

допустимым по условиям нагрева. При уменьшении нагрузки воздушной линии избыточная мощность конденсаторов поперечной ёмкостной компенсации будет обеспечивать компенсацию реактивной мощности нагрузки. Компенсированные воздушные линии могут служить одним из средств повышения коэффициента мощности в распределительных сетях с высоким уровнем потребления реактивной мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Приложение 1 к решению Совета директоров ПАО «Россети» (протокол заседания от 02.04.2021 №450). — М., 2021. — 223 с. <https://bit.ly/3Cuv6rN>.
2. Ефимов Е. Н., Тимашова Л. В., Ясинская Н. В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110 – 750 кВ // Энергия единой сети. Декабрь 2012 – январь 2013. № 5. С. 33 – 41.
3. Зуев Э. Н. Взгляд на проблемы передачи электроэнергии // ЭЛЕКТРО. 2005. № 2. С. 2 – 8.
4. Алексеев Б. А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок // ЭЛЕКТРО. 2009. № 3. С. 45 – 50.
5. Шакарян Ю. Г. Эффективность передачи электрической энергии при применении компактных управляемых ВЛ / Ю. Г. Шакарян, Л. В. Тимашова, С. Н. Каррева, В. Н. Постолатий // Энергия единой сети. 2014. № 3(14). С. 5 – 15.
6. Полещук С. И. Повышение пропускной способности ВЛ 110 кВ // Энергия единой сети. 2016. № 5(28). С. 23 – 34.
7. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии. 2-е изд. — Ростов н/Д.: Феникс, 2008. — 715 с.
8. Щербаков В. К. Настроенные электропередачи / В. К. Щербаков, Э. С. Лукатшов, О. В. Ольшевский, А. Т. Путилова. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. — 274 с.
9. Некленаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие. 5-е изд., стер. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 608 с.
10. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 3. В 2-х кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. 7-е изд., испр. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 880 с.
11. Александров Г. Н. Передача электрической энергии переменным током. —
12. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1977. — 224 с.
13. Хренников А. Ю., Точилкин В. Г. Эксплуатация релейной защиты и автоматики. — Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2021. — 216 с., ил.
14. Хренников А. Ю. Силовые трансформаторы на энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учеб. пособие для магистров // А. Ю. Хренников, В. В. Вахнина, А. А. Кувшинов, Н. М. Александров. — Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2022.
15. Кувшинов А. А. Поперечная емкостная компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / А. А. Кувшинов, А. Ю. Хренников, В. Ф. Карманов, К. В. Замула, Е. А. Володин, И. А. Шкурапат, И. Т. Галиев, Н. М. Александров // Новости электротехники. 2017. № 1(103). С. 28 – 31.
16. Применение мачтовых конденсаторных установок в сетях среднего напряжения // Волга-Бизнес. 2013. № 1(219). <https://bit.ly/3EBIv54>.
17. МЭС Сибири установили вторую батарею статических конденсаторов на реконструируемой подстанции 220 кВ Еланская. <https://bit.ly/3SZlwTH>.



Е. В. Ляпунов



Ю. В. Жилкина

DOI: 10.34831/EP.2022.81.90.004

УДК 621.315.21

## Параметры кабельной линии электропередачи сетей 6 – 10 кВ с учётом влияния поверхностного эффекта

ЛЯПУНОВ Е. В., ЖИЛКИНА Ю. В., канд. экон. наук  
ПАО «Россети ФСК ЕЭС»  
121353, Москва, ул. Беловежская, 4  
[zhilkina.yulia@gmail.com](mailto:zhilkina.yulia@gmail.com)

В настоящее время в России большая часть электрической энергии распределяется потребителям по кабельным сетям напряжением 6 – 10 кВ. Аварии в распределительных кабельных сетях 6 – 10 кВ, составляющие около 70 % всех нарушений электроснабжения промышленных и бытовых потребителей, как правило, сопровождаются значительным экономическим ущербом. Кабельные сети 6 – 10 кВ состоят приблизительно на 95 % из трёхжильных кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Одна из главных причин аварий — моральный и физический износ кабельных линий с БПИ, достигающий в системах электроснабжения 40 – 90 %. Поэтому повышение эксплуатационной надёжности распределительных кабельных сетей 6 – 10 кВ — один из главных факторов повышения надёжности электроснабжения.

В связи с совершенствованием современных комплексов моделирования в данной работе для решения рассматриваемой задачи используется имитационное моделирование трёхжильного кабеля с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Основой для расчёта является закон полного тока в комплексной форме, который позволяет получить решение для широкого диапазона частот. Полученные зависимости продольных активных сопротивлений и индуктивностей кабельных ЛЭП позволяют усовершенствовать модели для расчёта волновых и электромагнитных переходных процессов в кабельных сетях 6 – 10 кВ.

**Ключевые слова:** кабельные сети 6 – 10 кВ, однофазное замыкание на землю, переходные процессы, дистанционное определение места повреждения, частотные характеристики кабельных линий, имитационное моделирование, COMSOL Multiphysics.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) составляют более 80 % общего числа электрических повреждений кабельных линий (КЛ) 6 – 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Большая часть ОЗЗ в КЛ, прежде всего

в начальной стадии развития повреждения, имеет дуговой перемежающийся характер. Дуговые перемежающиеся ОЗЗ сопровождаются опасными перенапряжениями, являющимися причиной возникновения двойных и многомест-

ных замыканий, приводящих к аварийным отключениям КЛ штатным действием релейной защиты от коротких замыканий (КЗ). Быстрое определение повреждённой КЛ и зоны ОЗЗ с точностью до участка, который без нарушения электроснабжения потребителей можно отключить для высоковольтных испытаний повреждённого кабеля и точного определения места пробоя изоляции, является главным условием скорейшего восстановления нормального режима работы электрической сети.

Одним из перспективных методов решения данной задачи является дистанционное определение места ОЗЗ (ДОМЗЗ) по параметрам переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции. Применение для решения задачи ДОМЗЗ электрических величин переходного процесса позволяет определить зону повреждения при всех разновидностях ОЗЗ, включая кратковременные самоустраняющиеся пробои изоляции.

При разработке методов и устройств ДОМЗЗ, основанных на использовании параметров и соотношений переходных токов и напряжений, возникает необходимость в расчётах переходных процессов в КЛ с распределёнными параметрами. Указанные расчёты, как правило, выполняются по упрощённым методикам, основанным на схемах замещения, не учитывающих зависимость продольных параметров кабельных ЛЭП от частоты. В то же время известно, что составляющие переходных токов и напряжений, связанные с процессами разряда ёмкостей повреждённой фазы (разрядные составляющие) в кабельных сетях 6–10 кВ могут иметь частоты от единиц герц до десятков килогерц. При таких частотах использование упрощённых схем замещения приводит к значительным погрешностям в оценке параметров электрических величин переходного процесса.

Известны приближённые аналитические методы расчёта частотных зависимостей для продольных сопротивлений кабельной ЛЭП. Получение на их основе достаточно точного решения представляется затруднительным ввиду сложности конструкции трёхжильных кабелей с секторными жилами.

Разнообразие видов и характера повреждений, а также структуры и условий работы электрических сетей не позволяет разработать какой-либо универсальный метод определения места повреждения (ОМП). Схема системы классификации ОМП в кабельных сетях 6–10 кВ приведена на рис. 1.

Локационный метод ОМП основан на измерении времени между моментами посыла в линию зондирующего электрического импульса и прихода к

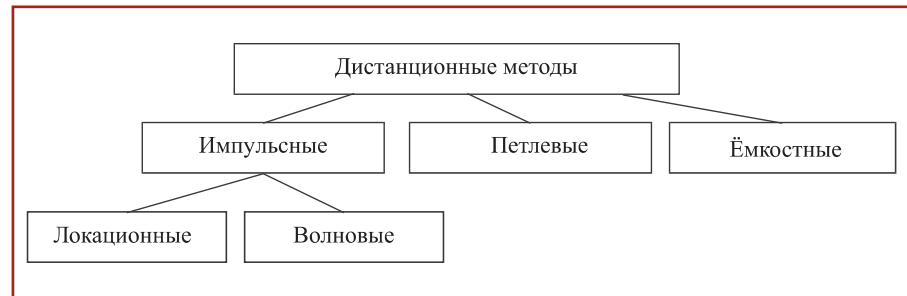


Рис. 1. Схема классификации методов определения места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ

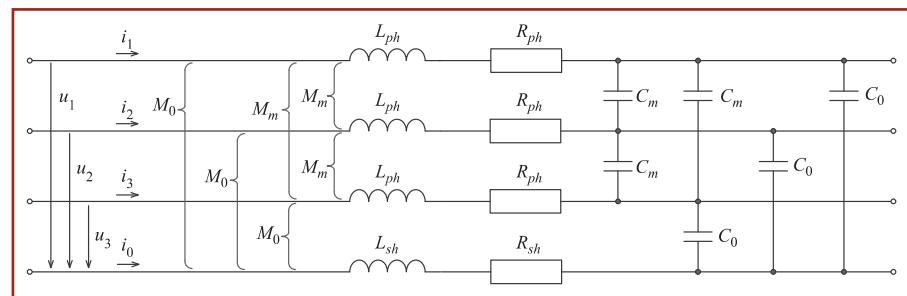


Рис. 2. Схема замещения элементарного трёхжильного кабеля с алюминиевой оболочкой:

$L_{ph}$  — собственная индуктивность фазной жилы;  $L_{sh}$  — собственная индуктивность алюминиевого экрана;  $M_0$  — взаимная индуктивность между фазной жилой и оболочкой;  $R_{ph}$  — активное сопротивление фазной жилы;  $R_{sh}$  — активное сопротивление алюминиевой оболочки;  $C_m$  — ёмкость между фазными жилами;  $C_0$  — ёмкость между фазной жилой и оболочкой

началу линии импульса, отражённого от места повреждения. Локационные измерения подразделяются на автоматические и неавтоматические. Первые используются для ВЛ, включённых в находящуюся под рабочим напряжением электрическую сеть. При срабатывании релейной защиты запускается автоматический локационный искатель, который фиксирует искомое расстояние за время, меньшее одной десятой доли секунды.

Волновой метод основан на измерении времени между моментами достижения концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения.

Петлевой метод применяется для определения зоны повреждения при одно- и двухфазных замыканиях при наличии одной повреждённой жилы или параллельного кабеля с неповреждёнными жилами.

Метод основан на принципе измерительного моста постоянного тока, позволяющего определить отношение сопротивлений повреждённой жилы кабеля от места измерения до точки замыкания и обратной петли.

### Схема замещения кабельной ЛЭП

Расчёт удельных параметров кабельной ЛЭП в данной работе проводится в два этапа. Первый этап заключается в анализе схемы замещения участка ис-

следуемой кабельной ЛЭП; второй — в составлении мультифизической модели кабельной ЛЭП, с помощью которой будут получены зависимости индуктивности и активного сопротивления от частоты электрического тока. Схема замещения трёхфазного кабеля с секторными жилами и металлической оболочкой, описанная в [1], представлена на рис. 2.

### Определение зависимости индуктивности кабельной ЛЭП от частоты

Исходя из анализа схемы замещения кабельной ЛЭП (рис. 1), величина индуктивности кабеля прямой и обратной последовательностей равна:

$$L_{1,2} = L_{ph} - M_m. \quad (1)$$

Величина индуктивности нулевой последовательности зависит также от взаимной индуктивности между фазной жилой и оболочкой и собственной индуктивности оболочки. Это обусловлено тем, что однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) характеризуется пробоем фазной и поясной изоляции и формированием проводящего канала между фазной жилой и заземлённой оболочкой.

$$L_0 = L_{ph} + 3L_{sh} + 2M_m - 6M_0. \quad (2)$$

В учебной литературе [2] приводится следующее соотношение между индук-

тивностью прямой ( $L_1$ ) и нулевой ( $L_0$ ) последовательности для частоты  $f = 50$  Гц:

$$L_0 \approx (3,5 \div 4,6) \cdot L_1. \quad (3)$$

При этом отмечается, что данное соотношение является приближённым и для точного определения параметров кабеля нулевой последовательности необходимо провести измерения или имитационное моделирование.

Для получения зависимостей индуктивности и активного сопротивления кабеля от частоты целесообразно использование раздела Magnetic fields программного комплекса COMSOL Multiphysics. В качестве физической основы для расчёта в разделе Magnetic fields используется закон полного тока в дифференциальной форме:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $H$  — напряжённость магнитного поля;  $J$  — плотность тока;  $D$  — индукция электрического поля. В соответствии с определением векторного магнитного потенциала  $A$  (5) и известным соотношением между электрической индукцией и векторным магнитным потенциалом (6), получаем закон полного тока в дифференциальной форме в частотной области (7):

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu \mu_0} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A}, \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \left( -\nabla \phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right), \quad (6)$$

$$(j\omega \sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon) \cdot \vec{A} + \vec{\nabla} \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}, \quad (7)$$

где  $\omega$  — циклическая частота;  $\sigma$  — проводимость;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Программный комплекс COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (МКЭ) для решения дифференциального уравнения (7). Поперечное сечение исследуемой кабельной ЛЭП и порядок его разбиения на конечные элементы приведены на рис. 3.

Согласно исследованиям [3], составляющие переходных токов и напряжений, связанных с процессами разряда ёмкости повреждённой фазы при замыкании на землю в кабельных сетях, имеют частоты от единиц до десятков килогерц. Соответственно, для повышения скорости расчёта целесообразно ограничить диапазон частот до величины 100 кГц.

Исследуемая кабельная ЛЭП выполнена с помощью кабеля марки ААБл-3×240 — кабель с алюминиевой жилой в алюминиевой оболочке с бумаго-пропитанной изоляцией (БПИ).

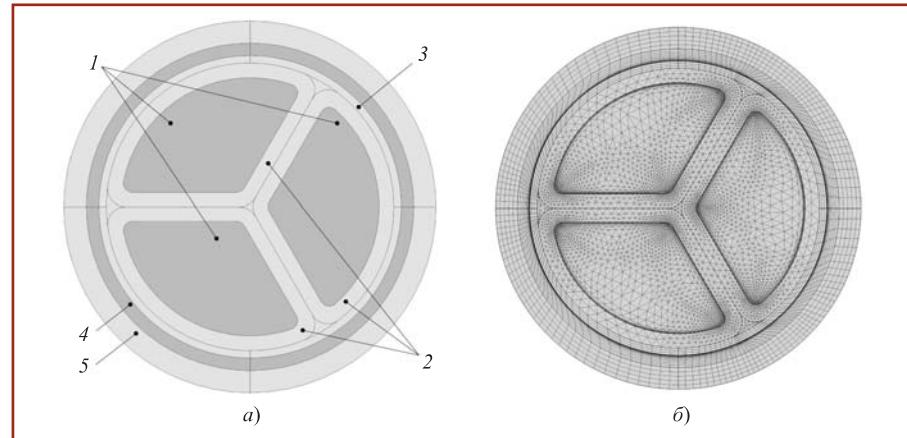


Рис. 3. Модель кабельной ЛЭП для определения индуктивностей кабельной ЛЭП при различных частотах:

а — поперечное сечение кабельной ЛЭП; 1 — фазные проводники; 2 — фазная изоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — проводящий алюминиевый экран; 5 — внешняя изоляция  
 б — способ разбиения сечения кабеля на конечные элементы

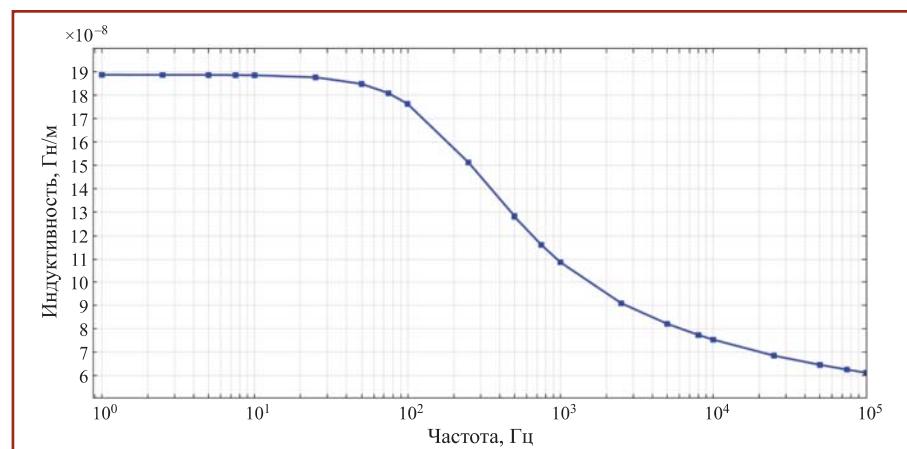


Рис. 4. Зависимость индуктивности прямой последовательности от частоты

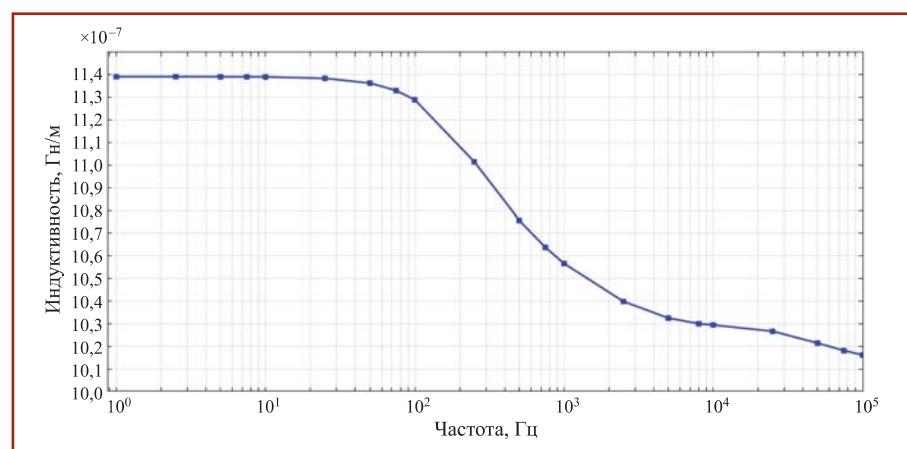


Рис. 5. Зависимость индуктивности нулевой последовательности от частоты

Площадь поперечного сечения фазной жилы равна  $240 \text{ мм}^2$ . Номинальное напряжение кабеля — 6 кВ; толщина фазной изоляции — 2 мм, толщина поясной изоляции — 0,95 мм; толщина алюминиевой оболочки — 1,7 мм.

Результаты расчёта зависимостей индуктивностей прямой и нулевой последовательностей от частоты для частот 50 Гц, 1, 10, 50 кГц приведены в табл. 1. С увеличением частоты электрического тока индуктивности прямой и обратной

последовательности уменьшаются, что обусловлено эффектом вытеснения тока на поверхность проводника при высоких частотах. При этом, с ростом частоты индуктивность нулевой последовательности увеличивается медленнее индуктивности прямой последовательности; основная причина данного явления — влияние индуктивности металлической оболочки на индуктивность

нулевой последовательности. Ввиду формы оболочки — полого цилиндрического проводника, её индуктивность практически не зависит от частоты.

Частотные характеристики индуктивностей прямой и нулевой последовательностей представлены на рис. 4 – 5.

Согласно полученным результатам, при частотах 10 кГц и выше величина индуктивности прямой последовательно-

сти уменьшается более чем в 2,4 раза, нулевой последовательности — в 1,1 раза по сравнению с индуктивностью при частоте 50 Гц.

Достоверность определения индуктивностей кабельной ЛЭП может быть проверена только посредством сравнения полученного результата с данными из справочной литературы (например, [4]) для частоты  $f = 50$  Гц. Согласно [1] индуктивность кабеля ААБл-3×240 с секторными жилами при напряжении 6 кВ составляет  $1,907 \cdot 10^{-4}$  Гн/км. Значение индуктивности, полученное с помощью модели в COMSOL Multiphysics при частоте 50 Гц, составляет  $1,849 \cdot 10^{-4}$  Гн/км, т.е. погрешность расчёта составляет около 3 %. В [4] указано значение индуктивности  $2,26 \cdot 10^{-4}$  Гн/км; такое отличие (18,2 %) может быть обусловлено неточностью методов и средств определения параметров кабеля, характерных для 1970-х гг.

Таблица 1

Результаты расчётов индуктивности прямой и нулевой последовательностей кабельной ЛЭП при различных частотах

| Частота, $f$ , Гц   | 50                    | 1000                  | 10000                 | 50000                 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Индуктивность кабельной ЛЭП прямой последовательности, $L_1$ , Гн/км  | $1,849 \cdot 10^{-4}$ | $1,086 \cdot 10^{-4}$ | $0,753 \cdot 10^{-4}$ | $0,645 \cdot 10^{-4}$ |
| Индуктивность кабельной ЛЭП нулевой последовательности, $L_0$ , Гн/км | $11,36 \cdot 10^{-4}$ | $10,57 \cdot 10^{-4}$ | $10,29 \cdot 10^{-4}$ | $10,21 \cdot 10^{-4}$ |
| Отношение $L_0/L_1$   | 6,14                  | 9,73                  | 13,67                 | 15,83                 |

Таблица 2

Результаты расчета активного сопротивления прямой и нулевой последовательностей кабельной ЛЭП при различных частотах

| Частота, $f$ , Гц  | 50    | 1000 | 10 000 | 50 000 |
|--|-------|------|--------|--------|
| Активное сопротивление кабельной ЛЭП прямой последовательности, $R_1$ , Ом/км  | 0,122 | 0,31 | 0,97   | 2,68   |
| Активное сопротивление кабельной ЛЭП нулевой последовательности, $R_0$ , Ом/км | 1,97  | 2,18 | 2,61   | 5,37   |
| Отношение $R_0/R_1$  | 17,91 | 7,03 | 2,69   | 2      |

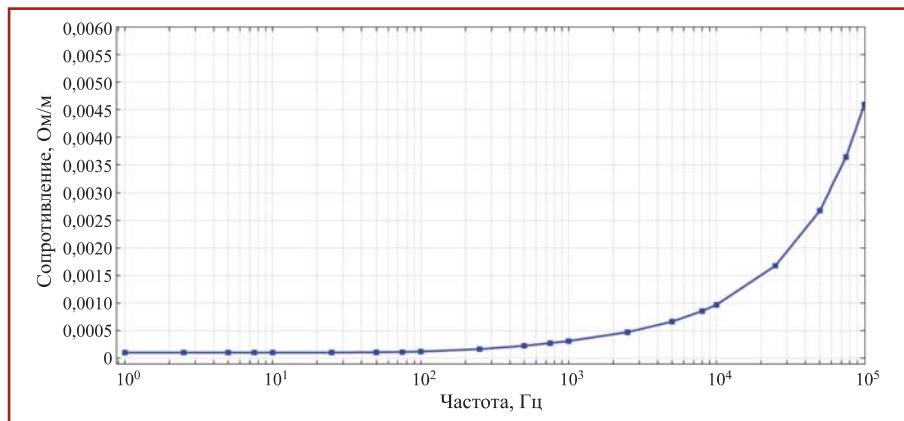


Рис. 6. Зависимость активного сопротивления прямой последовательности от частоты

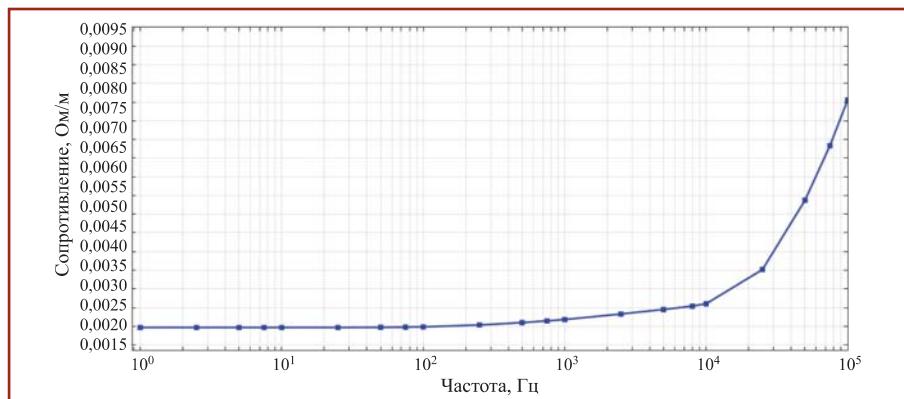


Рис. 7. Зависимость активного сопротивления нулевой последовательности от частоты

### Определение зависимости активного сопротивления кабельной ЛЭП от частоты

Определение величины активного сопротивления кабельной ЛЭП необходимо для оценки значений постоянных времени затухания переходных процессов, обусловленных дистанционным определением места ОЗЗ (ДПОЗЗ). Знание постоянных времени затухания зарядных и разрядных составляющих тока ОЗЗ позволит более корректно оценить величину перенапряжений в сети 6 – 10 кВ и получить достоверную картину переходного процесса.

В учебной литературе [2] приводится следующее приближённое соотношение между активным сопротивлением прямой ( $R_1$ ) и нулевой ( $R_0$ ) последовательностей для частоты  $f = 50$  Гц, требующее существенного уточнения:

$$R_0 \approx 10 \cdot R_1, \quad (8)$$

Результаты расчёта зависимостей активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей от частоты для частот 50 Гц, 1, 10, 50 кГц приведены в табл. 2.

Увеличение активного сопротивления при повышении частоты обусловлено эффектом вытеснения тока на поверхность проводников («скрин-эффект»). Частотные характеристики активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей представлены на рис. 6 – 7.

Достоверность определения активных сопротивлений кабельной ЛЭП может быть проверена только посредством сравнения полученного результата с данными справочной литературы [4] для частоты  $f = 50$  Гц. Согласно [4] активное сопротивление прямой последовательности исследуемого кабеля равно

0,129 Ом/км. Значение, полученное с помощью COMSOL Multiphysics, составляет 0,122 Ом/км. Погрешность индуктивности кабельной ЛЭП равна 5,4 %. Отношение  $R_0/R_1$  согласно результатам моделирования равно 17,91, что значительно отличается от приближённого значения, приведённого в [2].

#### Основные выводы и дальнейшие перспективы работы

В статье приведена методика расчёта зависимостей индуктивностей и активных сопротивлений кабельной ЛЭП от частоты с учётом поверхностного эффекта. Результаты расчётов верифицированы путём их сравнения со справочными данными. Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена также корректностью принятых допущений и использованием законов классической электродинамики.

Полученные частотные зависимости позволяют в дальнейшем анализировать переходные процессы при волновых и переходных электромагнитных процессах в кабельных сетях 6 – 10 кВ; такой анализ необходим для построения алгоритмов устройства дистанционного определения места однофазного замыкания на землю.

Следует отметить, что благодаря влиянию поверхностного эффекта по КЛ организовывают передачу высокочастотных сигналов для работы системы механики и связи, находящихся на больших расстояниях. Учитывая влияние поверхностного эффекта в высокочастотном магнитном поле, теплота выделяется преимущественно в поверхностном слое, а это позволяет нагревать проводник в тонком поверхностном слое без существенного изменения температуры внутренних областей. Данное явление используется в важном, с промышленной точки зрения, методе поверхностной закалки металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слыщалов В. К. Методика определения индуктивностей трёхфазных силовых кабелей при расчётах переходных процессов в электрических сетях 6 – 10 кВ / В. К. Слыщалов, В. А. Шунин, А. В. Куранов, Е. А. Воробьева, Г. А. Филатова // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 6. С. 17 — 22.

2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1970. — 520 с.

3. Шунин В. А. Влияние разряда ёмкости повреждённой фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3 – 10 кВ // Электричество. 1983. № 12. С. 4 – 9.

4. Электротехнический справочник. 4-е изд., перераб. Т. 1. — М.: Энергия, 1971. — 880 с., с ил.

## В порядке обсуждения

### Комментарии к статье Молодюка В. В. «Математическая модель розничного рынка электрической и тепловой энергии»<sup>1</sup>

**В** Институте системных исследований им. Л. А. Мелентьева СО РАН в течение многих лет рассматриваются близкие к описанным в статье В. В. Молодюка проблемы, в рамках которых:

- поддерживается идея создания единых розничных рынков электрической и тепловой энергии. При этом считается возможным при анализе работы рынков рассматривать эти два вида энергии как объединённый (совокупный) продукт;
- оценку эффективности работы розничного рынка следует вести по суммарному критерию, объединяющему показатели эффективности производства и потребления энергии. Можно отметить, что такой критерий в форме общественного благосостояния, давно используется коммерческим оператором оптового рынка электрической энергии (мощности) при расчётах планового производства электроэнергии и узловых равновесных цен (Регламент 7 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка);

- мы давно выступаем за пересмотр Федерального закона № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» и Правил оптового рынка электрической энергии и мощности, утверждённых постановлением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172, с целью устранить обязательные требования реализации электроэнергии поставщиками с установленной мощностью более 25 МВт только на оптовом рынке. Электроэнергия, генерируемая ТЭЦ любой установленной мощности, должна продаваться на розничном рынке, если такая сделка оказывается взаимовыгодной поставщику и покупателю.

Считаю, что перечисленные несовершенства в организации рынков электроэнергии (мощности) должны быть устранены для повышения эффективности рыночных отношений в отечественной электроэнергетике. Одно из важных направлений в достижении этой цели — организация совмещённых розничных рынков электроэнергии и тепла. С этой точки зрения статья В. В. Молодюка выглядит полезной и современной.

Вместе с тем, считаю справедливым утверждение автора о том, что модель предназначена в основном для исследовательских целей. Действительно, модель позволяет углублённо понять основные идеи построения единого рынка двух видов энергии. Однако её применение для целей планирования и анализа работы реальных розничных рынков представляется невозможной.

В каких направлениях, на мой взгляд, требуется развивать модель?

1. Из статьи не ясно, как должна формироваться целевая функция (суммарный выигрыш участников рынка) при рассмотрении сложной энергосистемы, включающей несколько ТЭЦ, КЭС, котельных и множество распределённых потребителей с разными свойствами.

2. При анализе рынка в сложной энергосистеме невозможно обойтись без моделирования сетевой инфраструктуры. Требуется учитывать реальную конфигурацию электрических и тепловых сетей, обеспечивать допустимость перетоков каждого вида энергии по величине и направлению.

3. При планировании режимов в сложных энергосистемах обычно рассматривается несколько временных интервалов (суток, недель, месяцев). При этом важно учитывать ограничения, связывающие несколько временных интервалов. Это относится к возможности поддержания требуемых величин генерируемой мощности, к ограничениям по расходу энергоресурсов. (Последнее особенно важно для электроэнергетических систем, имеющих ГЭС.)

4. Отдельные электростанции часто входят в состав генерирующих компаний, которые преследуют свои корпоративные цели. При планировании режимов на розничном рынке важно учитывать не индивидуальные интересы электростанций, но их поведение в рамках генерирующей компании.

5. Многие используемые при анализе перспективных свойств рынков исходные данные имеют случайный характер. Постановки задачи определения объёмов производства и потребления обоих видов энергии должна соответствовать имеющейся информации о случайных данных.

6. Представленная модель предполагает использование большого числа аналитических характеристик и участ-

<sup>1</sup> Статья опубликована в журнале «Энергетик» № 7 за 2022 г.