

05.20.00 ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

05.20.02

УДК 621.311.00

**ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ НЕСИММЕТРИИ НА ИНДУЦИРОВАННУЮ ЭДС
РЕМОНТИРУЕМЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

© 2019

Акрамжан Одилович Мирзаабдуллаев, инженер,

главный эксперт отдела технического аудита оборудования электрических сетей

*АО «Техническая инспекция ЕЭС», г. Москва (Россия)**Александр Леонидович Куликов*, доктор технических наук, профессор кафедры

«Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

*Нижегородский государственный технический**университет им. П. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород (Россия)**Борис Васильевич Папков*, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификация и автоматизация»*Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино (Россия)***Аннотация**

Введение: существующие Правила охраны труда при эксплуатации электроустановок (далее Правила) практически не сняли проблему с наведенным напряжением (НН) на отключенных воздушных линиях (ВЛ) электропередачи. В них НН рассматривается упрощенно, без корректного учета схем заземления и значений параметров, взаимодействующих ВЛ, электрифицированных железных дорог и других протяженных токопроводов. В Правилах не разделяются понятия ЭДС и падение напряжения на участке рассматриваемой цепи при наличии электрической связи провод–опора–земля. Не анализируются условия возникновения и возможные значения наводимых ЭДС, а также соответствующие уровни НН, которые в конечном итоге определяются сопротивлением элементов и схем заземления отключенной линии.

Материалы и методы: цель статьи – исследование наводимых ЭДС на провода электротехнического комплекса ВЛ, их зависимость от несимметрии влияющих трехфазных систем, а также анализ ремонтных режимов и соблюдение требований безопасности при производстве работ. Доказано, что влияние на отключенную ВЛ трехфазной симметричной линии зависит от степени пространственной несимметрии.

Результаты: разработана физическая модель двухцепной ВЛ. Определена зависимость наведенных эквивалентных ЭДС от величины тока и симметричности нагрузок на проводах влияющей ВЛ. Исследована зависимость угла наклона потенциальной характеристики провода отключенной ВЛ, находящегося под НН, от сопротивления ВЛ и контуров заземления. Установлена зависимость тангенса угла от соотношения сопротивлений контуров заземления и ВЛ. Доказана ошибочность утверждения об одинаковости угла наклона потенциальных линий на отключенной ВЛ и независимости их от наличия, количества и мест установки заземлителей.

Обсуждение: регламентируемые в Правилах и проводимые в соответствии с Методическими указаниями измерения НН при отключенной и заземленной на рабочем месте ВЛ позволяют определить лишь наименьшие (остаточные) из возможных значений НН для конкретной конфигурации взаимодействующих в данный момент. Принято считать, что при наличии заземления хотя бы на одной точке ВЛ емкостная составляющая НН пренебрежительно мала, а величина НН зависит только от тока влияющих линий. Рекомендовано производить пропорциональный перерасчет измеренного НН при заданных значениях влияющего тока на его максимально возможные значения.

Заключение: воздействие влияющей ВЛ на отключенную линию происходит при несимметрии фазных токов в месте расположения проводов отключенной ВЛ. НН определяется некомпенсированной частью переменных электромагнитных полей фазных токов влияющей ВЛ. Значения потенциалов зависят от соотношения сопротивлений проводов ВЛ, вариантов реализации заземления подстанций, мест установки и сопротивлений переносных заземлений. Величины наводимых продольных ЭДС имеют обратную зависимость от расстояния между осями ВЛ.

Ключевые слова: воздушная ЛЭП, заземление ВЛ, не симметрии фазных токов, наведенная ЭДС, потенциальная характеристика проводов.

Для цитирования: Мирзаабдуллаев А.О., Куликов А. Л., Папков Б. В. Влияние фазовой несимметрии на индуцированную ЭДС ремонтируемых воздушных линий электропередачи // Вестник НГИЭИ. 2019. № 3 (94). С. 5–17.

THE EFFECT OF PHASE UNBALANCE ON INDUCED EMF THE REPAIR OF OVERHEAD POWER LINES

© 2019

Akramzhan Odilovich Mirzaabdullaev, engineer,
Chief expert, department of technical audit of equipment of electric networks
JSC «Technical Inspection UES», Moscow (Russia)
Aleksandr Leonidovich Kulikov, Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the chair «Electricity, power supply and power electronics»
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod (Russia)
Boris Vasilievich Papkov, Dr. Sci. (Engineering),
professor of the chair «Electrification and automation»
Nizhny Novgorod state engineering-economic university, Knyaginino (Russia)

Abstract

Introduction: the existing Rules of labor protection in the operation of electrical installations (hereinafter the Rules) practically did not remove the problem with induced voltage (NN) on disconnected air lines (VL) of electrical transmission. In them, the LV is considered in a simplified way, without the correct account of the grounding schemes and the values of the parameters interacting with the overhead line, electrified Railways and other extended current pipelines. The Rules do not separate the concept of EMF and voltage drop in the area of the circuit in the presence of an electrical connection wire–support–ground. The conditions of occurrence and possible values of induced EMF, as well as the corresponding levels of LV, which are ultimately determined by the resistance of the elements and grounding schemes of the disconnected line, are not analyzed.

Materials and methods: the purpose of the article is to study the induced EMF on the wires of the electrical complex of overhead lines, their dependence on the asymmetry of the affecting three – phase systems, as well as the analysis of repair modes and compliance with safety requirements in the production of works. It is proved that the influence of three-phase symmetric line on the disconnected overhead line depends on the degree of spatial asymmetry.

Results: the physical model of two-chain overhead line is developed. The dependence of the induced EMF is equivalent to the magnitude of the current and the symmetry of the loads on the wires of the influence of VL. The dependence of the angle of inclination of the potential characteristics of the wire disconnected overhead line, located under the LV, on the resistance of the overhead line and ground loops. The dependence of the angle tangent on the ratio of the resistance of the ground circuits and overhead lines is defined. It is proved the fallacy of the assertion that the uniformity of the tilt angle of the potential lines VL to disabled and independence from the availability, quantity and place of installation of earthing.

Discussion: regulated in the Rules and carried out in accordance with the Guidelines of the measurement of LV when disconnected and grounded in the workplace VL, allow us to determine only the smallest (residual) of the possible values of LV for a specific configuration of interacting at the moment. It is considered that in the presence of grounding at least one point of the overhead line capacitive component of the LV is negligibly small, and the value of the LV depends only on the current of the influencing lines. It is recommended to make proportional recalculation of the measured LV at the set values of the influencing current on its maximum possible values.

Conclusion: the effect of the influencing VL on the disconnected line occurs at the asymmetry of phase currents in the location of the wires of the disconnected VL. HH is determined by the uncompensated part of the alternating electromagnetic fields of phase currents affecting the overhead line. The values of potentials depend on the ratio of the resistance of the wires of overhead lines, embodiments of earthing of substations, installation locations and resistances of grounding devices. The values of induced longitudinal EMF are inversely related to the distance between the axes of the overhead line.

Keywords: overhead power lines, grounding overhead lines, unbalanced phase currents, induced EMF, potential characteristics of the wires.

For citation: Mirzaabdullaev A. O., Kulikov A. L., Papkov B. V. Effect of phase asymmetry on induced EMF of repaired overhead power lines // Bulletin NGIEI. 2019. № 3 (94). P. 5–17.

Введение

Введение новых Правил охраны труда при эксплуатации электроустановок (далее Правила) [1] практически не сняло остроту проблем с наведенным напряжением (НН) на отключенных воздушных линиях (ВЛ) электропередачи. В новых Правилах (как и во всех предшествующих редакциях) НН рассматривается упрощенно, без корректного учета схем заземления и значений параметров, взаимодействующих ВЛ, электрифицированных железных дорог и других протяженных инженерных коммуникаций (трубопроводов, токопроводов, кабельных линий и др.). Наведённое напряжение принимается как локальное явление на рабочем месте, как разность потенциалов между заземляющим устройством (переносным заземлителем (ПЗ) проводов ВЛ) и отдаленной точкой земли с нулевым потенциалом (относительная земля) [1; 2; 3; 4; 5]. По существу, за НН выдается значение «ожидаемого напряжения прикосновения» [6] к заземленным проводам (грозозащитным тросам) на месте производства работ на ВЛ.

Целью статьи является исследование наводимых ЭДС на провода электротехнического комплекса ВЛ, их зависимость от несимметрии влияющих трехфазных систем, а также анализ ремонтных режимов и соблюдение требований безопасности при производстве работ.

Материалы и методы

Влияние действующих ВЛ на отключенную линию выражается в наведении на её проводах (грозозащитных тросах) переменных продольных (индуктивная составляющая) и поперечных (ёмкостная составляющая) электродвижущих сил (наведённые ЭДС), соответствующих промышленной частоте. В результате сложного сочетания воздействий этих ЭДС и схем заземления ремонтируемой ВЛ на токопроводящих элементах последней возникают наведенные токи, вызывающие падение напряжения на сопротивлении между рассматриваемыми точками цепи. Теоретические аспекты этой проблемы исследовались многими авторами [7; 8; 9; 10; 11; 12; 13] и продолжают исследоваться [14; 15; 16; 17].

Несмотря на проведение рядом авторов критического анализа [18; 19; 20; 21], в существующих Правилах [1] не разделяются понятия ЭДС и падение напряжения на участке рассматриваемой цепи при наличии электрической связи провод–опора–земля. Следовательно, НН в принятой Правилами трактовке имеет локальное проявление на месте проведения работ на ВЛ за счёт действия продольно-поперечных ЭДС, зависящих от параметров, взаимодействующих ВЛ. При этом не анализируются

условия возникновения и возможные значения наводимых ЭДС, а также соответствующие уровни НН, которые в конечном итоге определяются сопротивлением элементов и схемами заземления отключенной линии [20; 21].

Регламентируемые в Правилах [1] и проводимые в соответствии с Методическими указаниями [22] измерения величин НН на проводах ВЛ, когда линия отключена и заземлена на рабочем месте, позволяют определить лишь минимальные (остаточные) из возможных значений НН для конкретной конфигурации взаимодействующих в данный момент ЛЭП. В ряде публикаций [2; 4; 5] принято, что при наличии заземления хотя бы на одной точке ВЛ ёмкостная составляющая НН пренебрежительно мала, а НН $U_{\text{нав}}$ зависит только от тока влияющих ЛЭП. На этом основании рекомендовано производить пропорциональный перерасчет измеренной величины НН $U_{\text{нав}}$ при заданных значениях влияющего тока на его максимально возможные значения по формуле:

$$U_{\text{нав}} = U_{\text{изм}} \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{тек}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{тек}}$ – ток нагрузки на влияющей линии в момент проведения измерений; $I_{\text{макс}}$ – максимально возможный ток на влияющей линии; $U_{\text{изм}}$ – измеренное значение НН.

Анализ трехфазной симметрии линии электропередачи

Известно, что трехфазный ток (напряжение) в нормальном режиме представляется симметричной системой векторов токов (напряжений), имеющих равные значения амплитуды, сдвинутые на 120° по фазе. Для корректного учета несимметрии влияющих токов наводимой ЭДС целесообразно их рассматривать относительно перпендикулярной плоскости к оси проводов линии. К этой плоскости векторы токов также будут перпендикулярны, а их направления будут отличаться друг от друга и циклически изменяться с частотой 50 Гц. Однако для протяжённых ВЛ, как правило, существует значительное различие индуктивностей и ёмкостей фазных проводов, которое приводит к появлению токов небаланса (токов нулевой и обратной последовательности). Величина их существенно снижается путем периодической транспозиции фаз.

В рассматриваемой плоскости относительно осей проводов, расположенных по вершинам равностороннего треугольника в пространстве (рисунков 1, а), существует точка, где из-за взаимной компенсации результирующее значение индукции магнитных (электрических) полей этих проводов равно нулю. Назовём эту точку центром симметрии «0».

При любом другом варианте расположения проводов трехфазной системы (рисунок 1, б, в) и в любой другой точке пространства суммарное значение по-

лей не равно нулю. Таким образом, в произвольной точке наблюдения проявляется пространственная несимметрия относительно симметричных полей.

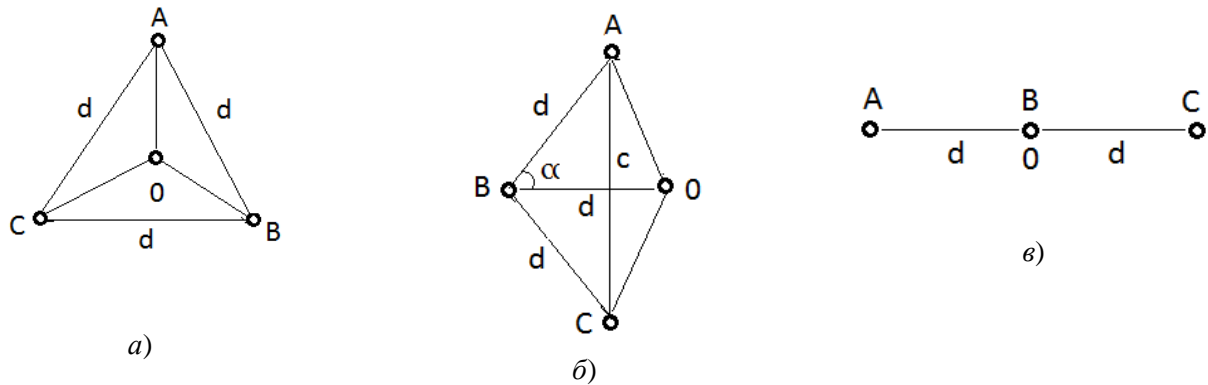


Рис. 1. Центры симметрии «0» трехфазных проводов ВЛ при их различном расположении: а) по вершинам равностороннего треугольника; б) при расположении по схеме «бочка»; в) при горизонтальном расположении проводов

Fig.1. Centers of symmetry «0» three-phase wires of air lines at their various arrangement: а) on tops of an equilateral triangle, б) at arrangement according to the scheme «barrel», в) at horizontal arrangement of wires

Ненулевое результирующее значение суммы полей в центре симметрии возникает при несимметрии в самой системе, то есть при нарушении равенства амплитуд векторов тока (напряжения) или появлении отклонений от заданной системы сдвига фаз. Для произвольной точки наблюдения возможны два вида несимметрии: пространственная (геометрическая) и системная (электромагнитная).

Обсуждение

Важными факторами, определяющими характер наводимой ЭДС на провода отключенной ЛЭП, являются не только величины фазных токов влияющей линии, но и степень их несимметрии относительно точек наблюдения или места расположения осей проводов отключенной ВЛ.

В действующей трехфазной системе электрическая симметрия достаточно стабильна, поскольку она обеспечивается технически (конструктивно). Поэтому в большинстве случаев имеет место пространственная несимметрия. Наиболее частое проявление пространственной несимметрии заключается в наличии некомпенсированного переменного электромагнитного поля вблизи действующих ВЛ, на проводах которых действуют пофазносимметрированные напряжения и токи. НН на параллельно расположенных ВЛ проявляется тогда, когда на проводах, отключенных ЛЭП индуцируются переменные электромагнитные (продольные) и электростатические (поперечные) ЭДС. Поэтому для их корректного учёта необходимо рассматривать отключённую ВЛ при различных схемах её заземления, а также принимать во внимание то, что на ра-

бочем месте это действие проявляется как напряжение прикосновения.

Если принять за параметр для симметричной системы среднегеометрическое расстояние между фазными проводами h , то в зависимости от расположения проводов на опорах ВЛ (рисунок 1) возможны следующие значения параметра h :

$$а) h_{тр} = \sqrt[3]{d \times d \times d} = d ; б) h_{боч} = \sqrt[3]{d \times d \times c} = \sqrt[3]{d \times d \times 2d \sin \alpha} = d \sqrt[3]{2 \sin \alpha} ; в) h_{гор} = \sqrt[3]{d \times d \times 2d} = d \sqrt[3]{2},$$

где d – междуфазные расстояния; c – расстояния между фазами A и C (рис. 1, б); α – половина угла между лучами, исходящими от фазы B к фазам A и C (рис. 1, б).

Установлено, что уровень несимметрии при перемещении точки наблюдения x от центра симметрии «0» сначала растёт, а затем убывает. На участке перемещения $x \in \{0; h\}$ несимметрия существует и максимально проявляется при приближении к одной из трех фаз, а при удалении $x \gg h$ – убывает.

Указанному явлению способствуют два обстоятельства: 1) при удалении точки наблюдения k от центра симметрии «0» и приближении к одной из фаз нарушается взаимная компенсация полей, что приводит к возникновению некомпенсированной индукции переменного магнитного поля; 2) дальнейшее перемещение точки k на расстояние x , более чем на значение параметра системы h ($x \gg h$), приведет к постепенному восстановлению взаимной компенсации индукции магнитных полей фаз (рисунок 2).

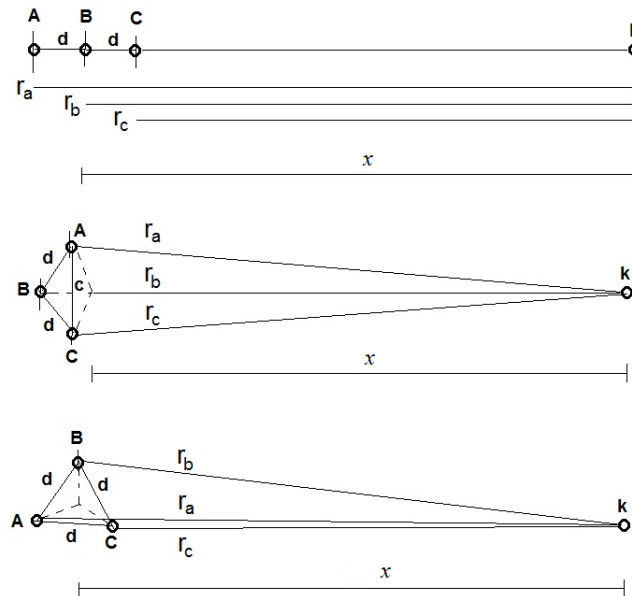


Рис. 2. Пояснения к зависимости степени несимметрии от расстояния между взаимодействующими проводами ВЛ трехфазной сети
 Fig. 2. Explanations to the dependence of the degree of asymmetry on the distance between the interacting wires of the three-phase network

Проявление пространственной несимметрии

Модуль индукции магнитного поля B одиночного бесконечно длинного прямолинейного проводника с током I имеет обратно пропорциональную зависимость от расстояния x относительно оси провода [23]

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн м}^{-1}$ – магнитная проницаемость вакуума, $\pi = 3,14$.

Зависимость наводимой ЭДС E на проводе длиной L отключенной ВЛ от тока I промышленной частоты, протекающего в одиночном бесконечно длинном влияющем проводе, имеет логарифмическую зависимость от расстояния x между ними

$$E(x, t) = \frac{\mu_0 L}{2\pi} \left(\ln \frac{2L}{x} - 1 \right) \omega I \cos(\omega t), \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Зависимость наводимой ЭДС от симметричного трехфазного переменного тока I промышленной частоты на рассматриваемом параллельном проводе длиной L и расположенном на расстоянии x от влияющей трехфазной ВЛ имеет вид

$$E(x, t) = \frac{h}{xT} \mu_0 L I \left(\ln \frac{2L}{x} - 1 \right) \cos(\omega t). \quad (4)$$

В отличие от (3) наводимая ЭДС между взаимодействующими проводами ВЛ при влиянии трехфазного тока (4) убывает сильнее при возрастании x , чем при воздействии однофазного тока. Такая зависимость определяется произведением логарифмической и обратной функций в (4). Таким образом, для трехфазной сети уровень наводимой ЭДС имеет большую зависимость от степени несимметрии (h/x) и сильнее убывает при возрастании x .

Физическая модель для исследования электромагнитной несимметрии

Поскольку на комплексе действующих ВЛ полные исследования несимметричных режимов практически невозможны, проведены эксперименты на физической модели двухцепной ВЛ, представляющей восемь параллельно проложенных изолированных алюминиевых проводов длиной 10 м, сечением $2,5 \text{ мм}^2$ и закрепленных на изолирующих конструкциях так, как на двухцепных опорах, по типу «бочки». Один из проводов проложен в нижней части условных опор и замещает землю с нулевым потенциалом (рисунок 3).

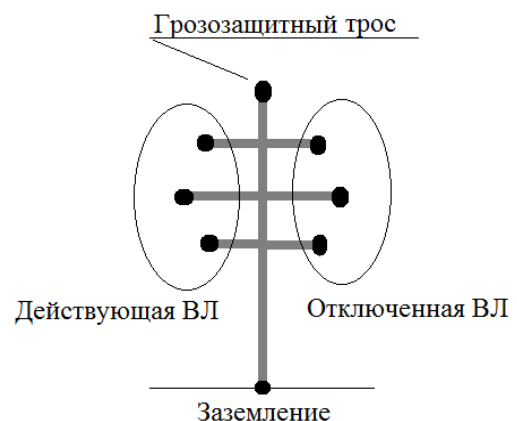


Рис. 3. Тип опоры и расположения проводов и грозозащитного троса на физической модели ВЛ

Fig. 3. Type of support and location of wires and lightning cable on the physical model of the overhead line

Принципиальная схема физической модели двухцепной ВЛ показана на рисунке 4.

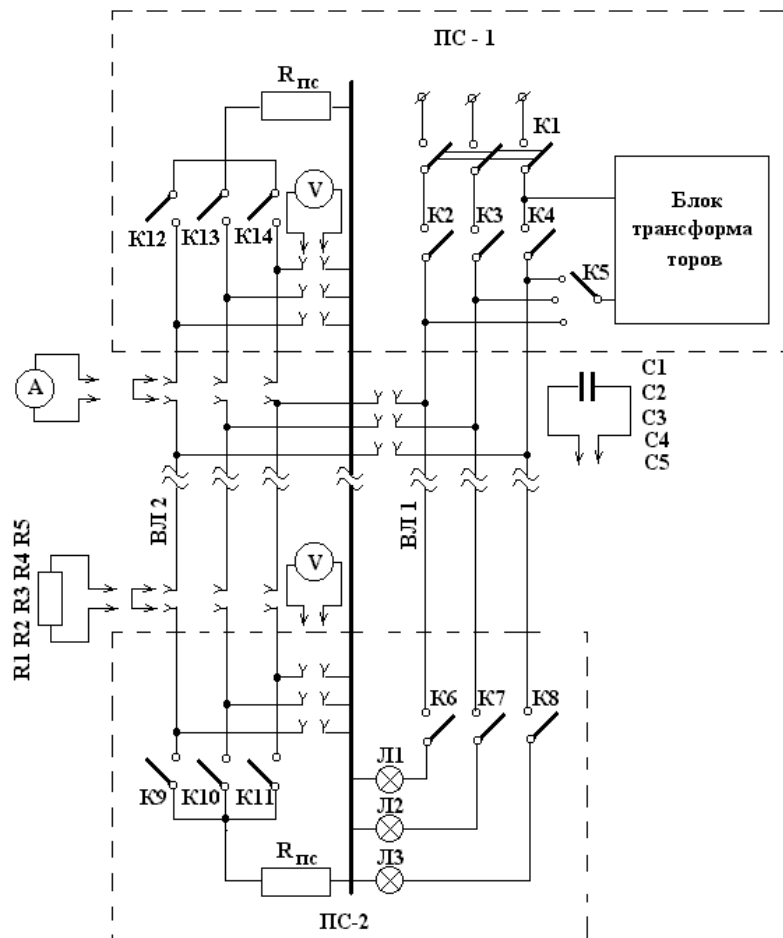


Рис. 4. Схема экспериментальной установки – физической модели двухцепной ВЛ
 Fig. 4. Scheme of the experimental setup – a physical model of a two-chain overhead line

На концах проводов предусмотрены переключатели для создания различных режимов влияющей ВЛ-1 и клеммники для изменения схемы заземления и измерения НН на отключенной линии ВЛ-2. К концам проводов отключенной ВЛ-2 возможно присоединение сопротивления 0,5 Ом для имитации сопротивления заземляющих устройств подстанций. Для изменения собственных сопротивлений проводов отключенной ВЛ-2 в двух точках предусмотрены места присоединения сопротивлений. К ним подключается миллиамперметр для измерения наведенного тока. На влияющую ВЛ-1 на ПС-1 (источник питания) подается трёхфазное напряжение 220/380 В частотой 50 Гц, а также однофазное напряжение 750 В от блока трансформаторов для создания однофазного тока высокого напряжения. На ПС-2 (потребитель) предусмотрено пофазное подключение нагрузок – ламп накаливания Л1, Л2, Л3 от 100 до 400 Вт. Для создания режима однофазного короткого замыкания нагрузка может быть увеличена до 1200 Вт. В схеме предусмотрено увеличение ёмкост-

ной связи между проводами ВЛ-1 и ВЛ-2 пофазным подключением между ними трех комплектов конденсаторов напряжением 500 В, ёмкостью 0,1 мкФ, 0,5 мкФ и 1 мкФ в каждом комплекте.

Результаты проведенных экспериментов

В процессе экспериментов на физической модели определена зависимость наведенных эквивалентных ЭДС от величины тока и симметричности нагрузок на проводах влияющей ВЛ.

Исследована зависимость угла наклона α потенциальной характеристики провода, отключенной ВЛ-2, находящегося под НН, от величины сопротивления ВЛ ($Z_{ВЛ}$) и контуров заземления на ПС ($R_{ПС}$).

Установлена зависимость тангенса угла α от соотношения $R_{ПС} / (Z_{ВЛ} + 2R_{ПС})$ (таблица 1).

Полученная характеристика иллюстрирует ошибочность утверждения [24] одинаковости угла наклона потенциальных линий на отключенной ВЛ и независимости их от наличия, количества и мест установки заземлителей.

Таблица 1. Зависимость угла наклона потенциальной характеристики от сопротивления элементов контура

Table. 1 The dependence of the slope angle of the potential characteristics of the resistance of the elements of the circuit

Опыт / Experience	$E_{эм}$, мВ	$R_{пс}$, Ом	$Z_{л}$, Ом	$I_{эм}$, мА	$U_{Rпс}$, мВ	Угол наклона, α / Tilt angle, α
1	450	2,0	6,2	0	450	77°
2	450	2,0	6,2	44,1	88,2	60°
3	450	1,5	6,2	48,9	73,4	55°
4	450	1,0	6,2	54,9	54,9	48°
5	450	0,5	6,2	62,5	31,25	32°
6	450	0,5	46,2	9,5	4,75	3°

Примечание: $E_{эм}$ – измеренное значение продольной ЭДС; $I_{эм}$ – измеренное значение тока электромагнитной индукции продольной ЭДС; $U_{Rпс}$ – заданное значение сопротивления заземляющего устройства ПС

Таблица 2. Результаты замеров эквивалентной продольной ЭДС при изменении токов влияющей ВЛ

Table 2. The results of measurements of the equivalent longitudinal EMF with changing currents affecting OPL

№ п/п / Item number	Нагрузка фаз P, Вт/ Phase load P, W			Суммарная мощность N, Вт / Total power N, W	Не компенсированная мощность ΔN , Вт / Not compensated power ΔN , W	$E(x)$, мВ
	A	B	C			
1	-	100	-	100	100	38
2	-	200	-	200	200	76
3	-	300	-	300	300	114
4	-	400	-	400	400	152
5	100	100	100	300	0	0
6	200	200	200	600	0	0
7	300	300	300	900	0	0
8	400	400	400	1200	0	0
9	100	-	100	200	100	38
10	-	100	200	300	$\sqrt{3} \cdot 100$	63
11	100	200	100	400	100	38
12	300	100	100	500	200	76
13	100	200	300	600	$\sqrt{3} \cdot 100$	63
14	400	100	100	600	300	114
15	300	200	200	700	100	38
16	500	100	100	700	400	152
17	300	200	300	800	100	38
18	400	200	200	800	200	76
19	600	100	100	800	500	190
20	400	300	200	900	$\sqrt{3} \cdot 100$	63
21	500	300	100	900	$2\sqrt{3} \cdot 100$	126

В таблице 2 приведены результаты замеров эквивалентной продольной ЭДС при изменении токов влияющей ВЛ.

В первых 4-х опытах получены результаты измерения наведенной ЭДС при воздействии однофазного тока различной величины. Установлено, что значение наведенных ЭДС линейно зависит от величины влияющего тока.

В следующей группе (опыты 5–8) замеры продольной ЭДС проведены для влияющих трех-

фазных токов при возрастающей мощности нагрузки от 300 до 1 200 Вт и сохранении симметрии. Несмотря на увеличение мощности нагрузки, при сохранении симметрии фаз ток небаланса остаётся равным нулю, что объясняется взаимной компенсацией переменных магнитных полей фазных токов и нулевым значением продольной наведенной ЭДС.

В третьей группе (опыты 9–17) изменялись мощности нагрузок без сохранения симметрии фаз-

ных токов. Результаты опытов 9, 11, 15 показывают, что независимо от влияющего тока, значение наведенной продольной ЭДС остается неизменным и определяется только некомпенсированной частью влияющего тока. Здесь отчетливо прослеживается закономерность: чем больше несимметрия в фазных токах, тем больше продольная наведенная ЭДС.

Полученные результаты проиллюстрированы векторными диаграммами фазных токов. При одно-

фазном влиянии (опыты 1–4, рисунок 5) наведенная продольная ЭДС линейно зависит от величины тока нагрузки. Только для такого влияния имеет смысл пропорциональный пересчет тока влияния в момент измерения по отношению к максимальному току.

При трехфазном влиянии (рисунок 6) несимметричных токов (опыты 9, 11, 15) результирующее значение векторной суммы токов равно единичному току I .

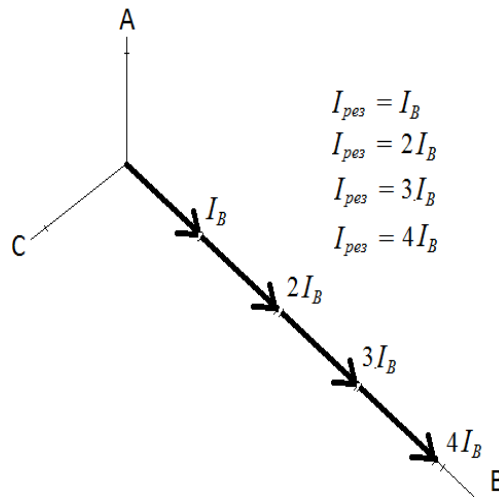


Рис. 5. Диаграмма токов однофазной ВЛ, когда их результирующее значение равно арифметической сумме
 Fig. 5. Diagram of single-phase OPL currents, when their resulting value is equal to the arithmetic sum

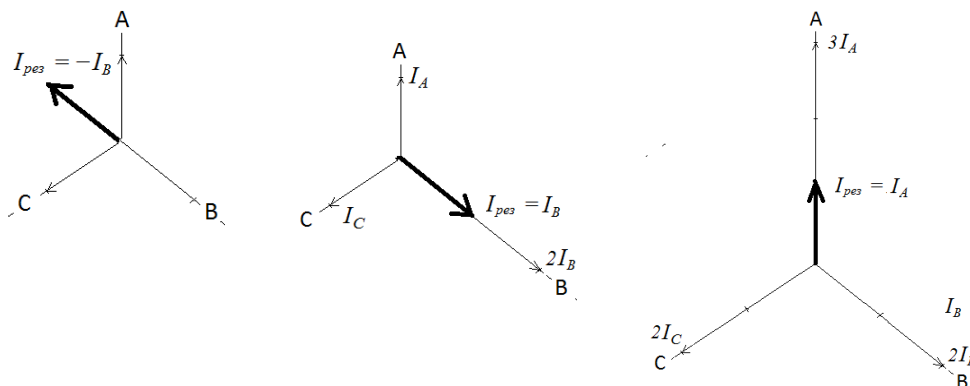


Рис. 6. Результирующее значение влияющего тока равно некомпенсированной части суммарного тока, определяемого векторной суммой
 Fig. 6. The resulting value of the influencing current is equal to the uncompensated part of the total current determined by the vector sum

Результаты опытов 12, 16 показывают, что векторная сумма (рисунок 7, 8) несимметричных токов определяется их некомпенсированной частью.

Заключение

Анализ полученных экспериментальных результатов и выражения (4) выявили наблюдаемую на практике закономерность: чем выше класс напряжения влияющей ВЛ, тем больше и измеряемые величины НН, которые обусловлены не только значениями влияющего тока, но и конструктивными особенностями ЛЭП.

Наведенное напряжение на отключенной ВЛ от электрифицированной железной дороги, которая является однофазной и несимметричной линией переменного тока, фактически линейно зависит от величины влияющего тока. Установлено, что максимальные уровни наведенного напряжения для ВЛ, заземленной по концам, при влиянии однопутного участка железной дороги на расстоянии до 0,6 км и при параллельном следовании на протяжении около 19 км составляет более 170 В [17], что недопустимо по условиям безопасности.

Влияние на отключенную ВЛ трехфазной симметричной линии зависит от степени пространственной несимметрии. При наличии одинаковых влияющих токов для ВЛ более высокого класса напряжения наводится более высокое значение про-

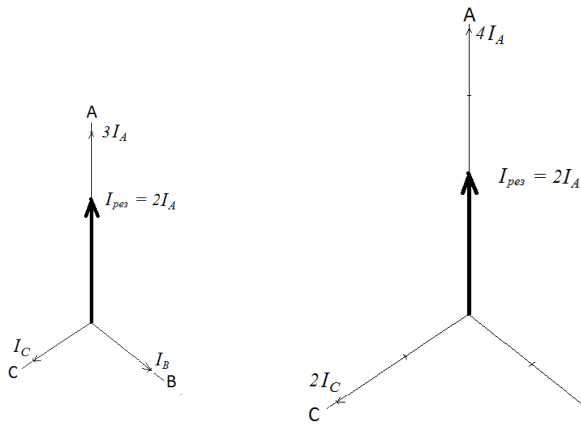


Рис. 7. Векторная сумма фазных токов при несимметрии
Fig. 7. The vector sum of the phase currents with asymmetry

дольной ЭДС из-за большей степени несимметрии. Таким образом, значения параметра несимметрии h тем больше, чем выше класс напряжения, поскольку междуфазные расстояния у таких ВЛ существенно больше.

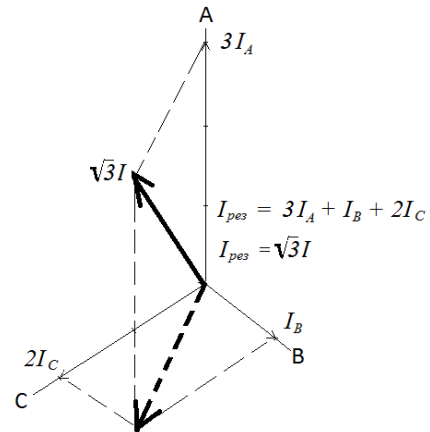


Рис. 8. Результирующее значение фазных токов при сложной несимметрии
Fig. 8. The resulting value of phase currents in complex asymmetry

Выводы

1. Воздействие влияющей ВЛ на отключенную происходит при наличии несимметрии фазных токов в месте расположения проводов отключенной ВЛ. Наведенное напряжение определяется некомпенсированной частью переменных электромагнитных полей фазных токов, влияющей ВЛ.

2. Потенциалы проводов отключенной ВЛ при наличии влияющих действующих линий определяются линейными зависимостями. Значения потенциалов зависят от соотношения сопро-

тивлений проводов ВЛ, вариантов реализации контуров заземления подстанций, а также от мест установки и сопротивлений переносных заземлений на ВЛ.

3. Величина наводимых продольных ЭДС имеет обратную зависимость от расстояния между осями ВЛ. При трехфазном исполнении зависимость является более сложной и характеризуется произведением обратной и логарифмической функций, аргументом которых является расстояния между осями взаимодействующих ВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила охраны труда при эксплуатации электроустановок. Утверждены Приказом Министерства труда и социальной защиты РФ № 328н от 24 июля 2013 г. (в ред. Приказа Минтруда России от 19.02.2016 № 74н). 92 с.
2. Шарандин А. А. Наведенное напряжение и защита от него. М. : НТФ «Энергопрогресс», 2016. 40 с.
3. Методические указания по измерению наведенных напряжений на отключенных ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока. М. : ОРГРЭС, 1993. 12 с.
4. Дикой В. П., Архипов С. А., Алексеев П. А., Лишуды А. В. Воздушные линии электропередачи под наведенным напряжением // Энергетик. 2013. № 8. С. 16–18.
5. Дядищев Б. А. Вакуленко А. А., Шеляженко С. А., Езовит Г. П. Метод безопасного производства работ на ВЛ 110–750 кВ, находящихся под наведенным напряжением // Электрические станции. 1988. № 4. С. 59–62.
6. Правила устройства электроустановок 7-е изд. М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2003. 270 с.
7. Попов В. А., Мисриханов М. Ш., Онищенко А. А., Чередниченко К. В., Кушкова Е. И. Характеристика распределения потенциала наведенного напряжения на отключенной линии // Энергетик. 1994. № 2. С. 17–18.
8. Глушко В. И., Ямный О. Е., Ковалев Э. П., Науменок Н. А. Расчет наведенного напряжения на линиях электропередачи и обеспечение безопасности работ на этих линиях // Электричество. 1997. № 8. С. 13–18.

9. Вакуненко В. А. К вопросу разработки методики расчёта теплоизоляции криогенных хранилищ сжиженного природного газа специальных фортификационных сооружений Министерства обороны Российской Федерации // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева. 2016. № 5. С. 93–98.
10. Тураев В. А., Базанов В. П. О наведенных напряжениях на воздушных линиях при однофазных коротких замыканиях // Электрические станции. 1998. № 3. С. 40–42.
11. Васюра Ю. Ф., Черепанов Г. А., Легконравов В. Л. Исследование наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи // Электрические станции. № 2. 1999. С. 38–45.
12. Кузнецов А. Л. Наведенное напряжение: мифы и реальность // Энергетик. 2009. № 1. С. 14–16.
13. Халилов Ф. Х., Ефимов Б. В. Наведенные напряжения на воздушных линиях электропередач, отключенных для ремонта : учебное пособие. СПб. : ПЭПИК, 2011. 52 с.
14. Буткевич В. Ф., Уразалиев И. Б. Определение наведенного напряжения на отключенных проводах воздушной линии 110 кВ // Энергетик. 2019. № 1. С. 35–38.
15. Чичерин С. В. Повышение надежности и сокращение тепловых потерь путем устройства продольного дренажа на магистральных тепловых сетях города Омска // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2016. № 4 (192). С. 61–66.
16. Чернов И. А., Рубцова Н. Б., Перов С. Ю. Обеспечение безопасности персонала при работах в условиях воздействия электрического поля и наведенного напряжения // Энергетик. 2017. № 9. С. 20–23.
17. Залесова О. В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 40–45.
18. Вантеев А. И. Еще раз о необходимости корректировки межотраслевых правил по охране труда при эксплуатации электроустановок // Энергетик. 2011. № 8.
19. Папков Б. В., Мирзаабдуллаев А. О. О методике определения максимального значения наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // В сб. «Повышение эффективности работы энергосистем» Тр. ИГЭУ, Вып. 6, 2003. С. 315–324.
20. Мисриханов М. Ш., Мирзаабдуллаев А. О. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции. 2008. № 11. С. 44–49.
21. Куликов А. Л., Мирзаабдуллаев А. О. Об оценке наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Энергетик. 2013. № 8. С. 12–15.
22. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ // СТО 56947007-29.240.55.018-2009 Утвержден Распоряжением № 20р ОАО «ФСК ЕЭС» от 22.01.2009. 25 с.
23. Дикой В. П., Токарский А. Ю., Рубцова Н. Б., Мисриханов М. Ш. Элементы теории контурных экранов. Повышение эффективности работы энергосистем. Тр. ИГЭУ. Вып. 4 / Под ред. В. А. Шуина, М. Ш. Мисриханова. М. : Энергоатомиздат, 2001. 432 с.
24. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. М. : Энергоатомиздат, 1984.

Дата поступления статьи в редакцию 19.12.2018, принята к публикации 21.01.2019.

Информация об авторах:

Мирзаабдуллаев Акрамжан Одилович, инженер,
главный эксперт отдела технического аудита оборудования электрических сетей
Адрес: АО «Техническая инспекция ЕЭС», г. Москва, Россия
E-mail: akramzhan2011@yandex.ru

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»
Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 603950, Россия,
Нижегород, ул. Минина 24
E-mail: inventor61@mail.ru
Spin-код: 4677-5820

Папков Борис Васильевич, доктор технических наук,
профессор кафедры «Электрификация и автоматизация»

Адрес: Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 606340, Россия, Княгинино,
ул. Октябрьская, 22а

E-mail: boris.papkov@gmail.com

Spin-код: 8571-7457

Заявленный вклад авторов:

Мирзаабдуллаев Акрамжан Одилович, формулировка основной концепции исследования сбор и обработка материалов.

Куликов Александр Леонидович: общее руководство проектом обсуждение, дополнение и подготовка окончательного текста статьи.

Папков Борис Васильевич: критический анализ текста статьи, обработка материалов исследования, формулировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Pravila okhrany truda pri ekspluatatsii elektraustanovok [Rules of labor protection in the operation of electrical installations]. Approved by the Order of the Ministry of labor and social protection of the Russian Federation № 328n from July 24, 2013.92 p.
2. Sharandin A. A. Navedennoe napryazhenie i zashita ot nego [The Induced voltage and protection from it], Moscow: NTF «Energoprogress», 2016. 40 p.
3. Metodicheskie ukazaniya po izmereniyu navedennykh napryazheniy na otkluchennikh VL, prohodyashich vblizi deystvuyushchikh VL napryazheniem 35 kV i vishe i kontaktnoy seti elektrificirovannoy zheleznoy dorogi peremennogo toka [Methodical instructions on measurement of the induced voltages on the disconnected VL passing near operating VL of 35 kV and above and the contact network of the electrified railroad of alternating current], Moscow: ORGRES, 1993. 12 p.
4. Dikoy V. P., Arkhipov S. A., Alekseev P. A., Lishui A. B. Vozdushnye linii elektroperedachi pod navedennym napryazheniem [Overhead transmission lines under induced voltage], *Energetic [Power engineer]*, 2013, No. 8, pp. 16–18.
5. Dadashev B. A., Vakulenko, A. A., Shelyazhenko A. S, Yasovit G. P. Metod bezopasnogo proizvodstva rabot na VL 110–750 kV, nahodyashichsya pod navedennim napryazheniyem [Method for safe manufacture of works on transmission lines of 110–750 kV, under induced voltage], *Elektricheskie stantsii [Power stations]*, 1988, No. 4, pp. 59–62.
6. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules of the device of electro installations], Moscow: publishing house of the NTS ENAS, 2003, 270 p.
7. Popov V. A., Misrikhanov M. S., Onishchenko A. A., Cherednichenko K. V., Kushkova E. I. Charakteristika raspredelenie potentsiala navedennogo napryazheniya na otkluchennoy linii [Characteristic of the induced voltage potential distribution on the disconnected line], *Energetic [Power engineer]*, 1994, No. 2. pp. 17–18.
8. Glushko V. I., Yamny O. E., Kovalev E. P., Naumenok N. A. Raschet navedennogo napryazheniya na liniyakh elektroperedachy i obespechenie bezopasnosti na etich liniyakh [Calculation of induced voltage on the lines and security works on these lines], *Elektrichestvo [Electricity]*, 1997, No. 8. pp. 13–18.
9. Vakunenkov V. A. K voprosu razrabotki metodiki raschota teploizolyatsii kriogennykh khranilishch szhizhennogo prirodnogo gaza spetsial'nykh fortifikatsionnykh sooruzheniy Ministerstva oborony Rossiyskoy Federatsii [On the development of methods for calculating the thermal insulation of cryogenic storages of liquefied natural gas of special fortifications of the Ministry of Defense of the Russian Federation], *Vestnik Voennoy akademii material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. generala armii A. V. Khruleva [Bulletin of the Military Academy of Material and Technical Support. Army General A. V. Khruleva]*, 2016. No. 5. pp. 93–98.
10. Turaev V. A., Bazanov V. P. O navedennizh napryazheniyakh na vozdushnich liniyakh pri odnofaznich korotkikh zamikaniyakh [On induced stresses on air lines at single-phase short-circuit], *Elektricheskie stantsii [Power stations]*, 1998, No. 3, pp. 40–42.

11. Vasyura Y. F., Cherepanov G. A., Legkonravov V. L. Issledovanie navedennykh napryazheniy na otkluchennykh liniyakh elektroperedachy [Study of induced voltages on the disconnected transmission lines], *Elektricheskie stantsii [Power stations]*, No. 2, 1999, pp. 38–45.
12. Kuznetsov A. L. Navedennoe napryazhenie: mif ili realnost [The Induced voltage: myths and reality], *Energetik [Power engineer]*, 2009, No. 1, pp. 14–16.
13. Khalilov F. H., Efimov B. V., Navedennoe napryazhenie na vozduzhnykh liniyakh elektrapedach, otkluchennykh dlya remonta [Induced voltages on overhead power lines, disabled for repair: training manual], Saint-Petersburg: PAPIС, 2011. 52 p.
14. Butkevich, V. F., Urazalyev I. B. Opredelenie navedennogo napryazheniya na otkluchennykh provodakh vozduzhnoy linii 110 kV [Determination of the induced voltage on the disconnected wires of overhead lines of 110 kV], *Energetic [Power engineer]*, 2019, No. 1, pp. 35–38.
15. Chicherin S. V. Povysheniye nadezhnosti i sokrashcheniye teplovykh poter' putem ustroystva prodol'nogo drenazha na magistral'nykh teplovykh setyakh goroda Omska [Improving the reliability and reducing heat losses by arranging longitudinal drainage on the main heating networks of the city of Omsk], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskiye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Engineering]*, 2016. No. 4 (192). pp. 61–66.
16. Chernov I. A., Rubtsova N. B., Perov S. Yu. Obespechenie bezopasnosti personala pri rabotakh v usloviyakh vozdeystviya elektricheskogo polya i navedennogo napryazheniya [Ensure safety of personnel when working in conditions of exposure to electric fields and induced voltage], *Energetic [Power engineer]*, 2017, No. 9, pp. 20–23.
17. Zalesova O. V. Issledovanie urovnya navedennogo napryazheniya na otkluchennoy linii elektroperedochy, nachodyashchysya v zone vliyaniya tyagovoy sety zheleznoy dorogy peremennogo toka [Investigation of the level of induced voltage on the disconnected power line, located in the zone of influence of the traction network of the AC railway], *Vestnik MSTU [Bulletin MSTU]*, Vol. 17, No. 1, 2014, pp. 40–45.
18. Vanteev A. I. Eshe raz o neobchodimosti korrektyrovky mezhotraslevykh pravil po ochrane truda pri ekspluatatsii elektraustanovok [Once again on the need to adjust the intersectoral rules on labor protection in the operation of electrical installations], *Energetik [Power engineer]*, 2011, No. 8.
19. Vanteev A. I. Pravyly obnovilis – voprosy ostalis [Rules were modified, the questions remain], *Energetik [Power engineer]*, 2016, No. 5, pp. 23–26.
20. Misrikhanov M. Sh., Mirzaabdullaev A. O. Analiz prichin neschastnykh sluchaev i mer zashity ot navedennogo napryazheniya na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachy [Analysis of the causes of accidents and measures of protection against induced voltage on overhead power lines], *Ehlektricheskie stantsii [Power stations]*, 2008, No. 11. pp. 44–49.
21. Kulikov A. L., Mirzaabdullaev A. O. Ob otsenke navedennogo napryazheniya na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachy [On the evaluation of induced voltage on overhead Power lines], *Energetik [Power engineer]*, 2013, No. 8, pp. 12–15.
22. Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniy unavedennogo napryazheniya na otkluchennykh vozduzhnykh liniyakh, nachodyashchysya v blizi deystvuyushchikh VL [Methodical instructions by definition of the induced voltage on disconnected overhead lines located near the existing overhead line], STO 56947007-29.240.55.018-2009 Approved by the Order No. 20R JSC «FGC UES» dated 22.01.2009. 25 p.
23. Dykoy V. P., Tokarsky A. Yu., Rubtsova N. B. Misrikhanov M. sh., Elementy teoryi konturnykh ekranov. Povysheniye effektivnosti paboty energosystem [Elements of the theory of contour screens. Improving the efficiency of power systems], Tr. Of ISPU, Vol. 4, By V. A. Shuyin, M. S. Misrikhanov (ed.), Moscow: Energoatom-Izdat, 2001. 432 p.
24. Dolin P. A. Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh [Fundamentals of safety in electrical installations], Moscow: Energoatomizdat, 1984. 448 p.

Submitted 19.12.2018; revised 21.01.2019.

About the authors:

Akramzhan O. Mirzaabdullaev, engineer,

Chief expert, Department of technical audit of equipment of electric networks

Address: JSC «Technical Inspection UES», Moscow (Russia)

E-mail: akramzhan2011@yandex.ru

Alexander L. Kulikov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the chair

«Electric power, power supply and power electronics»

Address: Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseeva, 603950, Russia,

Nizhny Novgorod, Minin street, 24

E-mail: inventor61@mail.ru

Spin code: 4677-5820

Boris V. Papkov, Dr. Sci. (Engineering), professor of the chair «Electrification and automation»

Address: Nizhny Novgorod state engineering-economic university, 606340, Russia, Knyaginino,

Oktyabrskaya Str., 22A

E-mail: boris.papkov@gmail.com

Spin code: 8571-7457

Contribution of the authors:

Akramzhan O. Mirzaabdullaev: formulation of the basic concept of research, collection and processing of materials.

Alexander L. Kulikov: general management of the draft discussion, addition and preparation of the final text of the.

Boris V. Papkov: critical analysis of the text of the article, processing of research materials, formulation of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.