

## Электромагнитная совместимость электроустановок нетяговых потребителей и системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом

КОСАРЕВ А.Б., КОСАРЕВ Б.И.

*Обоснована методика расчёта коммутационных перенапряжений, в том числе и при разряде токов молнии в контактную сеть системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом. Установлено, что защита напольных устройств СЦБ от коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения с высоковольтным питающим проводом (СЭ ВПП) может быть решена соединением опор контактной сети с протяжённым заземлителем, расположенным в земле и не соединённым с рельсовым путём. Разработан алгоритм компьютерного моделирования спектрального состава напряжений нулевой последовательности фазных напряжений воздушных линий с изолированной нейтралью относительно земли при их расположении в зонах электромагнитного влияния системы СЭ ВПП и наличии фильтра напряжения нулевой последовательности (ФННП). Отсутствии ФННП в исследуемой схеме вызывает многократный рост значений напряжений нулевой последовательности линии, несимметрию фазных напряжений и помех как в начале, так и в конце линии. Установка фильтров позволила сгладить и выровнять спектральный состав напряжения, минимизировать эффект резонансных явлений на высоких частотах.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** тяговая сеть, питающий провод, коммутационные перенапряжения, искусственный заземлитель, ток, напряжение

Необходимость усиления системы тягового электроснабжения на участках переменного тока появляется при возникновении ограничений по мощности тяговых подстанций, по уровню напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, по нагреву проводов контактной подвески. Причина возникновения ограничений заключается в непрерывном росте грузопотоков, увеличении единичного веса поездов, внедрении кратной тяги. Рост тяговых нагрузок ограничен нагрузочной способностью основных элементов тяговой сети.

На участках переменного тока используются различные способы усиления: замена тяговых трансформаторов на более мощные; сооружение дополнительных тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения; подвеска усиливающего и экранирующего проводов; применение вольтодобавочных трансформаторов, установка продольной и поперечной компенсации; переход на систему тягового электроснабжения 2×25 кВ с автотрансформаторами [1–3]. Усиление тяговой сети переменного тока на грузонапряжённых и скоростных участках возможно выполнить согласно [4].

На электрифицированных железных дорогах тяговые подстанции получают питание от линий электропередачи с номинальным напряжением 110 и 220 кВ. Повышение номинального напряжения приводит к удорожанию стоимости высоковольтного оборудования, необходимости усиления изоляции проводов. Поэтому напряжение 110 кВ пред-

почтительнее 220 кВ при использовании его в СЭ ВПП.

Принципиальная схема системы тягового электроснабжения с питающим проводом повышенного напряжения и пунктами распределенного питания приведена в [4–6]. Напряжение между контактной подвеской и питающим проводом предлагается принять равным линейному напряжению линии электропередачи 110 кВ, трансформаторные пункты равномерно установлены вдоль межподстанционных зон. На тяговых подстанциях устанавливаются трех- и двухфазные трансформаторы с симметрирующим эффектом, обмотки которых собраны по схеме Скотта. Трансформаторы тяговых подстанций, на первичные обмотки которых подается напряжение  $U_{\text{лэп}}$  (базисное) и  $3U_{\text{лэп}}/2$  (высотное), обеспечивают на стороне тяговой сети напряжение 110 кВ – между контактной подвеской и питающим проводом. Установленные в пунктах распределенного питания однофазные трансформаторы своими первичными обмотками подключены к контактной подвеске и питающему проводу, а вторичными – к контактной подвеске и рельсам. Для этого могут быть использованы трансформаторы типа ОРДНЖ-16000/110-76У1, применяемые в системе 2×25 кВ [3].

Таким образом, в тяговой сети между контактной подвеской и рельсами напряжение составляет 25 кВ, а между питающим проводом и рельсами 85 кВ. Питающий провод может быть подвешен на специальных консолях на опорах контактной сети с полевой стороны. В отдельных случаях для рас-

положения питающих проводов могут быть предусмотрены специально установленные опоры.

При возможном внедрении СЭ ВПП возникает ряд задач, требующих решения. К ним в первую очередь относятся: обоснование технических решений по заземлению опор контактной сети, защите электроустановок и сетей нетягового электроснабжения (например устройств автоблокировки и СЦБ) от возникающих в СЭ ВПП импульсных перенапряжений (грозовых и внутренних коммутационных), электрическое влияние СЭ ВПП на воздушные линии электропередачи нетягового электроснабжения.

#### Заземление опор контактной сети в СЭ ВПП.

Наиболее перспективным направлением решений по защите от возникающих в СЭ ВПП импульсных перенапряжений (грозовых и внутренних коммутационных) в электроустановках и сетях нетягового электроснабжения, в частности устройств автоблокировки и СЦБ, является отказ от использования рельсового пути для заземления опор контактной сети, на которых подвешивается ВПП. Возможность решения этой задачи применительно к традиционной СЭ напряжением 25 кВ изложена в [3, 7, 8].

Защита напольных устройств СЦБ от коммутационных перенапряжений в СЭ ВПП может быть решена соединением опор контактной сети с протяжённым заземлителем-противовесом, расположенным в земле и не соединённым с рельсовым путём. Длина одной секции искусственного заземлителя (ИЗ) исходя из условий работы рельсовых цепей может быть принята равной 400 м. Этот заземлитель располагается в земле на глубине не менее 0,5 м. Опыт использования ИЗ для грозозащиты высоковольтных линий электропередачи известен [9].

Использование ИЗ наряду с ограничением импульсных перенапряжений на изоляции опор контактной сети решает задачу обеспечения надёжной защиты тяговых сетей при возникновении в них коротких замыканий [8].

В общем случае электрическая схема замещения ИЗ представляется цепью с распределёнными параметрами, первичные характеристики которой зависят от частоты из-за явления поверхностного эффекта в земле и металлической полосе. В спектральном составе тока молнии преобладают высокие частоты. При протекании по металлическому заземляющему проводнику его активное сопротивление, внутренняя и внешняя индуктивность контура «заземляющий проводник–земля» из-за явления поверхностного эффекта изменяются в широких пределах. В большей степени явление поверхностного эффекта на частотах  $\omega = 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$  и более влияет на активное сопротивление и внутреннюю индуктивность полосового заземлителя. Отметим, что при указанных частотах глубина проникновения электромагнитной волны меньше, чем ми-

нимальный размер (толщина) полосового заземлителя.

В [10] предложена методика расчета параметров схемы замещения стального проводника (рельсов). Воспользуемся результатами, приведенными в [10], для построения схемы замещения полосового заземлителя.

Решение задачи, связанной с явлением поверхностного эффекта в стальных проводниках, находят из совместного решения уравнений Максвелла, записанных в цилиндрической системе координат:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} - \frac{1}{r^2} H &= \gamma \frac{\partial B}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t}; \\ \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{H}{r} &= \gamma E, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $B$ ,  $H$  – мгновенные значения индукции и напряженности магнитного поля;  $E$  – мгновенное значение напряженности электрического поля в металлическом проводнике с удельной электрической проводимостью материала  $\gamma$ ;  $t$  – время.

Представим зависимость магнитной индукции стали от напряженности магнитного поля в виде уравнения [11]:

$$B = kH + \alpha \arctg \beta H \quad \text{при } -\infty > H > +\infty,$$

где коэффициенты  $k$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  определяются с использованием метода выбранных точек.

Дифференциальная магнитная проницаемость стали полосы размером  $(3 \times 5) 10^{-4} \text{ м}^2$  (производная  $\frac{\partial B}{\partial H} = \mu_g$ ) рассчитывается по формуле:

$$\mu_g = k + \frac{\alpha \beta}{1 + \beta^2 H^2}.$$

Установлено, что применительно для стали, из которой изготавливается металлическая полоса,  $k = \mu_{g0} \approx 25 \mu_0$ ;  $\alpha = 360 \mu_0$ ;  $\beta = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{А}^2$ , где  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Уравнения (1) в отн. ед.:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{H}}{\partial \bar{r}} - \frac{\bar{H}}{\bar{r}^2} &= \gamma k \left( 1 + \frac{\alpha \beta}{k(1 + \beta^2 0,5 E_e r_e \gamma \bar{H})} \right) \frac{\partial \bar{H}}{\partial \bar{t}}; \\ \frac{\partial \bar{H}}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{H}}{\bar{r}} &= \bar{E}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\bar{H} = \frac{H}{H_e}$ ;  $\bar{r} = \frac{r}{r_e}$ ;  $\bar{t} = \frac{t}{t_e}$ ;  $\bar{E} = \frac{E}{E_e}$ ;  $E_e = \frac{2 H_e}{\gamma r_e}$ ;  
 $k = 25 \mu_0$ ;  $H_e = \frac{I_g}{2 \pi r_e} = \frac{\gamma E_e \pi r_e^2}{2 \pi r_e} = \frac{1}{2} \gamma E_e r_e$ ;  $t_e = \frac{1}{k \gamma r_e^2}$ .

Здесь  $H_e, E_e$  – значения напряженности магнитного и электрического полей на поверхности цилиндра радиусом  $r_e$ , соответствующие установившемуся значению тока при его включении на постоянное напряжение.

Для определения *первого* граничного условия учтём, что напряженность внешнего электрического поля устанавливается на поверхности цилиндра мгновенно, тогда при  $\bar{r}=1$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial \bar{r}} + \bar{H} = 1.$$

*Второе* граничное условие:  $\bar{H}=0$  при  $\bar{r}=0$ .

Дифференциальные уравнения (2) решаются аналогично [10].

Представим рассчитанное численным методом мгновенное значение тока в металлической полосе при её включении на постоянное напряжение выражением:

$$i = I_g(1 - \alpha_1 e^{\beta_1 t} - \alpha_2 e^{\beta_2 t}), \tag{3}$$

где  $\alpha_i, \beta_i$  – коэффициенты, полученные при аппроксимации тока в металлической полосе при её включении на постоянное напряжение.

Используя (3) и проводя синтез цепи, получим схему замещения металлической полосы в виде пассивного двухполюсника, состоящего из последовательно включённых активного сопротивления  $R_1$  и индуктивности  $L_1'$ , которые, в свою очередь, соединены с параллельно включёнными активным сопротивлением  $R_2$  и индуктивностью  $L_2$ . Пусть  $R_1$  – сопротивление металлической полосы постоянному току. Три других параметра схемы замещения рассчитываются из соотношений, приведённых в [10].

Для металлической полосы размером  $(4 \times 5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  получены следующие параметры схемы замещения:  $R_1 = 0,1 \text{ Ом/км}$ ;  $L_1' = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$ ;  $L_2 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$ ;  $R_2 = 1,25 \text{ Ом/км}$ .

Окончательно электрическая схема замещения стальной полосы получается при добавлении последовательно с  $L_1'$  внешней индуктивности конту-

ра «полоса–земля», рассчитанной по формуле Полячика.

С учетом результатов представления элементарного участка полосового заземлителя в виде пассивного двухполюсника расчетная схема замещения расположенного в земле заземлителя имеет вид цепи с распределенными параметрами (рис. 1).

При построении электрической схемы замещения полосового заземлителя учтено, что емкостью полосового заземлителя относительно плоскости нулевого потенциала можно пренебречь [9].

Операторные выражения волнового сопротивления, коэффициента распространения и переходной проводимости схемы замещения полосового заземлителя равны:

$$z_B(p) = \sqrt{\frac{p^2 L_1 L_2 + p(L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_2 R_2) + R_1 R_2}{(p L_2 + R_2) g}};$$

$$\gamma(p) = \sqrt{\frac{p^2 L_1 L_2 + p(L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_2 R_2) + R_1 R_2}{(p L_2 + R_2) g}} g;$$

$$Y_{\text{пер}}(p) = \frac{1}{p z_{\text{ex}}(p)} = \frac{1}{p z_B(p)} \text{th} \gamma(p) l.$$

Учтем, что в [7]

$$\frac{\text{th} \gamma(p) l}{\gamma(p) l} = \frac{\theta}{\theta + \gamma^2(p) l^2}, \quad \theta \approx 4,1.$$

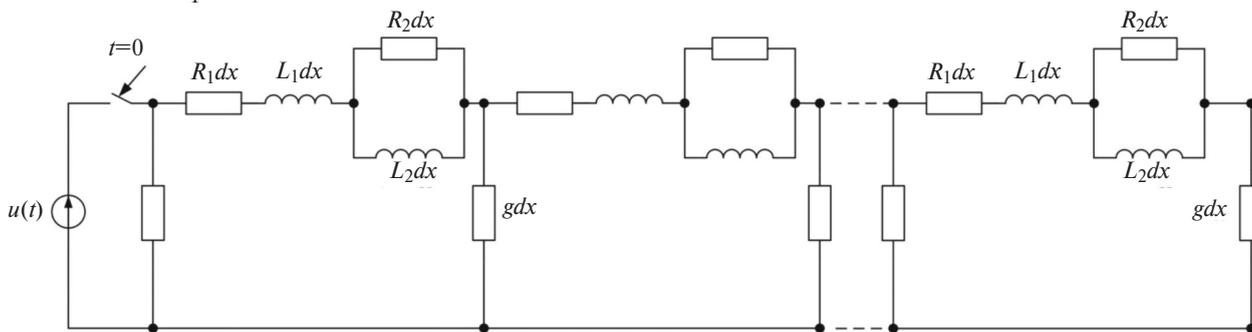
Пусть

$$F_1(p) = (p L_2 + R_2) \theta g l,$$

$$F_3(p) = p^2 L_1 L_2 g l^2 + p((L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_2 R_2) g l^2 + \theta L_2) + R_1 R_2 g l^2 + \theta R_2.$$

Оригинал переходной проводимости рассчитывается с использованием теоремы Хевисайда:

$$Y_{\text{пер}}(p) \div y_{\text{пер}}(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=1}^2 \frac{F_1(p_k)}{F_3'(p_k)} e^{p_k t}.$$



**Рис. 1.** Расчетная электрическая схема замещения расположенного в земле полосового заземлителя:  $g$  – поперечная проводимость «полосовой заземлитель–земля» (рассчитывается согласно [12]);  $u(t)$  – импульсное напряжение на входе заземлителя;  $x$  – текущая координата

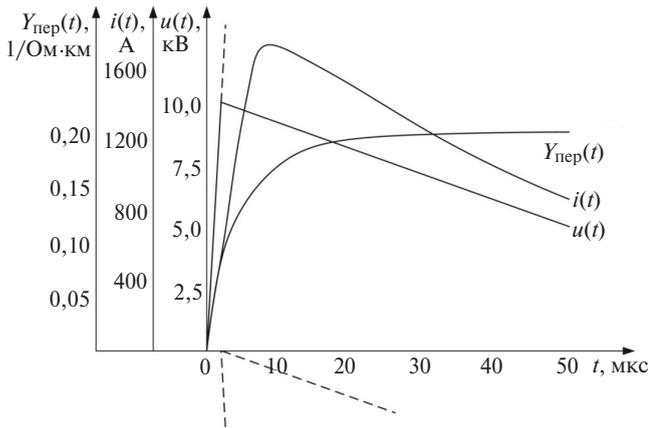


Рис. 2. Результаты расчёта переходной проводимости и тока на входе протяжённого заземлителя

Окончательное выражение для определения переходной проводимости имеет вид

$$y_{пер}(t) = \frac{\text{th}\sqrt{R_1 gl}}{\sqrt{R_1/g}} \left( 1 - \frac{\sqrt{R_1/g}}{\text{th}\sqrt{R_1 gl}} \sum_{k=1}^2 \varepsilon_k e^{p_k t} \right)$$

при

$$\varepsilon_k = \frac{F_1(p_k)}{p_k F'_3(p_k)}$$

При дальнейших расчётах представим импульсное напряжение в виде косоугольных импульсов (рис. 2, штриховая линия).

При  $0 \leq t \leq t_\phi$   $u = k_1 t$ ,  $t_\phi \leq t \leq t_M$   $u = k_1 t - (k_1 + k_2)(t - t_\phi)$ . В приведённых выражениях  $k_1 = U_M / t_\phi$ ;  $k_2 = 0,5 U_M / (\tau_M - t_\phi)$ , где  $\tau_\phi$ ,  $t_M$  – длительность фронта и импульса напряжения.

Для определения тока  $i(t, x=0)$  воспользуемся интегралом Дюамеля. При известной переходной проводимости и заданном мгновенном значении напряжения на входе полосового заземлителя в виде  $u = k_1 t$  на интервале времени  $0 \leq t \leq t_\phi$

$$i(t, x=0) = k_1 \frac{\text{th}\sqrt{R_1 gl}}{\sqrt{R_1/g}} t - \sum_{k=1}^2 \frac{k_1 \varepsilon_k}{p_k} (e^{p_k t} - 1).$$

Мгновенное значение тока через протяжённый заземлитель при  $t_\phi \leq t$  определяется с использованием метода наложения:

$$i(t) = i(t, x=0) - \frac{k_2}{k_1} i(t - t_\phi, 0).$$

В качестве примера расчёта тока молнии, втекающего в протяжённый заземлитель конечной длины, рассмотрим случай возникновения на его входе напряжения  $U_M = 10^4$  В;  $t_\phi = 2 \cdot 10^{-6}$  с;  $\tau_M = 50 \cdot 10^{-6}$  с. Принимая  $g = 1$  (1/Ом·км) и длину заземлителя 400 м, получим:

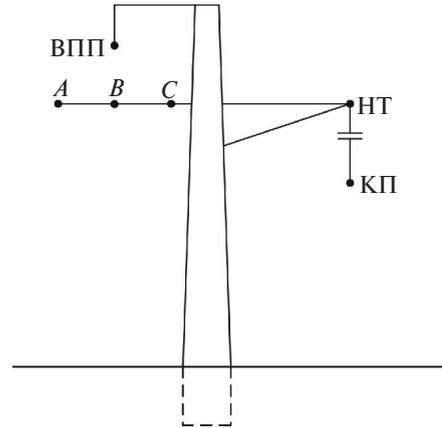


Рис. 3. Расположение ВЛ 10–35 кВ на опоре контактной сети: КП – контактный провод; НТ – несущий трос; ВПП – высоковольтный питающий провод; А, В, С – провода ВЛ

$$y_{пер}(t) = 0,198 - 0,0024e^{-294t} - 0,1956e^{-2,077 \cdot 10^5 t}.$$

Результаты расчёта тока молнии через протяжённый заземлитель при разряде молнии в ВПП и заземлении опор контактной сети с ИЗ приведены на рис. 2.

Установлено, что при протяжённости искусственного заземлителя 400 м и более уровни коммутационных перенапряжений соизмеримы по значению с перенапряжениями, имеющими место при использовании рельсового пути в качестве естественного. Это, в свою очередь, свидетельствует о целесообразности использования секционированного полосового искусственного заземлителя для грозозащиты и заземления опор контактной сети при расположении на них высоковольтного питающего провода.

**Электромагнитное влияние СЭ ВПП на линии продольного электроснабжения.** При внедрении СЭ с ВПП РП необходимо обеспечить электромагнитную совместимость с ней электроустановок и сетей нетяговых потребителей, в частности высоковольтных линий автоблокировки, линий продольного электроснабжения и т.д.

Для электроснабжения нетяговых потребителей, расположенных в непосредственной близости от электрифицированных линий, используются воздушные линии электропередачи (ВЛ) напряжением 10 (35) кВ. Линии могут располагаться как на опорах контактной сети, так и на отдельно стоящих опорах на некотором расстоянии от СЭ ВПП.

Применительно к системе электроснабжения нетяговых потребителей при их питании от ВЛ важно знать напряжение фаз относительно земли [7].

Схема расположения провода ВЛ для определения электрического влияния контактной сети и ВПП приведена на рис. 3.

Векторы напряжений фазных проводов ВЛ относительно земли:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_0 = \dot{U}_{a0} + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_B &= \dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_0 = \dot{U}_{b0} + \dot{U}_0 = \dot{U}_{a0} e^{-j120^\circ} + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_C &= \dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_0 = \dot{U}_{c0} + \dot{U}_0 = \dot{U}_{a0} e^{j120^\circ} + \dot{U}_0, \end{aligned}$$

где  $\dot{U}_0$  – вектор напряжения нулевой последовательности:  $U_0 = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / 3$ .

При рассмотрении условий работы линий продольного электроснабжения потребовалось решение задач схемотехнического моделирования процессов, происходящих в реальных сетях. Использование компьютерного моделирования для этих целей позволило максимально приблизить создаваемые модели к реальным условиям эксплуатации и выдавать практические рекомендации для улучшения электромагнитной совместимости устройств нетягового электроснабжения.

Модель тяговой сети реализована с помощью набора схем замещения, представленных в виде каскадного соединения многополюсников. Схема замещения 200 м тяговой сети с ВПП и тремя фазами ВЛ представлена на рис. 4.

Ветвью между зажимами 1K и 2K обозначена контактная сеть в составе несущего троса, контактного провода. Ветвь 1U–2U моделирует высоковольтный питающий провод, а 1VA–2VA (VB, VC) – соответствующий фазный провод ВЛ, 1R–2R представляет собой проводник, содержащий параметры рельсовой цепи; 1Z–2Z – земля; R5 и R6 обозначают в модели принятое значение переходного сопротивления между рельсом и землей.

Индуктивное и активное сопротивления контуров провод–земля, зависящие от частоты, моделировались двухполюсником типа RL. Коэффициенты взаимной индуктивности K1–K15 отражают магнитное взаимодействие между токами в контактном и усиливающем, усиливающем и фазном, контактном и фазном проводами и т.д.

При компьютерном моделировании электромагнитных процессов в СЭ ВПП РП использованы модели тяговой подстанции, электроподвижного состава и т.д., полученные ранее применительно к традиционной СЭ напряжением 25 кВ [4].

Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в СЭ ВПП РП проведено примени-

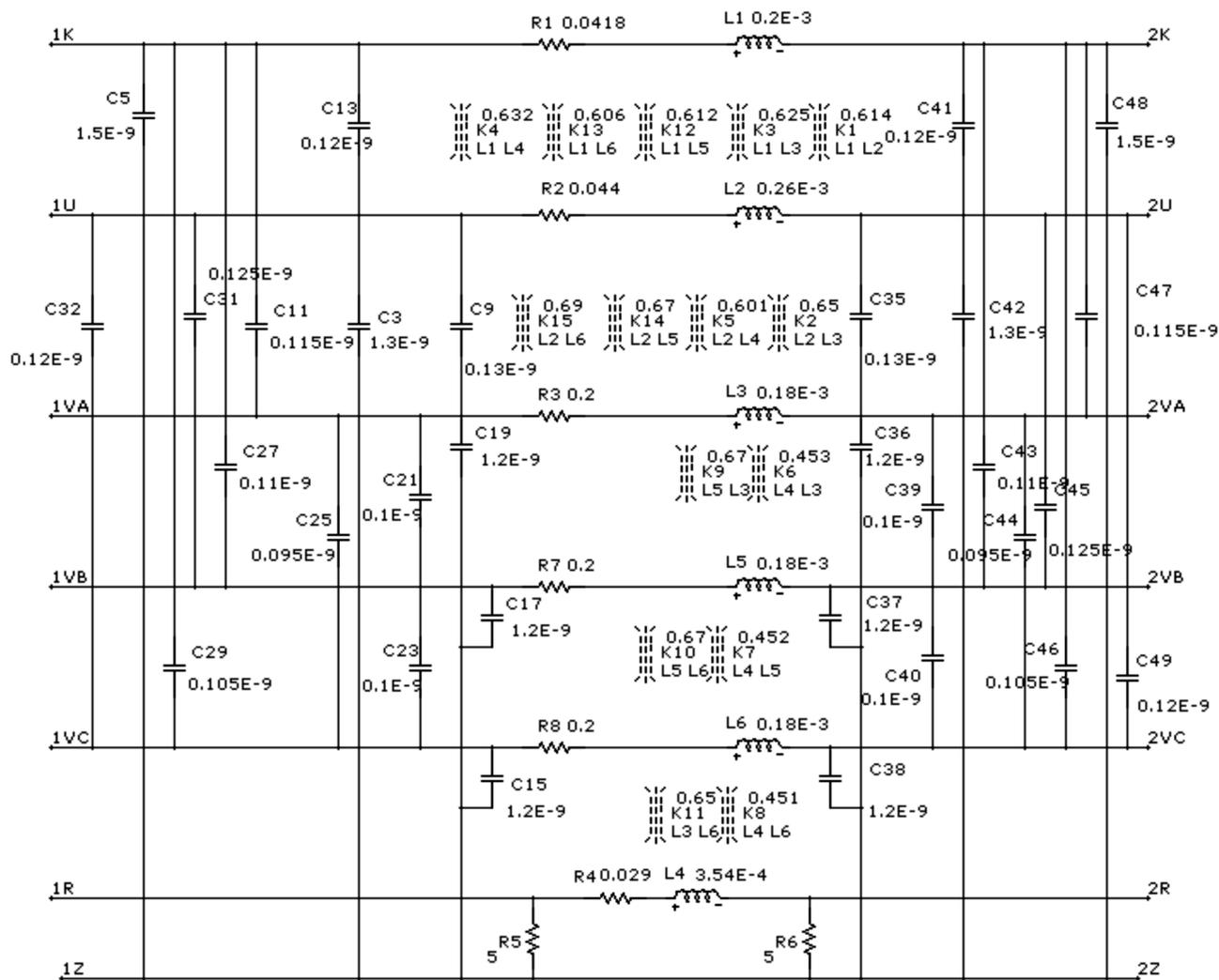


Рис. 4. Схема замещения однопутного участка тяговой сети длиной 200 м

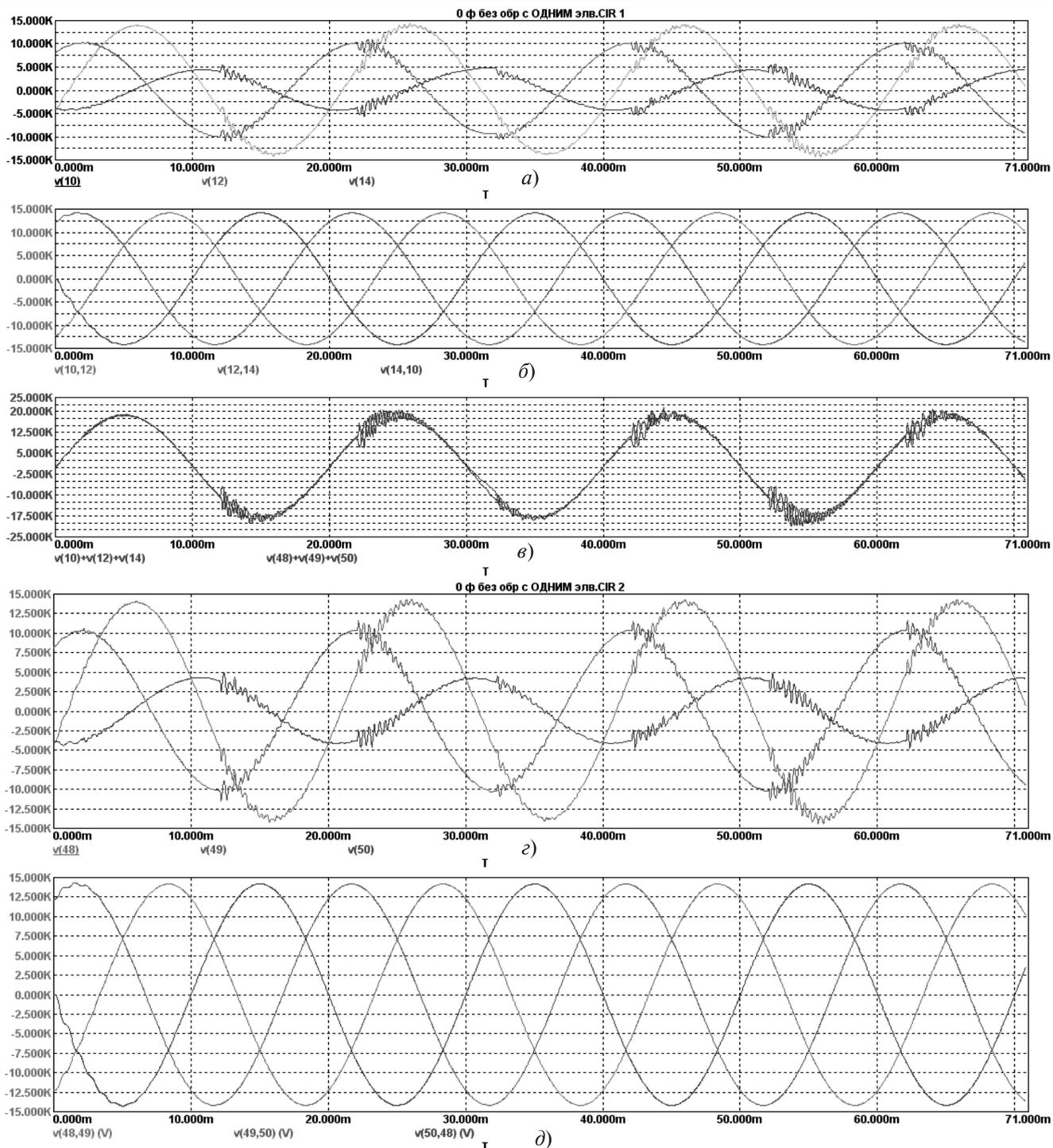


Рис. 5. Результаты расчета фазных и линейных напряжений в начале ВЛ (а и б), напряжения нулевой последовательности в начале и конце линии (в), фазных и линейных напряжений в конце линии (г и д) при нахождении на участке ЭПС и при отсутствии

только к однопутному участку с двухсторонним питанием, расстояние между трансформаторными подстанциями, получающими питание от ВПП, 40 км, протяжённость линии СЭ ВПП РП составляет 160 км, ВЛ расположена на опорах контактной сети. Учтена установка двух фильтров напряжения нулевой последовательности – в начале и конце линии.

Модель тяговой сети реализована с помощью набора схем замещения, представленных в виде

каскадного соединения многополюсников. Результаты моделирования – графики линейных напряжений в начале ВЛ (первая группа графиков), напряжения нулевой последовательности в начале линии (вторая), линейных напряжений в конце ВЛ (третья) – приведены на рис. 5.

Предложенная в [4] упрощённая модель ЭПС позволила реализовать близкий к реальному спектральный состав тягового тока и напряжения на токоприемнике ЭПС, а также оценить влияние

ФННП на значение и спектральный состав фазных и линейных напряжений в начале ВЛ 10 кВ и в конце линии при нахождении на участке ЭПС.

Сравнение результатов для нормального режима работы системы показало, что отсутствие ФННП в исследуемой схеме вызывает многократный рост значений напряжений нулевой последовательности ВЛ, значительную несимметрию фазных напряжений и наличие большего числа помех как в начале, так и в конце линии. На основе проведенных исследований можно сделать вывод о положительной роли установки ФННП при расположении ВЛ в зонах электромагнитного влияния контактной сети переменного тока (особенно на ее опорах).

Проведенный спектральный анализ для нормального режима работы системы с установкой ФННП и без таковой также позволил подтвердить значительный положительный эффект установки двух ФННП. Так, гармонические составляющие фазного напряжения в конце линии ВЛ, вызванные электромагнитным влиянием тяговой нагрузки, при установке ФННП снизились в несколько раз. Установка фильтров позволила сгладить и выровнять спектральный состав напряжения, минимизировать эффект резонансных явлений на высоких частотах.

**Выводы.** 1. Обоснован алгоритм расчёта токов молнии, стекающих с металлической полосы при ее расположении в земле, в случае возникновения на входе искусственного заземлителя импульсных перенапряжений, обусловленных разрядом тока молнии в опору контактной сети. Целесообразно при расчете грозовых перенапряжений в металлической полосе конечной длины импульсное напряжение на входе заземлителя принимать в виде наложения двух косоугольных импульсов, сдвинутых относительно друг друга на время, равное длительности фронта волны.

2 В районах с обычными грунтами, т.е. при удельном электрическом сопротивлении менее 200 Ом·м, импульсное сопротивление металлической полосы при ее длине не менее 400 м удовлетворяет требованиям нормативных документов, предъявляемых к заземлителю грозозащитных устройств высоковольтной линии напряжением свыше 1000 В. Применительно к СЭ ВПП целесообразно заземление опор контактной сети на протяжённый, не соединённый с рельсовым путём, секционированный искусственный заземлитель.

3. Обоснована методика и проведено компьютерное моделирование электромагнитного влияния СЭ ППН РП на линии продольного электроснабжения нетяговых потребителей. За счет некомпенсированного электрического поля, обусловленного напряжением высоковольтного питающего провода, наведённое напряжение в ВЛ (напряжением свыше 1000 В) достигает значений, существенно превосходящих допустимые нормативными доку-

ментами уровни. Для ограничения электромагнитного влияния СЭ ППН РП на линии продольного электроснабжения нетяговых потребителей необходимо в ВЛ включать фильтры напряжения нулевой последовательности, либо располагать ВЛ на опорах, находящихся вне полосы отвода электрифицированной железной дороги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марквардт К.Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982, 528 с.
2. **Мамошин Р.Р.** Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1973, 315 с.
3. **Косарев А.Б.** Основы теории электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения переменного тока. М.: ИНТЕКСТ, 2004, 272 с.
4. **А.с. № 1689143 А1.** Система тягового электроснабжения участков переменного тока/Т.К. Асанов, Б.И. Косарев, Р.И. Караев, С.Ю. Петухова. — БИ, № 4, 3 с.
5. **Косарев А.Б., Косарев Б.И.** Электромагнитная совместимость электроустановок и сетей нетягового электроснабжения с электрифицированными железными дорогами переменного тока. — Электроника и электрооборудование транспорта, 2016, № 5, с. 39–44.
6. **Петухова С.Ю.** Усиление тяговых сетей переменного тока использованием распределённого питания и провода повышенного напряжения: Дис... канд. техн. наук. М.: МИИТ, 1994, 156 с.
7. **Косарев А.Б., Косарев Б.И.** Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: ИНТЕКСТ, 2008, 480 с.
8. **Косарев А.Б., Логинов С.В.** Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока. — Вестник ВНИИЖТ, 2009, № 2, с. 9–12.
9. **Долгинов А.И.** Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968, 464 с.
10. **Караев Р.И., Косарев Б.И.** Схемы замещения стального рельса в переходном режиме. — Электричество, 1968, № 7, с. 11–15.
11. **Правила** устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. М.: Транспорт, 1999, 77 с.
12. **Фельдбаум А.А.** Введение в теорию нелинейных цепей. М.: Госэнергоиздат, 1948, 324 с.
13. **Косарев А.Б., Косарев Б.И.** Расчёт параметров электрического поля с неоднородной электрической структурой земли при стекании тока с искусственного заземлителя. — Электроника и электрооборудование транспорта, 2016, № 3, с. 8–12.
14. **Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В.** Электромагнитные процессы в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. М.: LLC ООО «ВМГ-Принт», 2015, 348 с.

[27.03.2019]

*А в т о р ы:* **Косарев Александр Борисович** — доктор техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», диссертацию защитил в 1999 г.

**Косарев Борис Иванович** — доктор техн. наук, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), диссертацию защитил в 1975 г.

## Electromagnetic Compatibility of the Electrical Installations of Non-Traction Loads and the Power Supply System with a High-Voltage Power Lead

**KOSAREV Alexander B.** (*ISC «Railway Research Institute» Moscow, Russia*) – *First Deputy Director General, Professor, Dr. Sci (Eng.)*

**KOSAREV Boris I.** (*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*) – *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

*A procedure for calculating switching overvoltages, including those that occur when lightning currents discharge in a power supply system's contact system with a high-voltage power lead, is substantiated. It has been found that the floor-mounted signaling arrangements can be protected from switching overvoltages in the power supply system with a high-voltage power lead (HVPL PSS) by connecting the contact system supports with a long grounding conductor laid in the ground and not connected with the railway. An algorithm for simulating the spectral composition of zero sequence phase voltage components in overhead power lines with the insulated neutral with respect to ground in the case of their location in the HVPL PSS electromagnetic influence zone and the presence of a zero sequence voltage filter (ZSVF). If the studied system does not contain a ZSVF, this results in a multifold increase of the power line zero sequence voltages, imbalance of the phase voltages, and the occurrence of interference both at the line beginning and end points. The use of filters made it possible to smooth and flatten the spectral composition of voltage and to minimize the effect of resonance phenomena at high frequencies.*

**Key words:** *traction network, power lead, switching overvoltages, artificial grounding conductor, current, voltage*

### REFERENCES

1. **Markvardt K.G.** *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Electricity supply for electrified railways). Moscow, Transport, 1982, 528 p.
2. **Mamoshin R.R.** *Povysheniye kachestva energii na tyagovykh podstantsiyakh dorog peremennogo toka* (Improvement of electric power quality at AC railway traction substations). Moscow, Transport, 1973, 315 p.
3. **Kosarev A.B.** *Osnovy teorii elektromagnitnoi sovmestimosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* (Fundamentals of the AC traction power supply system electromagnetic compatibility theory). Moscow, INTEKST, 2004, 272 p.
4. **A.s. No. 1689143 A1.** *Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya uchastkov peremennogo toka* (The traction power supply system of AC segments). Bulletin of inventions, 1991, No. 4, 3 p.
5. **Kosarev A.B., Kosarev B.I.** *Elektronika i oborudovaniye transporta – in Russ. (Electronics and electrical equipment of transport)*, 2016, No. 5, pp. 39–44.
6. **Petukhova S.Yu.** *Usileniye tyagovykh setei peremennogo toka ispol'zovaniyem raspredeleennogo pitaniya i provoda povyshennogo napryazheniya: dis.... kand. tekhn nauk* (Strengthening of AC traction networks by using distributed power supply and an increased voltage lead). Moscow, MIIT, 1994, 156 p.
7. **Kosarev A.V., Kosarev B.I.** *Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta* (Fundamentals of the electromagnetic safety of railway transport power supply systems). Moscow, INTEKST, 2008, 480 p.
8. **Kosarev A.B., Loginov S.V.** *Vestnik VNIIZhT – in Russ. (Bulletin of VNIIZhT)*, 2009, No. 2, pp. 9–12.
9. **Dolginov A.I.** *Tekhnika vesokikh napryazhenii v elektroenergetike* (High voltage technology in the electric power industr). Moscow, Energiya, 1968, 464 p.
10. **Karaev R.I., Kosarev B.I.** *Electrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1968, No. 7, pp. 11–15.
11. **Pravila ustroystva sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog RF** (Codes for designing the traction power supply system for the Russian Federation railways). Moscow, Transport, 1999, 77p.
12. **Fel'dbaum A.A.** *Vvedeniye v teoriyu nelineinykh tsepei* (Introduction to the theory of nonlinear circuits). Moscow, Gosenergoizdat, 1948, 324 p.
13. **Kosarev A.B., Kosarev B.I.** *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ (Electronics and electrical equipment of transport)*, 2016, No. 3, pp. 8–12.
14. **Kosarev A.B., Kosarev B.I., Serbiyenko D.V.** *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* (Electromagnetic processes in AC railway power supply systems). Moscow, LLC «VMG-Print», 2015, 348 p.

[27.03.2019]