



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ ШЕСТИФАЗНОЙ ЛЭП НА ТРУБОПРОВОДЫ

Крюков А.В.^{1,2}, Суслов К.В.^{2,3}, Крюков А.Е.²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
dr.souslov@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка цифровых моделей для вычисления наведенных напряжений на трубопроводе, создаваемых шестифазной линией электропередачи в нормальном и аварийных режимах работы. МЕТОДЫ. Исследования проводились на компьютерной модели электрической сети, имеющей в своем составе линию данного типа. Для ее формирования использовался подход, базирующийся на применении фазных координат. Моделирование осуществлялось на основе программного комплекса Fazonord, версия 5.3.5.3-2024. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассматривались следующие режимы работы мультифазной ЛЭП 220 кВ: симметричный и неполнофазный при нагрузках на приемном конце $300 + j150$ МВ·А; одно- и двухфазные короткие замыкания (КЗ), а также 2-х фазное КЗ на землю. Для сравнения проведено моделирование ЛЭП типового исполнения. Полученные результаты дали возможность сделать следующие выводы: в симметричном нагрузочном режиме 6-ти фазная линия создает в отдельных точках трубы наведенные напряжения, более чем в три раза превышающие аналогичные параметры для ЛЭП традиционной конструкции; однако их величины не превышают допустимого уровня в 60 В; для КЗ максимумы потенциалов на трубе в рассматриваемых ЛЭП различаются незначительно; при отключении одной фазы их уровни при шестифазной ЛЭП выходят за допустимый предел, а в трехфазной линии не превышают 60 В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Применяемый подход отличается универсальностью и может использоваться для определения режимов в сетях различной конфигурации; разработанные модели могут быть востребованы в практике проектирования участков совместного прохождения перспективных ЛЭП шестифазного исполнения и трубопроводов при планировании мероприятий по обеспечению безопасной работы обслуживающего персонала.

Ключевые слова: шестифазные ЛЭП; наведенные напряжения на деталях магистрального трубопровода; моделирование.

Для цитирования: Крюков А.В., Суслов К.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний шестифазной ЛЭП на трубопроводы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 108-120. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-108-120.

MODELING OF ELECTROMAGNETIC EFFECTS OF SIX-PHASE POWER LINES ON PIPELINES

Kryukov A.V.^{1,2}, Suslov K.V.^{2,3}, Kryukov A.E.²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³National Research University "MEI", Moscow, Russia
dr.souslov@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Development of digital models for calculating induced voltages on a pipeline created by a six-phase power transmission line in normal and emergency operating

modes. METHODS. The studies were conducted on a computer model of an electrical network that includes a line of this type. Its formation involved an approach based on the use of phase coordinates. The modeling was carried out using the Fazonord software package, version 5.3.5.3-2024. RESULTS. The following operating modes of a 220 kV multiphase power transmission line were considered: symmetrical and open-phase with loads at the receiving end of $100 + j50$ MVA per phase; single-phase, two-phase short circuits, as well as a two-phase ground fault. For comparison, the modes of a two-circuit three-phase power transmission line were modeled. The obtained results allowed us to draw the following conclusions: in a symmetrical load mode, a six-phase line creates induced voltages at certain points of the pipe that are more than three times greater than similar parameters for a three-phase power transmission line; however, the values of induced potentials do not exceed the permissible level of 60 V; in short-circuit modes, the maximum induced voltages in the transmission lines under consideration differ insignificantly; when one phase is disconnected, the induced voltages in a six-phase power transmission line go beyond the permissible limit, and in a three-phase line they do not exceed 60 V. CONCLUSION. The applied approach is distinguished by its universality and can be used to determine modes in networks of various configurations; the developed models can be used in the practice of designing sections of joint passage of promising six-phase power transmission lines and pipelines when developing measures to ensure the safe operation of service personnel.

Keywords: six-phase power transmission lines; induced voltages on parts of the main pipeline; modeling.

For citation: Kryukov A.V., Suslov K.V., Kryukov A.E. Modeling of electromagnetic effects of six-phase power lines on pipelines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 108-120. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-108-120.

Введение. Литературный обзор (Introduction. Literature Review)

Для реализации эффективных преобразователей переменного тока в постоянный применяются многофазные трансформаторные агрегаты [1]. На их основе разработаны мультифазные линии электропередачи [2-7], обладающие рядом преимуществ перед ЛЭП трехфазного типа. К их числу можно отнести:

- повышенная пропускная способность;
- уменьшенные потери энергии и несимметрия токов проводов;
- пониженные радиоизлучения, шум и др.

Недостаток линий многофазной конструкции состоит в повышенных затратах на преобразовательное оборудование.

Актуальность проблемы изучения мультифазных ЛЭП подтверждается большим числом зарубежных публикаций по данной тематике. Так, например, задача определения места повреждения шестифазных ЛЭП (ШФ ЛЭП) на основе вейвлет-преобразования высокочастотных переходных процессов, вызванных аварией, решена в [8]. Анализ неисправностей в ШФ ЛЭП проведен в [9]. Расширенная модель мультифазной ЛЭП представлена в [10]. Вопросы реализации защиты ШФ ЛЭП с использованием математической морфологии рассмотрены в [11]. Анализ динамической устойчивости ЭЭС с ШФ ЛЭП выполнен в [12]. Методика обнаружения и классификации нештатных ситуаций в ШФ ЛЭП на основе рекуррентной нейронной сети, способной обучаться долгосрочным зависимостям, описана в [13]. Метод распознавания повреждений ШФ ЛЭП на основе вейвлет-преобразования предложен в [14]. Алгоритм определения наведенных напряжений на объектах под ШФ ЛЭП описан в [15]. Крутильные моменты валов генератора из-за аварий ШФ ЛЭП рассмотрены в [16, 17]. Однотерминальная релейная защита (РЗ) ШФ ЛЭП предложена в [18]. Вопросы поиска неисправностей в ШФ ЛЭП с использованием нечеткой логики рассмотрены в [19, 20]. Исследование шестифазной линии электропередачи, использующей автотрансформаторное преобразование, проведено в [21]. Защита ШФ ЛЭП от перегрузки по току с помощью цифрового реле предложена в [22]. Комбинированная РЗ ШФ ЛЭП на основе S-преобразования рассмотрена в [23]. Обзор применения вейвлетов для РЗ ШФ ЛЭП представлен в [24]. Дистанционная защита для ШФ ЛЭП на основе высокочастотных переходных процессов предложена в [25]. Логическая схема резервной РЗ ШФ ЛЭП с использованием токов обратной последовательности описана в [26]. Результаты сравнительного исследования схем автоматического повторного включения ШФ ЛЭП приведены в [27].

Анализ проанализированных выше публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрен целый ряд важных аспектов, связанных с изучением мультифазных систем для транспорта электроэнергии; при этом основным объектом исследования является шестифазная линия, которая может быть реализована на основе двухцепной ЛЭП. Значительная часть работ посвящена решению задач формирования релейной защиты и автоматики ШФ ЛЭП, Актуальной и малоизученной проблеме определения наведенных напряжений, вызванных электромагнитным влиянием (ЭМВ) ШФ ЛЭП на смежные линии, посвящена только одна работа [15].

Ниже представлены результаты разработки цифровых моделей для определения ЭМВ ШФ ЛЭП на заземленные металлические конструкции. Актуальность этой проблемы подтверждается тем, что на многих участках трассы ЛЭП и магистральных трубопроводов проходят в одних коридорах. В среднесрочной перспективе можно ожидать, что на некоторых из них будут применяться мультифазные линии. Для решения задачи расчета ЭМВ ШФ ЛЭП на трубопроводы можно эффективно использовать подход, базирующийся на применении фазных координат [28-30].

Методика и результаты моделирования (Methods and results)

Для решения сформулированной выше задачи применялись методы определения режимов ЭЭС, базирующиеся на использовании фазных координат [28–30]. На этой базе разработан промышленный комплекс программ Fazonord, позволяющий формировать модели, адекватно описывающие реальные режимы ЭЭС, характеризующиеся наличием несимметрии и гармонических искажений. Для представления силовых элементов ЭЭС, к которым относятся линии электропередачи и трансформаторы, используются решетчатые схемы замещения (РСЗ) в виде наборов ветвей с проводимостями $g_{ik} + jb_{ik}$, которые соединяются так, чтобы образовывались полные графы, т. е.

$$PC3: NOD \cup BRANC, \forall i, k \in NOD \rightarrow branc_{i,k} \in BRANC,$$

где NOD , $BRANC$ – соответственно, множества узлов и ветвей.

Матрица проводимостей ЛЭП может быть представлена так [29]:

$$\underline{Y}_C = \underline{Y}_{PC} + j\omega \underline{C}_Y,$$

где $\underline{Y}_{PC} = -\underline{M}_0 \underline{Z}^{-1} \underline{M}_0^T$; $\underline{M}_0 = \begin{bmatrix} \underline{E}_r \\ -\underline{E}_r \end{bmatrix}$; $\underline{C}_Y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \underline{B} & 0 \\ 0 & \underline{B} \end{bmatrix}$; $\underline{D} = \underline{Z}^{-1}$; $\underline{Z}$, $\underline{E}_r$, $\underline{A}$ – соответственно, матрицы сопротивлений, единичная и потенциальных коэффициентов; $\omega=314$ рад/с $\underline{B} = \underline{A}^{-1}$.

Аналогичное соотношение для трансформаторов записывается следующим образом:

$$\underline{Y}_{PC} = -\underline{M}_0 \underline{Z}_E^{-1} \underline{M}_0^T,$$

где $\underline{Z}_E = \underline{Z} - j\omega \underline{W}_1 \underline{R}_M^{-1} \underline{W}_2$; $\underline{Z}$, $\underline{R}_M$, $\underline{W}_1$, $\underline{W}_2$ – соответственно, матрицы электрических и магнитных сопротивлений, а также чисел витков обмоток.

Наряду с типовыми сетями трехфазного исполнения возможно моделирование сетей, включающих участки с числом фаз, меньшим или большим трех, например, 2-х, 4-х и 6-ти фазные. В текущей версии 5.3.6.0 комплекса Fazonord реализована возможность моделирования ЭЭС и систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), содержащих сегменты переменного и постоянного тока с подробным представлением выпрямителей и инверторов.

При расчетах ЭЭС или СЭЖД, имеющих заземленные токоведущие части, например рельсы или трубопроводы, необходимо учитывать распределенность параметров, поскольку длина волны электромагнитного поля для такого элемента значительно меньше аналогичного показателя для воздуха. Учет осуществляется путем формирования цепочечной схемы, включающей многополюсники, моделирующие короткие участки.

Метод фазных координат (МФК) имеет преимущества по сравнению с методом симметричных составляющих (МСС), особенно при моделировании и анализе сложных ЭЭС и СЭЖД:

- он позволяет напрямую рассматривать ЭЭС или СЭЖД с несимметричными элементами или нагрузками без необходимости преобразования к симметричным составляющим.
- фазные координаты наиболее полно отвечают физической сущности моделируемого объекта, что упрощает понимание и интерпретацию режимов его работы и помогает визуализировать результаты расчетов.

• в сложных ЭЭС и СЭЖД с многократными несимметриями использование МСС может быть затруднено из-за необходимости стыковки схем различных последовательностей; МФК не имеет такого ограничения.

• работа в фазных координатах позволяет пользователю легко вносить изменения и модификации в модели ЭЭС и СЭЖД.

Проверка адекватности предложенных в [28] методов и алгоритмов основывалась на сопоставлении с аналитическими вычислениями, а также с расчетами по известным программам, прошедшим масштабную проверку. Расхождения составили доли процента по уровням напряжений в узлах. Кроме того, проводилось сравнение с результатами натурных экспериментов в сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции Забайкальской железной дороги и Байкало-Амурской магистрали (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Сопоставление расчетов и измерений фазных напряжений
Comparison of calculations and measurements of phase voltages

Фаза	Подстанция	Измерение	Расчет	Различие, %
A	ТП 1	139,7	138,2	1,1
B		140,0	140,1	-0,1
C		139,9	139,9	0,0
A	ТП 2	137,3	137,8	-0,4
B		137,6	138,4	-0,6
C		138,0	139,8	-1,3
A	ТП 3	137,2	138,0	-0,6
B		136,7	138,6	-1,4
C		135,6	138,6	-2,2

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Перечень рассматриваемых элементов ЭЭС и СЭЖД представлен в таблице 2, а описание задач моделирования с указанием направлений практического использования результатов – в таблице 3.

Таблица 2

Table 2

Перечень моделируемых элементов ЭЭС и СЭЖД

№	Наименование элемента	Особенности исполнения
1	Воздушные линии (ВЛ) электропередачи	Типовая конструкция, компактные повышенной пропускной способности, мультифазные, многоцепные, управляемые самокомпенсирующиеся, использующие землю в качестве обратного провода, с заземленной фазой
2	Кабельные линии (КЛ)	Типовой конструкции, с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена, криогенные
3	Токопроводы	Жесткие и гибкие высокого напряжения, газонезолированные ЛЭП, магистральные и распределительные шинопроводы 0,4 кВ
4	Силовые трансформаторы	Типовой конструкции, многообмоточные, симметрирующие, преобразовательные, вольтодобавочные
5	Измерительные преобразователи	Трансформаторы тока и напряжения
6	Элементы smart grid и киберфизических систем электроснабжения	Активные фильтры и кондиционеры гармоник, вольтодобавочные и кросс-трансформаторы, управляемые источники реактивной мощности, фазоповоротные устройства, накопители энергии
7	Возобновляемые источники энергии	Мини- и микроГЭС, ветрогенераторы и ветропарки, солнечные электростанции, установки инверторной генерации

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Список решаемых задач

№	Задача	Объект моделирования	Направления практического использования результатов
1	Определение нормальных, сложносимметричных, несинусоидальных и предельных по статической устойчивости режимов	ЭЭС, СЭЖД	Расчет нагрузочной способности сетей, показателей энергоэффективности и качества электроэнергии
2	Расчет напряженностей	ЭЭС,	Оценка электромагнитной

	электромагнитных полей, создаваемых ВЛ, КЛ, токопроводами и тяговыми сетями	СЭЖД	безопасности и разработка мероприятий по улучшению ее условий
3	Вычисление наведенных напряжений на линиях электропередачи, связи и трубопроводах	ЭЭС, СЭЖД	Разработка методов и средств повышения безопасности персонала, а также устройств защиты подземных сооружений от коррозии
4	Моделирование режимов плавки гололеда на проводах ЛЭП и тяговых сетей	ЭЭС, СЭЖД	Повышение эффективности средств борьбы с гололедными отложениями
5	Параметрическая идентификация	ЭЭС, СЭЖД	Определение фактических параметров ЛЭП, трансформаторов и контактных сетей
6	Определение тепловых режимов проводов и трансформаторов	ЭЭС, СЭЖД	Расчет температур нагрева токоведущих частей и трансформаторов, выбор рациональных режимов работы, оценка допустимости перегрузок
7	Имитационное моделирование тяговых и внешних сетей железных дорог переменного и постоянного тока	СЭЖД	Определение нагрузочной способности по системе электроснабжения, формирование рациональных графиков движения поездов

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В рамках рассматриваемой в данной статье проблемы следует подчеркнуть еще одну отличительную особенность методики, реализованной в комплексе Fazonord. Она состоит в высокой точности расчета электромагнитных влияний в ближней, дальней и промежуточной зонах интеграла Карсона [31]; при этом для первых двух зон применяются апробированные аппроксимирующие формулы, а в промежуточной – интеграл вычисляется путем разложения в ряд:

$$\begin{aligned}
 E_{ik} = & 0,5 - \ln(\lambda r) - j \frac{\pi}{4} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(r/2)^{2n}}{n!(n+1)!} \left[\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \times \\
 & \times \left[\left[\ln(\lambda r) - m_n \right] \cos(2n\theta) - \theta \sin(2n\theta) + j \frac{\pi}{4} \cos(2n\theta) \right] - \\
 & - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{r^{2n-1} \cos[(2n-1)\theta]}{1^2 \cdot 3^2 \cdot \dots \cdot (2n-1)^2 \cdot (2n+1)} \left\{ \cos\left[\frac{(2n-1)\pi}{4}\right] + j \sin\left[\frac{(2n-1)\pi}{4}\right] \right\},
 \end{aligned}$$

где $m_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n+1} - \frac{1}{2(n+1)}$; $r = r_{ik} \cdot \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}} = 2,8099 \cdot 10^{-3} \cdot r_{ik} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}}$; f – частота, Гц;

$r_{ik}' = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i + y_k)^2}$; ρ – сопротивление грунта, Ом·м; $\lambda = 0,890536209$;

$\theta = \arctg \frac{|x_i - x_k|}{y_i + y_k}$; $(x_i, y_i), (x_k, y_k)$ – координаты токоведущих частей, м.

Расчеты проводилось на основе программного комплекса Fazonord, версия 5.3.6.0-2024 применительно к схеме 6-тифазной ЛЭП, показанной на рисунке 1. Предполагалась, что параллельно ЛЭП проложен стальной трубопровод с диаметром трубы в 250 мм. По краям сооружения подключались стационарные заземлители с сопротивлением растеканию в один Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы в 0,05 См/км.

Результаты моделирования представлены на рис. 4 –10. Для сравнения проведено определение режимов двухцепной ЛЭП трехфазной конструкции.

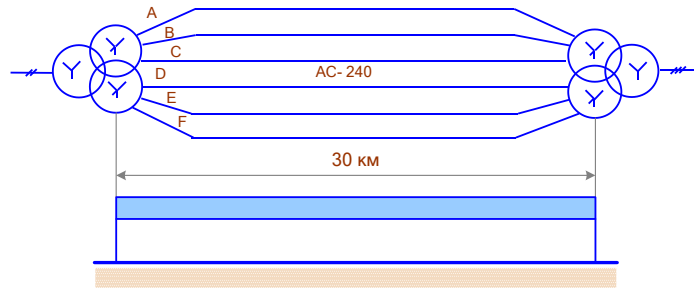


Рис. 1. Схемы шестифазной ЛЭП

Fig. 1. Six-phase power transmission line diagrams

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 показаны зависимости наведенных напряжений от координаты x : $U=U(x)$ для симметричного нагрузочного режима ШФ ЛЭП.



Рис. 2. Наведенные напряжения в симметричном режиме при нагрузках на приемном конце $100 + j50$ МВ·А на фазу: x – координата оси параллельной трассе ЛЭП

Fig. 2. Induced voltages in symmetrical mode with loads at the receiving end of $100 + j50$ MVA per phase: x is the coordinate of the axis parallel to the transmission line route

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 представлены результаты расчета $U=U(x)$ для режимов двухфазного короткого замыкания (КЗ) ШФ ЛЭП в отдельных точках линии. На рисунке 4а приведены графики, иллюстрирующие различия в уровнях наведенных напряжений для ШФ ЛЭП и двухцепной линии трехфазного типа. На рисунке 4б показаны зависимости максимальных значений этих параметров от координаты x .

На рисунках 5, 6 представлены аналогичные диаграммы для двухфазного КЗ на землю, а на рисунках 7, 8 – для однофазного КЗ. На рисунке 9 приведены графики для режима обрыва одной фазы ШФ ЛЭП.

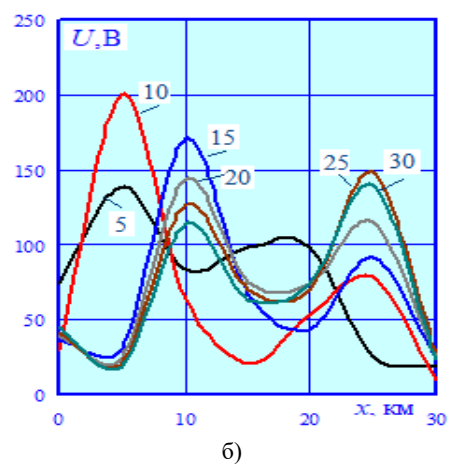
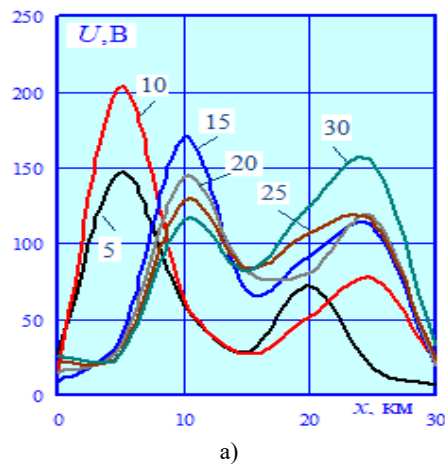
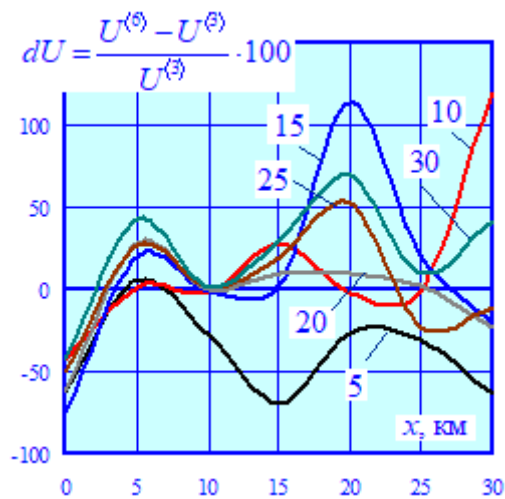


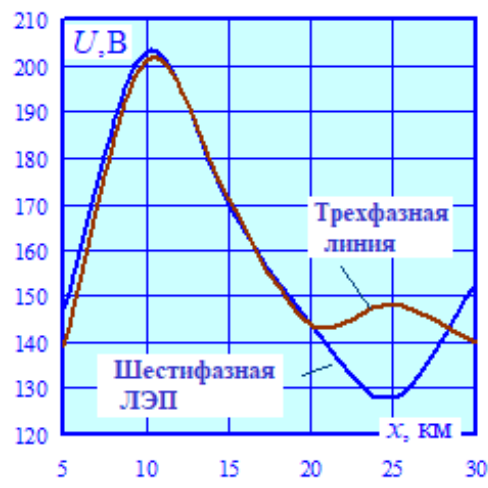
Рис. 3. Наведенные напряжения при двухфазном КЗ: а – шестифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная линия; цифрами обозначены координаты $x_{КЗ}$ места КЗ

Fig. 3. Induced voltages during a two-phase short circuit: a – six-phase power transmission line; b – three-phase double-circuit line; the numbers indicate the coordinates $x_{КЗ}$ of the short circuit location

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



а)



б)

Рис. 4. Различия в уровнях наведенных напряжений в отдельных точках трубы (а) и их максимумы (б) при двухфазном КЗ: $U^{(6)}$ – напряжения, наведенные шестифазной ЛЭП; $U^{(3)}$ – то же для трехфазной линии

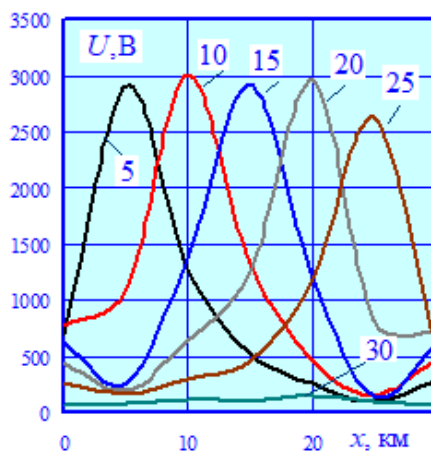
Fig. 4. Differences in the level of induced voltages at individual points of the pipe (a) and their maxima (b) during a two-phase short circuit: $U^{(6)}$ – voltages induced by a six-phase power line; $U^{(3)}$ – the same for a three-phase line

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

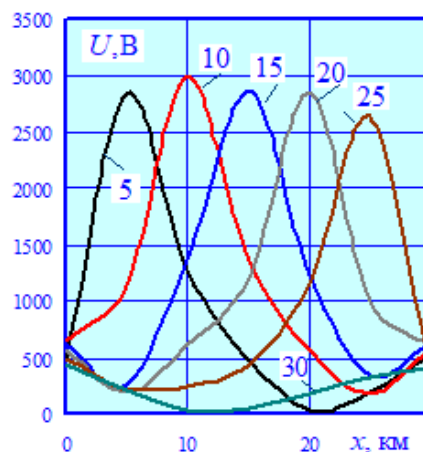
Сравнение максимумов наведенных напряжений при различных видах КЗ на шестифазной ЛЭП проиллюстрировано на рисунке 10.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- в симметричном нагрузочном режиме ШФ ЛЭП создает в отдельных точках трубы наведенные напряжения U , в три раза большие аналогичных параметров для трехфазной ЛЭП; однако величины потенциалов не превышают допустимого уровня в 60 В (рис. 3);
- в режимах КЗ максимумы U в рассматриваемых ЛЭП достаточно близки; однако их величины в отдельных точках трубы для ШФ ЛЭП и линии трехфазного типа могут существенно различаться (рис. 4а, 6а, 8а);
- при отключении фазы значения U при ШФ ЛЭП выходят за допустимый предел, а в трехфазной линии незначительно превышают 60 В для одной точки (рис. 8);
- наибольшие уровни потенциалов, достигающие 3,5 кВ, наблюдаются в режиме однофазного КЗ; при двухфазном КЗ на землю максимальная величина U составляет 3 кВ (рис. 9).



а)



б)

Рис. 5. Наведенные напряжения при двухфазном КЗ на землю: а – шестифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная линия; цифрами обозначены координаты $x_{КЗ}$ места КЗ

Fig. 5. Induced voltages during a two-phase short circuit to earth: a – six-phase power transmission line; b – three-phase double-circuit line; the numbers indicate the coordinates $x_{КЗ}$ of the short circuit location

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

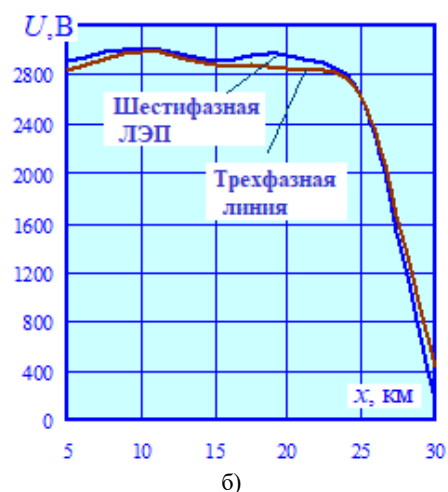
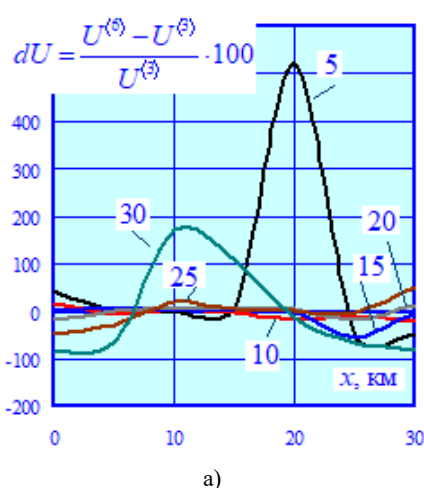


Рис. 6. Различия в уровне наведенных напряжений в отдельных точках трубы (а) и их максимумы (б) при двухфазном КЗ на землю

Fig. 6. Differences in the level of induced voltages at individual points of the pipe (a) and their maximums (b) during a two-phase short circuit to ground

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

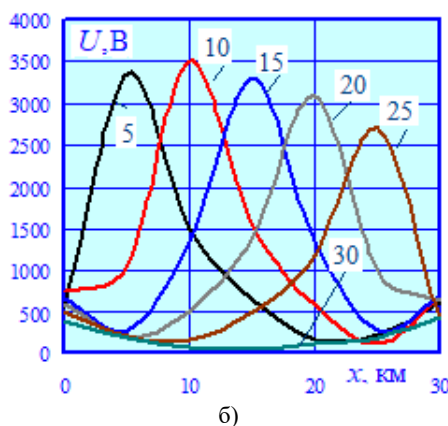
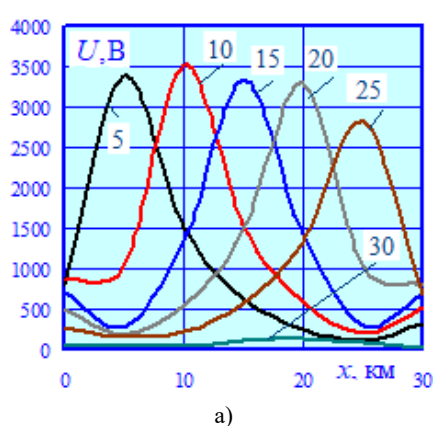


Рис. 7. Наведенные напряжения при однофазном КЗ: а – шестифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная линия; цифрами обозначены координаты $x_{КЗ}$ места КЗ

Fig. 7. Induced voltages during a single-phase short circuit: а – 6-phase power transmission line; б – 3-phase double-circuit line; the numbers indicate the coordinates $x_{КЗ}$ of the short circuit location

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

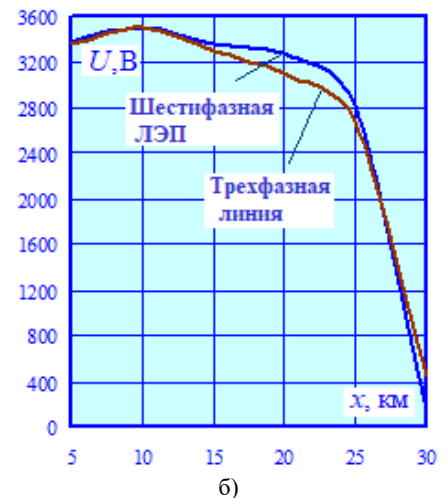
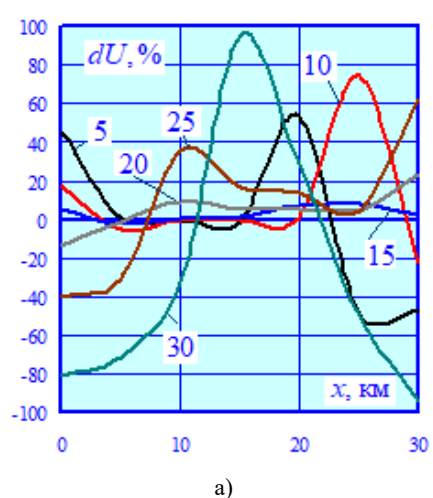


Рис. 8. Различия в уровне наведенных напряжений в отдельных точках трубы (а) и их максимумы (б) при однофазном КЗ

Fig. 8. Differences in the level of induced voltages at individual points of the pipe (a) and their maximums (b) during a single-phase short circuit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

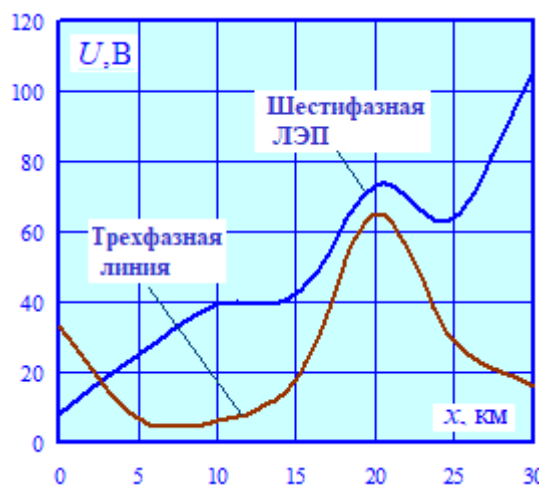


Рис. 9. Наведенные напряжения в неполнофазном режиме при нагрузках на приемном конце $100 + j50$ МВ·А на фазу

Fig. 9. Induced voltages in open-phase mode with loads at the receiving end of $100 + j50$ MVA per phase

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

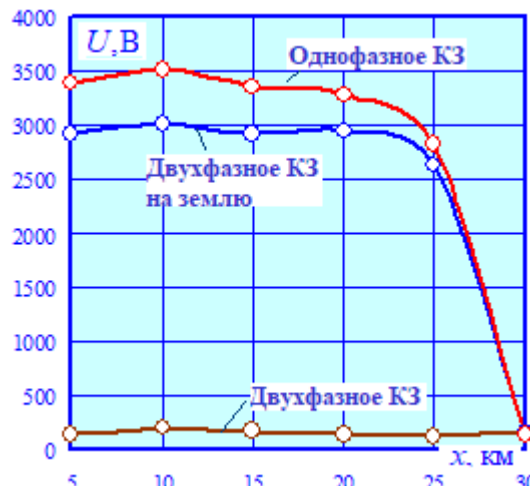


Рис. 10. Сравнение максимумов наведенных напряжений при различных видах КЗ на шестифазной ЛЭП

Fig. 10. Comparison of induced voltage maxima for different types of short circuits on a six-phase power transmission line

Заключение (Conclusions)

Применяемый подход к расчету наведенных напряжений отличается универсальностью и может использоваться для определения режимов в сетях различной конфигурации; представленные в статье модели могут быть полезными в практике проектирования участков совместного прохождения перспективных ЛЭП шестифазной конструкции и трубопроводов при планировании мероприятий по обеспечению безопасной работы обслуживающего персонала.

Научная новизна представленных результатов состоит в использовании оригинальных алгоритмов определения электромагнитных влияний ШФ ЛЭП на трубопроводы [30], базирующейся на применении фазных координат. Методика распространяется на мультифазные ЛЭП других конструкций, например, четырех-, девяти-, двенадцатифазных и др. [29].

Литература

1. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками / Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Т. 22. № 6. 2020. С. 3-15.
2. Гершенгорн А. И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. № 8. 1994. С. 67-70.
3. Королев А.Н., Куликов К.В., Коротков В.В. Особенности построения многофазных ЛЭП // Повышение эффективности работы энергосистем. Иваново, 2001. С. 108-111.
4. Суслов В.М. Определение матрицы обобщенных параметров несимметричной многофазной линий электропередачи // Проблемы региональной энергетики. № 1. 2005. С. 74-77.
5. Самородов Г. И. Четырехфазные электропередачи. // Известия РАН «Энергетика». № 6. 1995. С. 101–108.
6. Москалев Ю.В. Повышение эффективности транспорта электроэнергии с использованием трансформаторного преобразователя числа фаз и многофазной линии электропередачи // Проблемы машиноведения. Материалы VII Международной научно-технической конференции. Омск, 2023. С. 13-18.
7. Москалев Ю.В. Моделирование работы трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз с линейной симметричной нагрузкой // Динамика систем, механизмов и машин. Т. 10. № 1. 2022. С. 65-69.
8. Ammar A. Hajjar, M. M. Mansour. Fault location for Six-Phase Transmission Lines based on the wavelet transform of the fault induced high frequency transients. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference. 2007. Publisher: IEEE.
9. M.W. Mustafa, M.R. Ahmad, H. Shareef. Fault analysis on double three-phase to six-phase converted transmission line. 2005 International Power Engineering Conference. 2005. Publisher: IEEE.

10. Hussein Ahmad, M. I. Jambak. Advanced laboratory scale model of high phase conversion power transmission line. 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference. 2008. Publisher: IEEE.
11. Gaurav Kapoor. Six Phase Transmission Line Boundary Protection Using Mathematical Morphology. 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2018. Publisher: IEEE.
12. M. W. Mustafa, M. R. Ahmad. Transient Stability Analysis of Power System with Six-Phase Converted Transmission Line. 2006 IEEE International Power and Energy Conference. 2006. Publisher: IEEE.
13. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Gosh. LSTM Classifier Based Fault Detection and Classification Scheme for 1-Open Conductor Faults in Six-Phase Transmission Line. 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). 2024. Publisher: IEEE.
14. Gaurav Kapoor, Rabindra Nath Shaw. SWT-Based Fault Recognition Technique for Six-Phase Transmission System. 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2020 Publisher: IEEE.
15. M.A.B Sidik, H. Ahmad, Z.A. Malek, Z. Buntat, N. Bashir, M.I.A. Zarin, M.A.B Sidik, Z. Nawawi, M.I. Jambak. Induced voltage on objects under six-phase transmission line. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference. 2011. Publisher: IEEE.
16. Jong-Ian Tsai, Rong-Ching Wu, Tung-Sheng Zhan, Ting-Chia Ou, Wen-Yang Li, Yong-Nong Chang. Turbine-generator blade and shaft torsional torques due to line faults in six-phase transmission systems evolved from three-phase double-circuit line systems. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009. Publisher: IEEE.
17. S.O. Faried, S. Al-Senaidi, S. Upadhyay. Impact of fault clearing and high-speed reclosing of six phase transmission line faults on turbine-generator shaft torsional torques. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502). 2001. Publisher: IEEE.
18. Gaurav Kapoor, Anamika Yadav. A Single-Terminal Hybrid Scheme for Six-Phase Transmission Line Protection. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). 2020. Publisher: IEEE.
19. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Fuzzy Logic based Fault Detection and Classification scheme for Series Faults in Six Phase Transmission Line. 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). 2021. Publisher: IEEE.
20. Maneesh Verma, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Application of Fuzzy Logic for Fault Detection and Classification in Six Phase Transmission Line. 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). 2017. Publisher: IEEE.
21. Tuan Mohd Ikhwan Bin Tuan Yacob, Zuhaina Binti Zakaria, Noraliza Binti Hamzah. Study of six phase transmission line using the autotransformer conversion. 2011 IEEE Student Conference on Research and Development. 2011. Publisher: IEEE.
22. Shanker Warathe, R N Patel. Six-phase transmission line over current protection by numerical relay. 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems. 2015. Publisher: IEEE.
23. Sunil Kumar Shukla, Murli Manohar, Chintan Patel, Tarun Tailor, Arun Rathore. A Combined S-transform and Ensemble of DT based Protection scheme for six-phase transmission line. 2023 International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE). 2023. Publisher: IEEE.
24. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Tallat. Wavelets for six-phase transmission lines relaying: fault classification and phase selection. 11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.02CH37379). 2002. Publisher: IEEE.
25. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Talaat, S.O. Faried. Distance protection for six-phase transmission lines based on fault induced high frequency transients and wavelets. IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373). 2002. Publisher: IEEE.
26. G. Chandra Sekhar. A complete logic-based backup protection scheme for three and six phase transmission system by using negative sequence currents. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. 2017. Publisher: IEEE.
27. V. Salehi, M. Jaefary, H. Lesani, E. Mostery. A comparative study of tripping and reclosing schemes for six-phase transmission line considering transient stability. 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. 2009. Publisher: IEEE.
28. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. унта. 2005. 273 с.
29. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Тхао Ван Лэ. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи. Иркутск : ИрГУПС, 2020. 296 с.

30. Крюков А. В., Черепанов А. В., Крюков А. Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Иркутск : ИрГУПС, 2022. 188 с.

31. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.

Авторы публикации

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Сулов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ»; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. E-mail: dr.soulov@yandex.ru.

Крюков Александр Егорович – ассистент кафедры электрических станций Иркутского национального исследовательского технического университета.

References

1. Power Factor Correction in Power Supply Systems with Multiphase Nonlinear Loads / Egorov D.E., Dovgun V.P., Boyarskaya N.P. [et al.] // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. Vol. 22. No. 6. 2020. Pp. 3-15.
2. Gershengorn A.I. Multiphase High and Ultra-High Voltage Power Transmission Lines // Electric Power Stations. No. 8. 1994. Pp. 67-70.
3. Korolev A.N., Kulikov K.V., Korotkov V.V. Features of the Construction of Multiphase Power Transmission Lines // Improving the Efficiency of Power Systems. Ivanovo, 2001. Pp. 108-111.
4. Suslov V.M. Definition of the Matrix of Generalized Parameters of an Asymmetrical Multiphase Power Transmission Line // Problems of Regional Power Engineering. № 1. 2005. P. 74-77.
5. Samorodov G. I. Four-phase power transmission. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences "Power Engineering". № 6. 1995. Pp. 101–108.
6. Moskalov Yu. V. Increasing the efficiency of electric power transportation using a transformer phase converter and a multi-phase power transmission line // Problems of Mechanical Engineering. Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference. Omsk, 2023. P. 13-18.
7. Moskalov Yu. V. Modeling the operation of a three-phase-multiphase transformer phase converter with a linear symmetrical load // Dynamics of systems, mechanisms and machines. Vol. 10. № 1. 2022. P. 65-69.
8. Ammar A. Hajjar, M. M. Mansour. Fault location for Six-Phase Transmission Lines based on the wavelet transform of the fault induced high frequency transients. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference. 2007. Publisher: IEEE.
9. M.W. Mustafa, M.R. Ahmad, H. Shareef. Fault analysis on double three-phase to six-phase converted transmission line. 2005 International Power Engineering Conference. 2005. Publisher: IEEE.
10. Hussein Ahmad, M. I. Jambak. Advanced laboratory scale model of high phase conversion power transmission line. 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference. 2008. Publisher: IEEE.
11. Gaurav Kapoor. Six Phase Transmission Line Boundary Protection Using Mathematical Morphology. 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2018. Publisher: IEEE.
12. M. W. Mustafa, M. R. Ahmad. Transient Stability Analysis of Power System with Six-Phase Converted Transmission Line. 2006 IEEE International Power and Energy Conference. 2006. Publisher: IEEE.
13. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Gosh. LSTM Classifier Based Fault Detection and Classification Scheme for 1-Open Conductor Faults in Six-Phase Transmission Line. 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). 2024. Publisher: IEEE.

14. Gaurav Kapoor, Rabindra Nath Shaw. SWT-Based Fault Recognition Technique for Six-Phase Transmission System. 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2020 Publisher: IEEE.
15. M.A.B Sidik, H. Ahmad, Z.A. Malek, Z. Buntat, N. Bashir, M.I.A. Zarin, M.A.B Sidik, Z. Nawawi, M.I. Jambak. Induced voltage on objects under six-phase transmission line. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference. 2011. Publisher: IEEE.
16. Jong-Ian Tsai, Rong-Ching Wu, Tung-Sheng Zhan, Ting-Chia Ou, Wen-Yang Li, Yong-Nong Chang. Turbine-generator blade and shaft torsional torques due to line faults in six-phase transmission systems evolved from three-phase double-circuit line systems. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009. Publisher: IEEE.
17. S.O. Faried, S. Al-Senaidi, S. Upadhyay. Impact of fault clearing and high-speed reclosing of six phase transmission line faults on turbine-generator shaft torsional torques. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502). 2001. Publisher: IEEE.
18. Gaurav Kapoor, Anamika Yadav. A Single-Terminal Hybrid Scheme for Six-Phase Transmission Line Protection. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). 2020. Publisher: IEEE.
19. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Fuzzy Logic based Fault Detection and Classification scheme for Series Faults in Six Phase Transmission Line. 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). 2021. Publisher: IEEE.
20. Maneesh Verma, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Application of Fuzzy Logic for Fault Detection and Classification in Six Phase Transmission Line. 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). 2017. Publisher: IEEE.
21. Tuan Mohd Ikhwan Bin Tuan Yacob, Zuhaina Binti Zakaria, Noraliza Binti Hamzah. Study of six phase transmission line using the autotransformer conversion. 2011 IEEE Student Conference on Research and Development. 2011. Publisher: IEEE.
22. Shanker Warathe, R N Patel. Six-phase transmission line over current protection by numerical relay. 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems. 2015. Publisher: IEEE.
23. Sunil Kumar Shukla, Murli Manohar, Chintan Patel, Tarun Tailor, Arun Rathore. A Combined S-transform and Ensemble of DT based Protection scheme for six-phase transmission line. 2023 International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE). 2023. Publisher: IEEE.
24. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Tallat. Wavelets for six-phase transmission lines relaying: fault classification and phase selection. 11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.02CH37379). 2002. Publisher: IEEE.
25. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Talaat, S.O. Faried. Distance protection for six-phase transmission lines based on fault induced high frequency transients and wavelets. IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373). 2002. Publisher: IEEE.
26. G. Chandra Sekhar. A complete logic-based backup protection scheme for three and six phase transmission system by using negative sequence currents. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. 2017. Publisher: IEEE.
27. V. Salehi, M. Jaefary, H. Lesani, E. Mostery. A comparative study of tripping and reclosing schemes for six-phase transmission line considering transient stability. 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. 2009. Publisher: IEEE.
28. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk University Press. 2005. 273 p.
29. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Thao Van Le. Complex modeling of multiphase, multi-circuit and compact power transmission lines. Irkutsk, 2020. 296 p.
30. Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Kryukov A. E. Modeling of electromagnetic influences of power transmission lines and traction networks on extended metal structures. Irkutsk, 2022. 188 p.
31. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.

Authors of the publication

Andrey V. Kryukov – Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia;
National Research University "MEI", Moscow, Russia. E-mail: *dr.souslov@yandex.ru*.

Aleksandr E. Kryukov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **18.09.2024 г.**

Отредактировано **02.10.2024 г.**

Принято **10.10.2024 г.**