

УДК 621.311

В. Н. Селиванов, А. Н. Данилин, О. В. Залесова, В. В. Колобов

## **Исследование частотных характеристик взаимного влияния воздушных линий электропередачи**

Исследованы частотные характеристики взаимного влияния многопроводных воздушных линий (ВЛ), длина которых сравнима с длиной волны высших гармоник промышленной частоты. Воздушные линии электропередачи, выведенные в ремонт, подвержены электромагнитному влиянию со стороны соседних ВЛ под напряжением, тяговых сетей электрифицированной железной дороги, а также других протяженных проводников с токами. Наведенные на ВЛ напряжения являются опасными для жизни и здоровья ремонтного персонала. Значения наведенных напряжений могут быть определены либо прямым измерением, либо расчетным путем. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на двухцепных ВЛ Кольской энергосистемы. Показано, что спектральный состав наведенного напряжения может быть достаточно насыщенным, причем относительное содержание отдельных гармоник может значительно отличаться от гармонического состава токов и напряжений во влияющей воздушной линии. Амплитуда наведенного высшими гармониками напряжения может быть сравнима с амплитудой напряжения промышленной частоты. Аналогичные результаты были получены при исследовании влияния контактной сети железной дороги переменного тока на смежные воздушные линии электропередачи. В программе АТР-ЕМТР выполнено численное моделирование, в результате которого получены частотные характеристики, объясняющие результаты экспериментов. Предварительные оценки показывают, что наиболее вероятная причина явления – резонансный характер частотной зависимости взаимного влияния, который определяется соотношениями длины воздушной линии и длин волн высших гармоник. В линиях возникают волновые резонансы токов и напряжений, которые приводят к "усилению" отдельных гармоник наведенного напряжения, попадающих в области максимумов частотной характеристики взаимного влияния.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, наведенное напряжение, гармоники, частотная характеристика, программа АТР-ЕМТР.

### **Введение**

Воздушные линии электропередачи, выведенные в ремонт, подвержены электромагнитному влиянию со стороны соседних ВЛ под напряжением [1], тяговых сетей электрифицированной железной дороги [2], а также других протяженных проводников с токами [3]. Это влияние проявляется в возникновении на проводах обесточенной воздушной линии наведенного напряжения, величина которого зависит от схем заземления этой линии.

Наведенным напряжением называется разность потенциалов между проводящими частями электроустановок (ВЛ или оборудования подстанций) и точкой нулевого потенциала, возникающая в результате воздействия электрического и магнитного полей, создаваемых расположенными вблизи электроустановками, находящимися под напряжением. Электрическое поле характеризуется электростатической составляющей, зависящей от напряжения влияющих ВЛ и емкостных связей рассматриваемых ВЛ; электромагнитной составляющей, зависящей от тока во влияющих ВЛ; расстояний между отключенной и влияющими ВЛ; длин и конфигурации участков сближения и параметров контура протекания тока.

Наведенные напряжения являются опасным фактором и создают угрозу жизни и здоровью ремонтного персонала. Проведение ремонтных и профилактических работ на воздушных линиях электропередачи, которые находятся под наведенным напряжением, сопряжено с рядом специфических опасностей и требует высочайшей квалификации персонала, позволяющей избежать поражения электрическим током. Инструкции по безопасному проведению работ содержатся в ряде нормативных документов и в стандартах предприятий. В связи с требованиями новых правил техники безопасности при обслуживании электроустановок<sup>1</sup> работники, обслуживающие ВЛ, должны иметь и знать перечень линий, находящихся под наведенным напряжением, на отключенных проводах которых наводится напряжение более 25 В при различных схемах заземления данной линии.

Значения наведенных напряжений могут быть определены либо прямым измерением, либо расчетным путем. В настоящее время единственным документом, предлагающим расчетную модель и методику для предварительной оценки величин наведенного напряжения, является стандарт организации ОАО "ФСК ЕЭС"<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок : приказ Минтруда России от 24 июля 2013 г. № 328н : с изм. на 19 фев. 2016 г. // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : офиц. сайт. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499037306>.

<sup>2</sup> Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ : стандарт организации ОАО "ФСК ЕЭС" СТО 56947007-29.240.55.018-2009. URL: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO-56947007-29.240.55.018-2009.pdf>.

Кроме того, начаты работы по разработке программного обеспечения для расчета наведенного напряжения, инициированные ПАО "Россети"<sup>3</sup>.

Все существующие методики измерения и расчета предполагают, что наведенное напряжение создается источником тока промышленной частоты (50 Гц). Однако, как показывают выполненные нами экспериментальные исследования, спектральный состав наведенного напряжения может быть достаточно насыщенным, причем относительное содержание отдельных гармоник может значительно отличаться от такового у источника внешнего воздействия. Выполненные измерения на одной из двухцепных ВЛ Кольской энергосистемы показали, что амплитуда наведенного высшими гармониками напряжения может быть сравнима с амплитудой напряжения промышленной частоты.

В статье представлены результаты предварительных исследований, которые показывают, что наиболее вероятной причиной является резонансный характер частотной зависимости взаимного влияния, который определяется соотношениями длин воздушных линий и частоты высших гармоник. В линиях возможно возникновение волновых резонансов токов и напряжений, которые приводят к "усилению" отдельных гармоник, попадающих в области максимумов частотной характеристики взаимного влияния.

### Материалы и методы исследования

В Северных электрических сетях ПАО "Колэнерго" имеется несколько линий, на проводах которых при их отключении и заземлении в распределительных устройствах (РУ) подстанций наведенные напряжения значительно превышают 25 В, а при их изоляции в РУ – наведенные напряжения достигают нескольких киловольт. На одной из этих линий нами были выполнены экспериментальные исследования наведенных напряжений при различных схемах заземления ремонтируемой ВЛ, которые, помимо измерения действующего значения наведенного напряжения, включали также осциллографирование его формы.

Схема данного эксперимента показана на рис. 1. Трасса двухцепной воздушной линии класса напряжения 150 кВ длиной 117,3 км проходит по тундровой местности с каменистым грунтом, удельное сопротивление грунта в среднем имеет величину порядка 1 000 Ом·м. Сопротивление растеканию тока заземляющих устройств (ЗУ) опор ВЛ имеет порядок десятков и сотен Ом, и во многих случаях значительно превышает нормируемые значения. В частности, сопротивление опоры, на которую заземлены фазные провода, в приведенном случае составляло порядка 3 500 Ом.

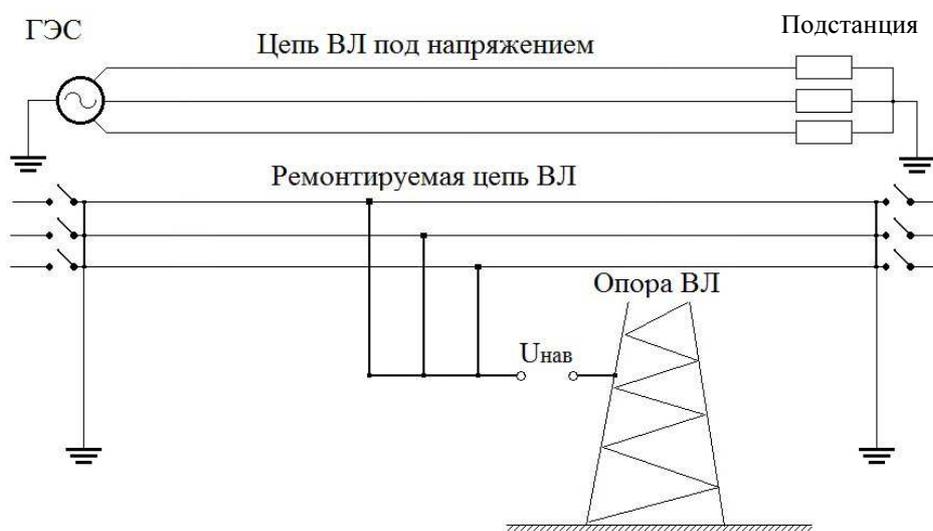


Рис. 1. Схема измерений на заземленной ВЛ  
Fig. 1. The scheme of measurements on a grounded overhead line (OL)

Наведенное напряжение на ремонтируемой цепи определяется соседней цепью, находящейся под рабочим напряжением. Ремонтируемая линия заземлена в концевых РУ подстанций. Такой режим заземления является наиболее безопасным, и он не противоречит Правилам по охране труда при эксплуатации

<sup>3</sup> Запрос предложений № 554472 на право заключения договора на выполнение работ по разработке стандартов организации : "Электроустановки напряжением до 220 кВ. Методические указания по организации и выполнению работ по измерению наведенного напряжения, расчету и обработке результатов измерений" ; "Воздушные линии электропередачи напряжением до 220 кВ включительно, находящиеся под наведенным напряжением. Руководящие указания по организации безопасного выполнения работ" // Электронная торговая площадка B2B-Center. URL: <http://www.b2b-center.ru/market/view.html?id=554472>.

электроустановок<sup>4</sup>. В этом режиме заземления определяющий вклад в наведенное напряжение вносит электромагнитная составляющая, величина которой определяется токами в проводах влияющей цепи, а не уровнем напряжения на них.

Измеренная цифровым мультиметром величина действующего значения наведенного напряжения составила 27 В.

На рис. 2 представлена осциллограмма напряжения на заземленных на опору проводах одной из цепей двухцепной ВЛ. Как видно из осциллограммы, амплитуда высших гармоник сравнима с амплитудой напряжения промышленной частоты.

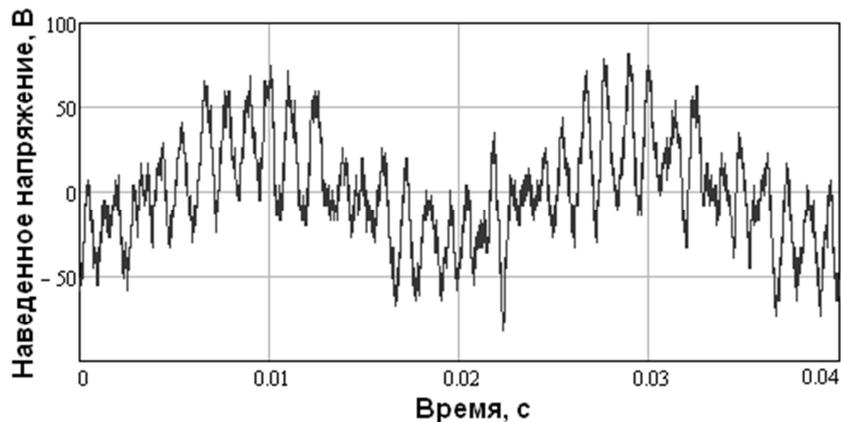


Рис. 2. Осциллограмма наведенного напряжения на ремонтируемой цепи двухцепной ВЛ  
Fig. 2. The waveform of induced voltage on the repaired chain of OL double circuit

На рис. 3 представлен спектр этого сигнала. В приведенном примере действующее значение первой гармоники меньше 15 В, и это та величина, которая будет получена при расчете наведенного напряжения по модели, не учитывающей гармонический состав напряжения в сети; в реальности действующее значение полного спектра наведенного напряжения в два раза выше. Действующее значение наведенного напряжения, которое получено прямыми измерениями, составило 27 В, что почти в два раза превышает действующее значение 1-й гармоники.

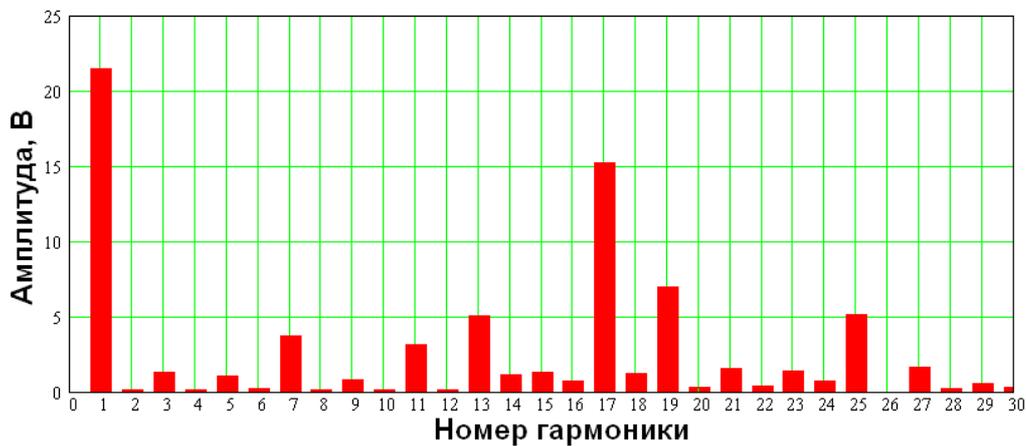


Рис. 3. Спектр наведенного напряжения на ремонтируемой цепи двухцепной ВЛ  
Fig. 3. The spectrum of the induced voltage on the repaired chain of OL double circuit

Другим важным фактом в данном примере является то, что в спектре наведенного напряжения помимо первой гармоники преобладают гармоники с довольно высокими номерами: 17-я (850 Гц), 19-я (950 Гц) и даже 25-я (1 250 Гц). В то же время, как показывают измерения, в токе и напряжении влияющих линий в сетях с заземленной нейтралью преобладают 5-я и 7-я гармоники. В данном случае из двух физических

<sup>4</sup> Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок : приказ Минтруда России от 24 июля 2013 г. № 328н : с изм. на 19 фев. 2016 г. // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : офиц. сайт. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499037306>.

механизмов влияния – электрического и магнитного – реально необходимо считаться только с магнитным влиянием, поскольку несинусоидальность тока влияющих сетей существенно больше несинусоидальности напряжения. Именно несинусоидальный ток во влияющей сети приводит к несинусоидальности наведенных напряжений.

### Результаты и обсуждение

Для выяснения причин такого изменения спектрального состава было проведено численное исследование частотных характеристик взаимного влияния воздушных линий.

При сближении двух и более ЛЭП они оказывают друг на друга как магнитное влияние (возникновение на проводах каждой из них продольных электродвижущих сил (ЭДС), вызванных токами в фазных проводах соседних линий), так и электрическое (возникновение напряжений, определяемых электрическим полем параллельных ЛЭП). Напряжения и токи на проводах линий над землей связаны системой телеграфных уравнений, записанных относительно комплексных амплитуд фазных величин:

$$\begin{cases} -\frac{d}{dx}U = Z(\omega)I \\ -\frac{d}{dx}I = Y(\omega)U \end{cases}, \quad (1)$$

где  $Z(\omega)$  – комплексная симметричная матрица продольных импедансов. Диагональные элементы  $Z_{ii}(\omega)$  матрицы являются собственными продольными импедансами на единицу длины контура, образованного  $i$ -м проводником и обратным током в земле. Недиagonальные элементы  $Z_{ik}(\omega) = Z_{ki}(\omega)$  являются взаимными продольными импедансами на единицу длины между  $i$ -м и  $k$ -м проводниками и определяют продольно наведенное напряжение в проводнике  $k$ , если ток протекает в проводнике  $i$ , или наоборот. Формулы для расчета  $Z_{ii}(\omega)$  и  $Z_{ik}(\omega)$  были выведены Карсоном в 1920-х гг. для телефонных линий [4], но могут быть использованы также для линий электропередачи;  $Y(\omega)$  – комплексная симметричная матрица поперечных проводимостей. В случае воздушной линии, когда можно пренебречь проводимостью утечки на землю, можно принять  $Y(\omega) = j\omega C$ , где  $C$  – это матрица коэффициентов электростатической индукции.

Систему дифференциальных уравнений первого порядка (1) можно подстановкой привести к виду системы волновых уравнений, записанных для каждого провода многопроводной воздушной линии:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2}U = Z(\omega)Y(\omega)U = \gamma(\omega)^2 U \\ \frac{d^2}{dx^2}I = Y(\omega)Z(\omega)I = \gamma(\omega)^2 I \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\gamma(\omega) = \sqrt{Z(\omega)Y(\omega)} = \sqrt{Y(\omega)Z(\omega)}$  – матрица коэффициентов распространения (произведения матриц равны в силу их симметричности).

Коэффициент распространения и другая важная характеристика линии, волновое сопротивление  $Z_0(\omega) = \sqrt{Z(\omega)Y(\omega)^{-1}}$  являются функциями частоты даже в случае частотонезависимых распределенных параметров длинной линии. Частотная зависимость еще более усиливается, когда учитывают такие явления, как скин-эффект в фазных проводниках воздушной линии и зависимость от частоты глубины проникновения обратного тока в земле.

В общем виде решение системы уравнений (2) можно представить как

$$\begin{cases} U(x, \omega) = U_+(\omega)\exp(-j\gamma(\omega)x) + U_-(\omega)\exp(j\gamma(\omega)x) \\ I(x, \omega) = \frac{1}{Z_0(\omega)}(U_+(\omega)\exp(-j\gamma(\omega)x) - U_-(\omega)\exp(j\gamma(\omega)x)) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $U_+$  и  $U_-$  – матрицы постоянных интегрирования, которые определяются из граничных условий по концам каждого провода воздушной линии.

Решение (3) является суперпозицией двух волн, падающей и отраженной, распространяющихся в линии в противоположных направлениях. Как известно [5], при определенных соотношениях длины воздушной линии и частоты сигнала, а также в зависимости от условий на концах, в линии возможно возникновение разного рода резонансов токов и напряжений.

Получение решения для частотозависимой многопроводной линии с произвольными граничными условиями может быть получено только численными методами. Наиболее полно модель такой воздушной

линии реализована в программе ATP-EMTP [6], поэтому в качестве инструмента исследования частотных характеристик взаимного влияния мы использовали эту программу.

В библиотеке программы ATP-EMTP есть модуль LCC, который позволяет моделировать линии электропередачи с учетом их физических параметров, в том числе многоцепные линии с числом фаз до 28, с транспозициями и изменением геометрии взаимного расположения. На рис. 4 изображено диалоговое окно модели, описывающее одного из участков исследуемой двухцепной ВЛ.

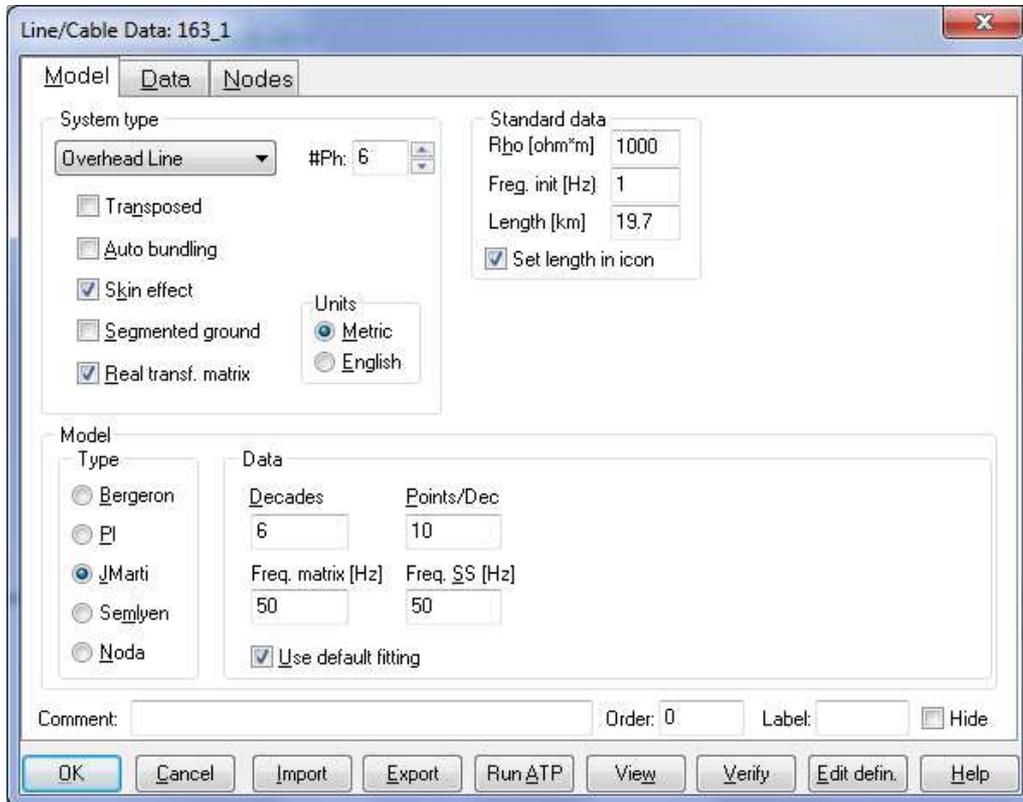


Рис. 4. Диалоговое окно модели LCC в программе ATP-EMTP  
 Fig. 4. A dialog box of the LCC model in the ATP-EMTP programme

Модель линии в программе EMTP-ATP показана на рис. 5. Модель выполнена в виде 6 однородных участков. На этой ВЛ четыре транспозиции, поэтому пять участков различаются порядком следования фаз, а на границе третьего и четвертого участка расположена опора, на которой выполнялись измерения наведенного напряжения. Ток во влияющей цепи задается в соответствии с максимальной нагрузкой для ВЛ. Сопротивление заземляющих устройств (ЗУ) подстанций, за отсутствием реальных данных, выбрано в пределах нормируемого значения 0,5 Ом.

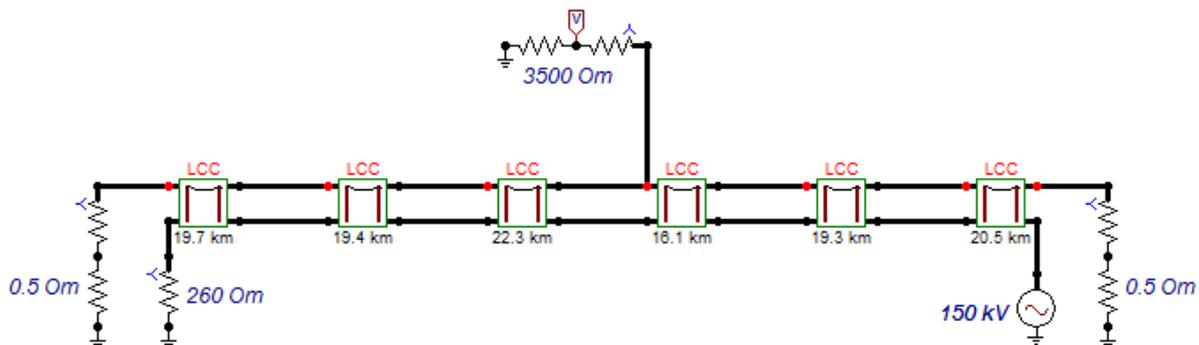


Рис. 5. Модель ВЛ в программе ATP-EMTP  
 Fig. 5. The overhead model in the ATP-EMTP programme

На рис. 6 представлены результаты расчета частотной характеристики взаимного влияния цепей двухцепной воздушной линии (ток влияющей линии на резистивную нагрузку 300 А на частоте 50 Гц, ремонтируемая линия заземлена в концевых РУ и на опоре в месте ремонта, удельное сопротивление грунта 1 000 Ом·м, сопротивление ЗУ опоры составляет 3 500 Ом). Частотной характеристикой взаимного влияния в данном случае мы называем зависимость действующего значения наведенного напряжения на опоре в месте ремонта от частоты тока во влияющей цепи в относительных единицах величины этого напряжения на частоте 50 Гц.

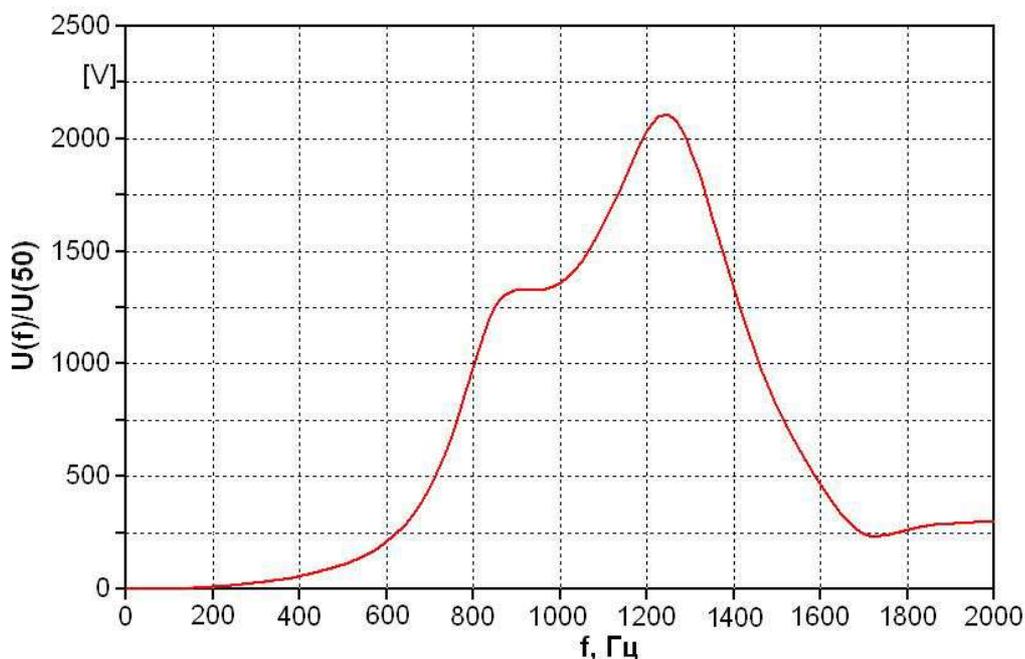


Рис. 6. Частотная характеристика взаимного влияния двухцепной ВЛ  
Fig. 6. The frequency response of the mutual influence of OL double circuit

Результаты расчетов, по крайней мере, качественно проясняют изменение соотношения гармоник в спектре наведенного напряжения. Как видно из рис. 3, на характеристике четко выделяются два максимума на частотах 900 и 1 240 Гц, что соответствует максимумам в спектре наведенного напряжения на рис. 3 на частотах от 850 Гц до 950 Гц (17-я и 19-я гармоники) и 1 250 Гц (25-я гармоника).

Ремонтируемая линия заземлена по концам в РУ через сопротивления ЗУ подстанций, которые в данной модели приняты равными 0,5 Ом, поэтому можно считать, что линия работает в режиме короткого замыкания по концам. В воздушной линии длиной  $l$  в режиме короткого замыкания на частоте  $f = \frac{c}{2l}$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, возникает полуволновой резонанс. В нашем случае резонансная частота равна 1 280 Гц, и этой частоте соответствует второй максимум на частотной характеристике.

Первый пик на частотной характеристике – это также резонанс, но уже во влияющей линии, на конце которой включена активная нагрузка (в нашем примере она имеет сопротивление 260 Ом). Если бы влияющая линия работала в режиме холостого хода, то эта частота соответствовала бы четвертьволновой длине линии, т. е. 640 Гц.

Природа возникновения первого максимума требует дальнейшего изучения, но предварительные расчеты показывают, что его положение зависит от удельного сопротивления земли, а следовательно, и глубины проникновения обратного тока в землю. Для земли с бесконечной проводимостью первый максимум сливается со вторым, а с ростом удельного сопротивления земли его частота снижается: при удельном сопротивлении 10 Ом·м частота первого максимума составляет 1 100 Гц, а при 10 000 Ом·м – 790 Гц.

Необходимо отметить, что характер зависимости наведенного напряжения от частоты, помимо удельного сопротивления земли, зависит еще от большого числа параметров воздушной линии: наличия транспозиций, координаты заземляемой в месте ремонта опоры и ее сопротивления, взаимного расположения проводов и т. д. Поэтому численное моделирование дает только качественную картину частотной характеристики, а относительно точные значения можно получить в ходе эксперимента, одновременно регистрируя спектры тока во влияющей линии и наведенного напряжения на ремонтируемой линии.

### Заключение

1. Результаты регистраций наведенного напряжения в ремонтируемых воздушных линиях электропередачи, находящихся в зоне электромагнитного влияния других воздушных линий, демонстрируют наличие высших гармоник, сравнимых по величине с основной гармоникой промышленной частоты. При этом относительное содержание гармоник в наведенном напряжении выше, чем в токах и напряжениях влияющей линии.

2. Спектральный состав наведенного напряжения зависит от многих величин: длин влияющей и ремонтируемой линий, взаимного расположения этих линий, условий заземления и нагрузок по концам линий, удельного сопротивления грунта по трассе и т. д. При определенных соотношениях длины воздушной линии и частоты гармоники, а также в зависимости от условий на концах, в линии возможно возникновение разного рода резонансов токов и напряжений, которые приводят к "усилению" отдельных гармоник, попадающих в области максимумов частотной характеристики взаимного влияния.

3. В программе АТР-ЕМТР выполнено моделирование взаимного влияния цепей двухцепной линии электропередачи и воздействия тяговой сети железной дороги на смежную линию электропередачи. В первом случае расчет подтвердил резонансный характер частотной зависимости взаимного влияния. Как показали результаты моделирования эксперимента на железной дороге, на характер частотной зависимости оказывает влияние положение электровоза относительно ремонтируемой ВЛ, и это явление требует дальнейшего изучения.

4. Численное моделирование дает качественную картину частотной характеристики взаимного влияния. Для дальнейшего изучения описанных в статье явлений необходимо поставить и выполнить натурный эксперимент, одновременно регистрируя спектры токов и напряжений во влияющей линии и наведенного напряжения на ремонтируемой линии.

### Библиографический список

1. Халилов Ф. Х., Ефимов Б. В. Наведенные напряжения на воздушных линиях электропередач, отключенных для ремонта. СПб. : ПЭИПК, 2008. 52 с.
2. Дроздова О. В., Якубович М. В. Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключенные линии электропередачи // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13, № 4/2. С. 918–922.
3. Исследование влияния спецЛЭП на воздушные линии электропередачи / А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, А. Н. Кизенков, В. Н. Селиванов // Труды КНЦ РАН. 2013. № 2 (15). С. 103–114. (Энергетика ; вып. 6).
4. Carson J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Syst. Tech. J. 1926. V. 5. P. 539–554.
5. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. 4-е изд. СПб. : Питер, 2003. 576 с.
6. Селиванов В. Н. Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 1. С. 107–112.

### References

1. Khalilov F. H., Efimov B. V. Navedennyye napryazheniya na vozdushnyh liniyah elektropredach, otklyuchennyh dlya remonta [The induced voltages on overhead transmission lines disconnected for repairs]. SPb. : PEIPK, 2008. 52 p.
2. Drozdova O. V., Yakubovich M. V. Issledovanie vliyaniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na otklyuchennyye linii elektropredachi [Research of influence of AC railway electrification systems on deenergized overhead transmission lines] // Vestnik MGTU. 2010. V. 13, N 4/2. P. 918–922.
3. Issledovanie vliyaniya spetsLEP na vozdushnyye linii elektropredachi [Research of influence of special overhead line on power transmission lines] / A. N. Danilin, B. V. Efimov, A. N. Kizenkov, V. N. Selivanov // Trudy KNTs RAN. 2013. N 2 (15). P. 103–114. (Energetika : vyp. 6).
4. Carson J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Syst. Tech. J. 1926. V. 5. P. 539–554.
5. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. V 3 t. T. 2 / K. S. Demirchyan, L. R. Neyman, N. V. Korovkin, V. L. Chechurin. 4-e izd. SPb. : Piter, 2003. 576 p.
6. Selivanov V. N. Ispolzovanie programmy rascheta elektromagnitnyh perehodnyh protsessov ATP-EMTP v uchebnom protsesse [Using ATP-EMTP electromagnetic transient program for education purposes] // Vestnik MGTU. 2009. V. 12, N 1. P. 107–112.

### Сведения об авторах

**Селиванов Василий Николаевич** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, зам. директора по науке; e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

**Selivanov V. N.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Deputy Director of Science; e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

**Данилин Аркадий Николаевич** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. лабораторией; e-mail: danilin@ien.kolasc.net.ru

**Danilin A. N.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Research Fellow, Head of Laboratory; e-mail: danilin@ien.kolasc.net.ru

**Залесова Ольга Валерьевна** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: drozdova\_nord@mail.ru

**Zalesova O. V.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: drozdova\_nord@mail.ru

**Колобов Виталий Валентинович** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: 1\_i@mail.ru

**Kolobov V. V.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: 1\_i@mail.ru

V. N. Selivanov, A. N. Danilin, O. V. Zalesova, V. V. Kolobov

## **Study of the frequency response of the mutual coupling between overhead lines**

The paper investigates the frequency response of the mutual coupling between multi-wire overhead lines with length comparable to the wavelengths of the highest power frequency harmonics. Deenergized overhead transmission lines are influenced by electromagnetic interference from neighboring in-service overhead lines, railway traction lines, as well as other extended conductors with currents. The voltages induced on the overhead lines are dangerous to life or health of maintenance personnel. The values of the induced voltages can be determined either by direct measurement or by calculation. The paper presents the results of experimental studies of double-circuit overhead lines of the Kola energy system. It has been shown that the frequency spectrum of the induced voltage is different from the spectrum of the source of interference, and this difference has a resonant nature. The amplitude of the voltage induced by higher harmonics can be comparable with the amplitude of the voltage induced by the power frequency. The similar results have been received in studies of influence of the AC railway traction line on adjacent overhead transmission lines. ATP-EMTP numerical analysis has been performed to receive the frequency characteristics that explain the experimental results. Preliminary estimates indicate that the cause of the phenomenon is most likely due to the resonant nature of the frequency response of the mutual coupling. The resonant nature is characterized by the interrelation of the length of overhead lines and the wavelength of the higher harmonics. A wave resonance of currents and voltages that appears in the lines lead to the "magnification" of the individual induced voltage harmonics falling in the maxima of the frequency characteristics of mutual coupling.

**Key words:** overhead transmission line, induced voltage, harmonic frequency, frequency response, ATP-EMTP programme.