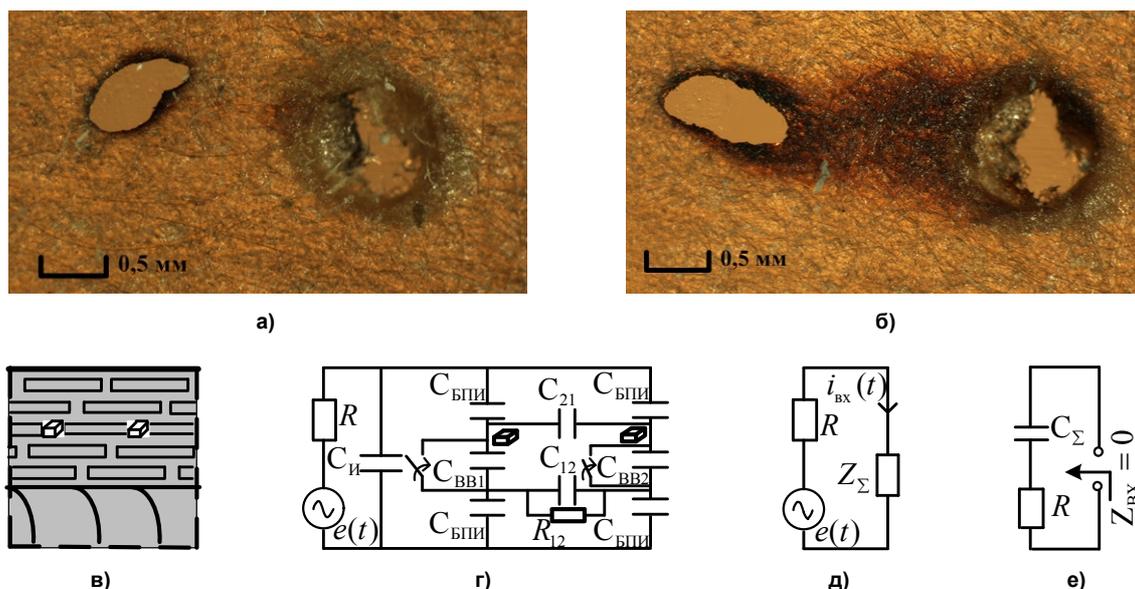


Рис. 3. Оценка параметров ЧР в бумажной пропитанной изоляции: а – пробой при воздействии электрического поля; б – эффект проявления пробоя по поверхности при воздействии электромагнитного поля (наблюдается эффект продольного обугливания слоя БПИ); в – участок БПИ кабеля; г – схема замещения участка БПИ с двумя ВВ; д – эквивалентная схема замещения; е – схема для оценки постоянной времени затухания

жения на ВВ, равным напряжению зажигания ЧР  $u_{\text{ЧР}}^{\text{B}} = 467 \text{ В}$  (независимые начальные условия):

$$u_{C+}(4,8 \cdot 10^{-3}) = u_{C-}(4,8 \cdot 10^{-3}) = 582 \sin\left(314 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} - 33 \frac{\pi}{180}\right) \approx 467 \text{ В.} \quad (2)$$

3. Проводится анализ послекоммутационного установившегося режима при закороченной ёмко-

сти ВВ, при этом в идеальном случае во время разряда напряжение на ёмкости стремится к нулю:

$$u_C^{\text{np}}(t) = 0. \quad (3)$$

4. Определяется постоянная времени затухания переходного процесса (рис. 3, е):

$$\tau = -\frac{1}{p} = RC_{\Sigma} = 90 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8} \approx 0,0019. \quad (4)$$

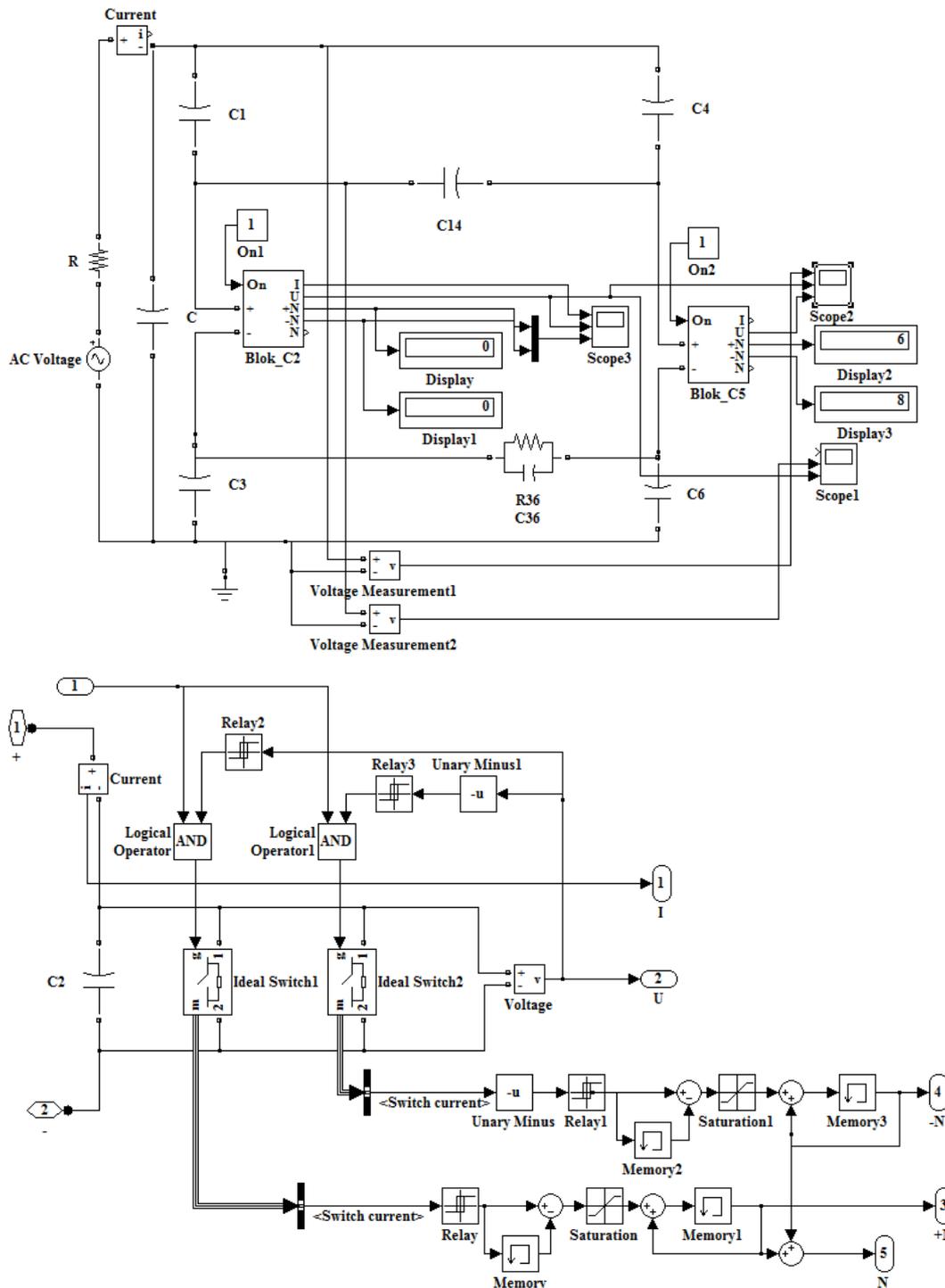


Рис. 4. Виртуальная имитационная модель для оценки изменения параметров ЧР с учётом распределенного дефекта

5. Оцениваются полные значения напряжения и тока как сумма из принуждённой и свободной составляющих:

$$u_{\text{Сдок}}(4,8 \cdot 10^{-3}) = u_{\text{С}}^{\text{пр}}(4,8 \cdot 10^{-3}) + u_{\text{С}}^{\text{св}}(4,8 \cdot 10^{-3}), \quad (5)$$

где  $u_{\text{С}}^{\text{св}} = Ae^{pt}$  – свободная составляющая, которая является решением однородного дифференциального уравнения.

Свободную составляющую определяют, используя коммутационный закон для ёмкости:

$$582 \sin\left(\omega \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} - 33 \frac{\pi}{180}\right) = 0 + Ae^{p \cdot 4,8 \cdot 10^{-3}}. \quad (6)$$

Свободная составляющая после решения уравнения (6) относительно коэффициента  $A$  примет вид:

$$u_{\text{С}}^{\text{св}}(t) = 5,71 \cdot 10^3 e^{-522 \cdot t}. \quad (7)$$

6. Далее оценивается длительность ЧР ( $t_1 - t_2$ ), определяемое снижением напряжения на ВВ, равным напряжению погасания ЧР (в примере принято  $u_{\text{ЧР}}^{\text{п}} = 370 \text{ В}$ ).

$$t_2 = \frac{\ln\left(\frac{u_{\text{ЧР}}^{\text{п}}}{A}\right)}{p} = \frac{\ln\left(\frac{370}{5,71 \cdot 10^3}\right)}{-522} = 5,25 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

7. Расчёт последующих ЧР проводится по аналогии согласно пунктам 1–6.

Следует отметить, что подобные аналитиче-

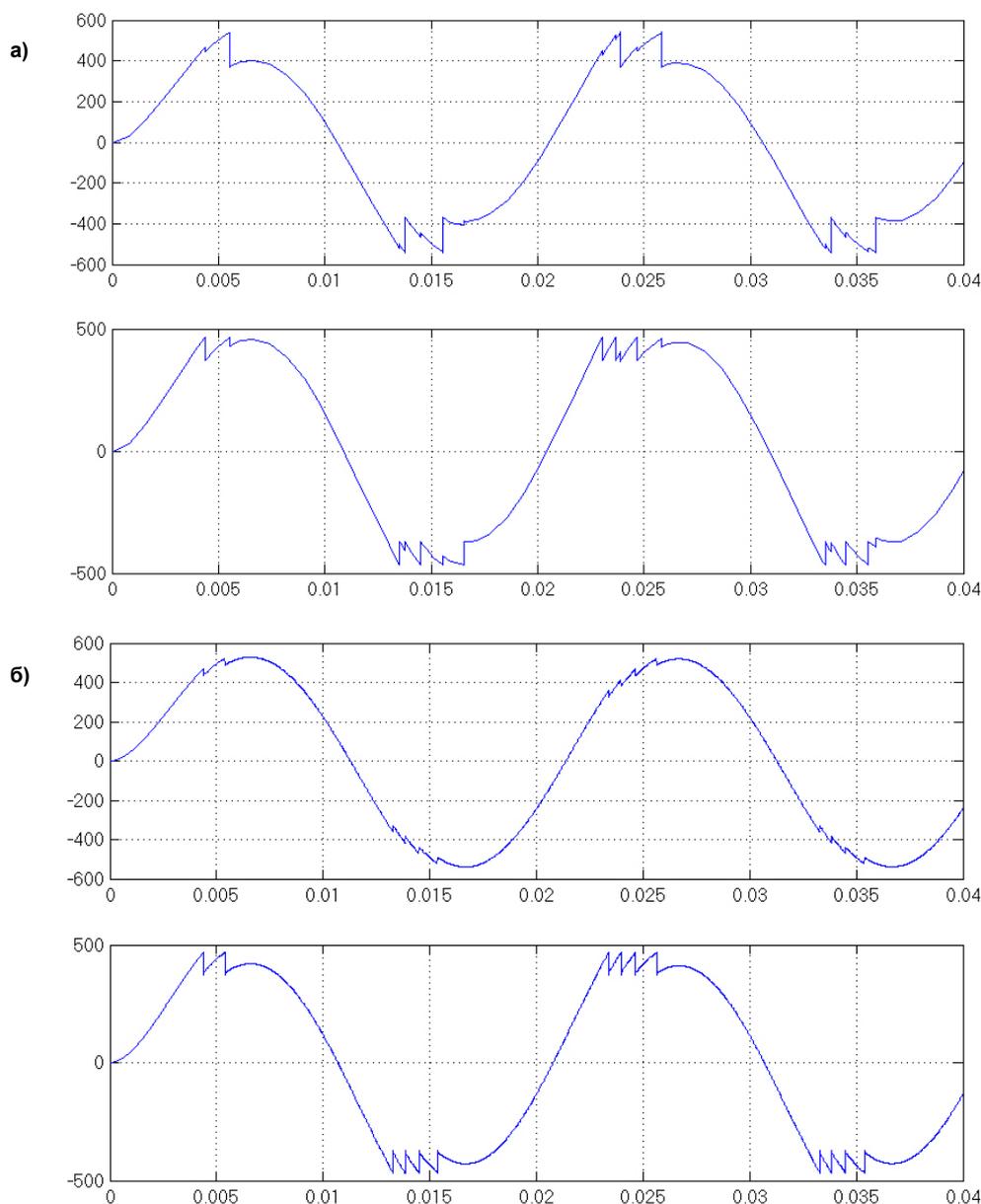


Рис. 5. Пример осциллограмм напряжения при ЧР на двух воздушных включениях: а – без учёта науглероживания слоя БПИ; б – опыт с шунтированием

ские расчёты при анализе переходных процессов в сложных схемах с наличием нескольких ВВ значительно усложняются, поэтому для автоматизации расчётов и оценке зависимостей влияния дефектов друг на друга возникает необходимость разработки виртуальной имитационной модели распределённых схем замещения, например, в комплексе MATLAB Simulink. Следует отметить, что к подобному моделированию прибегают как отечественные, так и зарубежные учёные [5, 6]. В данном пакете была разработана программа по анализу параметров ЧР в изоляции на основе схем замещения с учётом режимов работы кабеля 6 (10) кВ в городской электрической сети (зарегистрирована в Роспатенте [8]). В качестве примера на рис. 4 представлена виртуальная модель расчёта ранее рассмотренной схемы распределённого дефекта с двумя воздушными включениями.

На разработанной модели проанализирован случай с оценкой взаимного влияния двух ВВ при науглероживании слоя БПИ (факт ранее установлен [1]), согласно схеме на рис. 3, б. При этом принято, что в ВВ № 2 ЧР возникают при напряжении  $u_{\text{ЧР}2}^{\text{В}} = 467 \text{ В}$  (при давлении 0,1 МПа, напряжённость пробоя составляет 3,9 кВ/мм [9]), а напряжение погасания ЧР  $u_{\text{ЧР}2}^{\text{П}} = 370 \text{ В}$  (известно, что данное напряжение в соответствии [3] может быть в пределах  $u_{\text{ЧР}}^{\text{П}} \approx (0,1 \div 0,9)u_{\text{ЧР}}^{\text{В}}$ ). Напряжение возникновения ЧР в ВВ № 1 примем  $u_{\text{ЧР}1}^{\text{В}} = 540 \text{ В}$ , а напряжение погасания ЧР  $u_{\text{ЧР}1}^{\text{П}} = 370 \text{ В}$ . Данные эксперимента приведены на рис. 5.

Анализ схемы с двумя ВВ показал следующие результаты по количеству разрядов за два периода: в первом случае без шунтирования продольной связи С36 – 7 шт. в ВВ1 и 10 шт. в ВВ2; во втором случае с шунтированием активным сопротивлением меньшим на несколько порядков ёмкостного сопротивления С36 – 0 шт. в ВВ1 и 14 шт. в ВВ2. Таким образом, можно констатировать, что рассматривая случай с науглероживанием слоёв БПИ (согласно рис. 3, б) разряды в первом воздушном включении прекращаются, а во втором воздушном включении интенсивность разрядов возрастает в 1,4 раза, при рассмотренных условиях в данном примере.

Разработанная виртуальная модель позволяет анализировать случай с различным соотношением между параметрами изоляции и газовыми включениями в нём.

### Заключение

1. Проведённые экспериментальные исследования на действующих КЛ показали значительные вариации параметров ЧР в процессе их эксплуатации. Данный факт указывает на необходимость

оценки параметров ЧР в изоляции КЛ в зависимости от режимов работы с формированием динамической базы данных на каждую КЛ для корректной оценки диагностических данных.

2. Разработана компьютерная имитационная модель на основе схем замещения изоляции кабелей с учётом воздушных включений, позволяющая оценивать изменения количества частичных разрядов с анализом влияния дефектов друг на друга. Модель может быть использована так же для оценки затухания ЧР с учётом распределённой схемы замещения по длине кабельной линии.

### Литература

1. Коржов, А.В. Влияние электрического и магнитного полей силовых кабельных линий напряжением 6 (10) кВ на интенсивность частичных разрядов в изоляции при различных режимах эксплуатации / А.В. Коржов // *Кабели и Провода*. – 2012. – № 1 (332). – С. 16–21.
2. Исмаилов, Ф.Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф.Р. Исмаилов, Д.В. Максудов // *Вестник УГАТУ: УГАТУ*, 2011. – Т. 15, № 3 (43). – С. 98–100.
3. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
4. Дмитриевский, В.С. Расчёт и конструирование электрической изоляции: учеб. пособие для вузов / В.С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
5. Arief, Y.Z. Modeling of partial discharge mechanisms in solid dielectric material / Y.Z. Arief, W.A. Izzati, Z. Adzis // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. – 2012. – Vol. 1. – P. 315–320.
6. Kartalović, N. An advanced model of partial discharge in electrical insulation / N. Kartalović, D. Kovačević, S. Milosavljević // *Electric Energy*. – 2011. – Vol. 24. – P. 41–55. DOI: 10.2298/FUEE1101041K
7. Макаров, Е.В. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2004. – Т. 3. – 688 с.
8. Свидетельство Роспатента № 2014617526 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование частичных разрядов в изоляции на основе схем замещения с учётом режимов работы кабеля 6 (10) кВ в городской электрической сети «PD\_KL\_1» / А.В. Коржов. – Заявка № 2014615278 от 03.06.2014 г.; зарегистр. 25.7.2014 г.
9. Основы кабельной техники: учеб. для студентов высших учеб. заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешиков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешикова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

Коржов Антон Вениаминович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ABK1978@mail.ru.

Поступила в редакцию 10 июня 2015 г.

---

DOI: 10.14529/power150405

### MODELING EQUIVALENT CIRCUIT CABLE INSULATION 6 (10) kV FOR THE EVALUATION OF PARTIAL DISCHARGES TAKING INTO ACCOUNT MODE OF OPERATION IN THE DISTRIBUTION NETWORK

A.V. Korzhov, ABK1978@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the article the results of experimental studies to assess changes in the parameters of partial discharges at the existing cable lines 6 (10) kV with impregnated paper insulation. Examples of variations of the parameters partial discharges distribution diagrams of partial discharges in phase and amplitude taking into account climatic conditions and modes of operation of the cable line with impregnated paper insulation. The questions of mathematical modeling equivalent circuits of the dielectric parameters of the evaluation of partial discharges in the insulation of cable lines 6 (10) kV in view modes in a city electric networks. Developed a virtual simulation model, based on the equivalent circuit isolation, to assess changes in the parameters of partial discharges under the influence of defects in the dielectric on each other with the previously established experimental data.

*Keywords: cable, insulation, partial discharges, equivalent circuit.*

#### References

1. Korzhov A.V. [The Influence of Electric and Magnetic Fields of Power Cable Lines with Voltage of 6 (10) kV on the Intensity of Partial Discharges in Insulation at Various Modes of Operation]. *Kabeli i provoda* [Cables and Wires], 2012, no. 1, pp. 16–21. (in Russ.)
2. Ismagilov F.R., Maksudov D.V. [Mathematical Modeling of the Development of Partial Discharges in the Aging Process of the Dielectric]. *Vestnik UGATU* [Proceedings of UGATU], 2011, vol. 15, no. 3, pp. 98–100. (in Russ.)
3. Kuchinskiy G.S. *Chastichnyye razryady v vysokovoltnykh konstruksiyakh* [Partial Discharges in High Voltage Designs]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
4. Dmitrievskiy V.S. *Raschet i konstruirovaniye elektricheskoy izolyatsii* [Calculation and Design of Electrical Insulation: Textbook for Universities]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 392 p.
5. Arief Y.Z., Izzati W.A., Adzis Z. Modeling of Partial Discharge Mechanisms in Solid Dielectric Material. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2012, vol. 1, pp. 315–320.
6. Kartalović N., Kovačević D., Milosavljević S. An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation. *Electric Energy*, 2011, vol. 24, pp. 41–55. DOI: 10.2298/FUEE1101041K
7. Makarov E.F., Goryunov I.T. (Ed.), Lyubimov A.A. (Ed.) *Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV* [Handbook of Electrical Networks 0,4–35 kV and 110–1150 kV]. Moscow, Papirus Pro Publ., 2004. 688 p.
8. Korzhov A.V. *Modelirovanie chastichnykh razryadov v izolyatsii na osnove skhem zameshcheniya s uchetyom rezhimov raboty kabelya 6 (10) kV v gorodskoy ehlektricheskoy seti “PD\_KL\_1”*. [Simulation of Partial Discharges in Insulation on the Basis of Circuits with Regard to the Modes of the Cable 6 (10) kV in City Electric Networks “PD\_KL\_1”]. *Svidetelstvo Rospatenta № 2014617526 o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM* [Certificate of Rospatent No. 2014617526 on the State Registration of the Computer Program], 2014, Application No. 2014615278 from 03.06.2014; reg. 25.07.2014.

9. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodnyy S.D. *Osnovy kabelnoy tekhniki: uchebnik dlya stud. vysshikh uchebnykh zavedeniy* [The Basics of Cable Technology: Textbook for Stud. Higher Education Institutions]. Moscow, Academiya Publ., 2006. 432 p.

Received 10 June 2015

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Коржов, А.В. Моделирование схем замещения изоляции кабелей 6(10) кВ для оценки частичных разрядов с учётом режимов их работы в распределительной сети / А.В. Коржов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 32–39. DOI: 10.14529/power150405

**FOR CITATION**

Korzhov A.V. Modeling Equivalent Circuit Cable Insulation 6(10) kV for the Evaluation of Partial Discharges Taking into Account Mode of Operation in the Distribution Network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 32–39. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150405

---