

УДК 621.315.1: 629.423 + 621.311.1

В. С. МОГИЛА, кандидат технических наук; С. Г. ДОДОЛЕВ, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Рассмотрены способы определения влияния высоковольтных проводов контактной сети (КС) на линии автоблокировки и продольного электроснабжения. Представлены результаты измерений на шинах тяговой подстанции Бобр, питающей участок Славное – Новосады Оршанского узла Минского отделения Белорусской железной дороги. Предложена методика определения взаимного влияния тяговой сети и высоковольтных линий автоблокировки на электрифицированных участках железной дороги. На основании данной методики разработана математическая модель взаимного влияния контактной сети и продольных линий электропередач. Приводится пример расчета взаимного электростатического влияния двухпутного участка железной дороги, электрифицированной по системе 1×25 кВ, с ДПП и линией продольного электроснабжения 6 кВ. По результатам расчетов, проведенных для различных режимов работы КС, были определены коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательностям.

Тяговая сеть электрифицированных железных дорог постоянного и переменного тока является источником электрических, магнитных полей и блуждающих токов (токов в земле). Наличие выпрямителей и инверторов в системе тягового электроснабжения вызывает появление высших гармоник в кривых напряжения и тока тяговой сети и, тем самым, образование переменных электрических и магнитных полей. Отсюда следует, что тяговая сеть электрифицированных железных дорог оказывает на смежные линии электропередач магнитное, электрическое и гальваническое влияния [3].

При сближении контактной сети (КС) и линии электропередач (ЛЭП) возникает значительное электростатическое влияние на низковольтные линии, что ухудшает в них качество электроэнергии. В настоящее время в целях экономии расходов на эксплуатацию ЛЭП на некоторых участках железной дороги продольные ЛЭП уже вынесены в зону отчуждения железной дороги. Это повлекло за собой ухудшение качества электроэнергии в них.

Для определения уровней наведенных напряжений были проведены измерения на шинах тяговой подстанции Бобр, питающей участок Славное – Новосады Оршанского узла Минского отделения Белорусской железной дороги. Измерения проводились при помощи прибора Ерис КЭ–02 в соответствии с методикой измерения [1] и ГОСТ-13109.97 [2].

Как показал анализ полученных результатов, влияние КС на продольные линии электропитания существенно. Наблюдается искажение как значений фазных напряжений, так и начальных углов сдвига фаз.

Наличие несимметрии напряжений в ЛЭП снижает мощность асинхронных двигателей, ухудшает условия работы ламп электрического освещения, устройств автоблокировки и связи. В трансформаторах, имеющих заземленную нейтраль, появляются добавочные потери, вследствие чего уменьшается коэффициент их полезного действия и увеличивается нагрев, который обуславливает преждевременное старение обмоток изоляции.

При определении уровня наведенных в ЛЭП потенциалов следует учитывать, что влияющими проводами являются не только провода контактной подвески, но и два дополнительных провода – рельс (ДПП), которые могут получать питание от различных фаз тягового трансформатора (ТТ) и, следовательно, находиться под различными фазными напряжениями.

Влияние проводов КС и ЛЭП может быть определено методом групп формул Максвелла [4]. При его использовании автор предлагает переменные фазные и линейные напряжения представлять квазистационарными, т. е. в любой дискретный момент времени не изменяющимися. При этом расчетная схема для определенного фиксированного момента времени $t = 0$ будет иметь вид, показанный на рисунке 1.

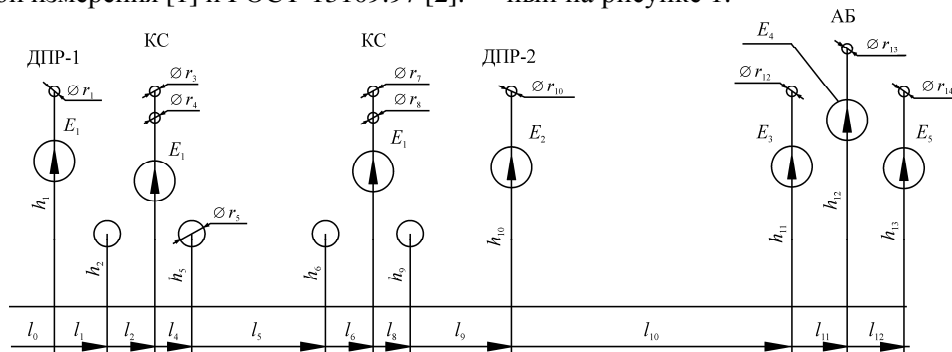


Рисунок 1 – Схема расположения коммуникаций на двухпутном участке железнодорожного полотна

Режим работы ее определяется следующими параметрами: l_i – расстояние от оси пути до i -го провода; h_i – высота подвеса i -го провода; r_i – приведенный радиус i -го провода; $E_1 \dots E_n$ – значения соответствующих напряжений относительно земли в момент времени t_i , т. е.

$$E_1(t_1) = u_1(t), \quad (1)$$

$$E_2(t_2) = u_2(t). \quad (2)$$

Под $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$ понимаются мгновенные значения соответствующих напряжений источников питания, подключенных к контактной подвеске (КП), ДПР и ЛЭП.

Все параметры, которые характеризуют расчетную мгновенную схему, можно разделить на две группы: параметры, изменяющиеся во времени [$u_i(t), e_i(t), \varphi_i(t), \tau_i(t)$] и неизменные (l_i, h_i, r_i). Последняя группа параметров позволяет определить коэффициенты, входящие в группы формул Максвелла, т. е. коэффициенты матриц $[\alpha], [\beta], [\gamma]$.

Используя третью группу формул Максвелла для любого момента времени (t_i), несложно определить значения наведенных в проводах потенциалов. Изменяя последовательно от нуля до T значение времени t_i , можно найти ряд потенциалов, наведенных в проводах, которые и представляют собой закон их изменения во времени.

Для иллюстрации метода квазистационарных полей ниже приводится пример расчета взаимного электростатического влияния двухпутного участка железной дороги, электрифицированной по системе 1×25 кВ, с ДПР и линии продольного электроснабжения 6 кВ. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

При расчетах приняты следующие допущения:

- линии АБ, ДПР и КС расположены на одной и той же высоте по отношению к земле;
- линии АБ, ПЭ расположены параллельно оси пути;
- расчет ведется для ЛЭП, работающих в режиме холостого хода;
- магнитное влияние КС на ЛЭП не учитывается.

В таблице 1 приведены параметры электрической цепи для момента времени $t = 0$.

Таблица 1 – Параметры электрической цепи

Высота подвеса, мм	Расстояние, мм		Приведенный радиус, мм		
<i>Не изменяющиеся во времени параметры</i>					
h_1	7400	l_0	0	r_1	8
h_2	50	l_1	3000	r_2	46
h_3	6300	l_2	3760	r_3	8
h_4	7400	l_3	3760	r_4	8
h_5	50	l_4	4520	r_5	46
h_6	50	l_5	7100	r_6	46
h_7	6300	l_6	7860	r_7	8
h_8	7400	l_7	7860	r_8	8
h_9	50	l_8	8620	r_9	46
h_{10}	7400	l_9	11620	r_{10}	8
h_{11}	8000	l_{10}	41620	r_{11}	11
h_{12}	9732	l_{11}	42620	r_{12}	11
h_{13}	8000	l_{12}	43620	r_{13}	11
<i>Изменяющиеся параметры при $t = 0$</i>					
	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$E_4, В$	$E_5, В$
	0	-33680,5	0	5196,2	-5196,2

Для расчета принято, что КС питается от фазы А. Первый провод ДПР запитан также от фазы А, второй – от фазы В. ЛЭП получает питание от трехфазного источника напряжения 6 кВ.

Для определения напряжения в линии АБ были определены матрицы коэффициентов групп формул Максвелла $[\alpha], [\beta]$ и $[\gamma]$. Это квадратные, несобственные матрицы, имеющие для данной схемы размер 10×10 .

С помощью метода квазистационарных полей были определены потенциалы, наведенные в фазных проводах ЛЭП. Интервал времени между мгновенными схемами расчета принят $\Delta t = 0,001$ с. По результатам расчетов построены графики потенциалов (рисунок 2), наведенных в проводах ЛЭП ПЭ и АБ.

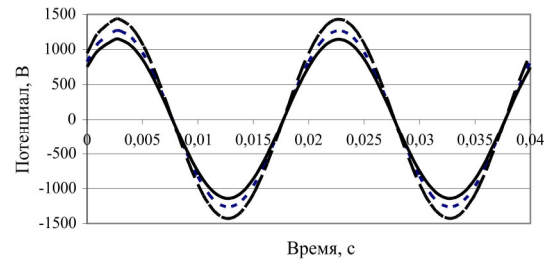


Рисунок 2 – Графики наведенных потенциалов в проводах продольных ЛЭП:
 - - - φ(A); - · - φ(B); — φ(C)

Аппроксимация графиков наведенных потенциалов позволяет получить их аналитические выражения:

$$\varphi_A = 1260,9 \sin(\omega t + 41,0^\circ); \quad (3)$$

$$\varphi_B = 1427,3 \sin(\omega t + 41,3^\circ); \quad (4)$$

$$\varphi_C = 1138,8 \sin(\omega t + 31,4^\circ). \quad (5)$$

В комплексной форме:

$$\varphi_A = 891,6 e^{j41,0^\circ}; \quad (6)$$

$$\varphi_B = 1009,2 e^{j41,3^\circ}; \quad (7)$$

$$\varphi_C = 805,3 e^{j41,4^\circ}. \quad (8)$$

Напряжения в проводах ЛЭП АБ определены как сумма симметричных фазных напряжений линии и наведенных в проводах потенциалов $\underline{U}_{\text{фн}} = U_{\text{ф}} + \varphi_{\text{н}}$. Начальная фаза напряжения U_A принята равной нулю. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения фазных напряжений ЛЭП с учетом влияния КС

Фаза	U	φ	$U + \varphi$	u
А	3464	$891,6 e^{j41,0^\circ}$	$4178 e^{j8,0^\circ}$	$5908,6 e^{j8,0^\circ}$
В	$3464 e^{-j120^\circ}$	$1009,2 e^{j41,3^\circ}$	$2529 e^{-j112,7^\circ}$	$3576,6 e^{-j112,7^\circ}$
С	$3464 e^{j120^\circ}$	$805,3 e^{j41,4^\circ}$	$3708 e^{j107,7^\circ}$	$5243,9 e^{j107,7^\circ}$

Графики фазных напряжений, построенных по результатам, приведенным в таблице 2, показаны на рисунке 3.

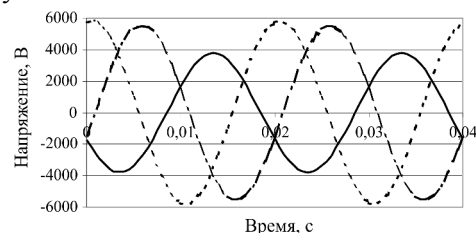


Рисунок 3 – Графики диаграмм напряжений в ЛЭП:
 - - - $U(A)$; - · - $\varphi(B)$; — $\varphi(C)$

Анализ результатов расчетов, приведенных в таблице 2 и показанных на рисунке 3, позволяют сделать следующие выводы:

– в проводах ЛЭП, находящихся на некотором расстоянии от электрифицированного участка электрической железной дороги, наводится потенциал, изменяющийся по закону, близкому к синусоидальному (см. рисунок 2);

– фазные напряжения ЛЭП несимметричны и отличаются в значительной степени от исходных;

– наведенное напряжение в значительной степени нарушает симметрию фазных напряжений в ЛЭП.

По результатам расчетов, проведенных для различных режимов работы КС, были определены коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательностям. Эти же параметры рассчитаны для напряжений, измеренных на реальном участке Оршанской дистанции электроснабжения. Результаты расчетов и измерений напряжений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета

Режим	ДПР и КС включены		ДПР отключено, КС включено		ДПР и КС отключены	
	Расчет, В	Эксперимент, В	Расчет, В	Эксперимент, В	Расчет, В	Эксперимент, В
U_A	3842	4031	3758	3847	3464	3713
U_B	3705	3753	3469	3676	3447	3681
U_C	2932	3328	3159	3465	3444	3544
$K_0 U_i$	11,58	10,78	8,58	6,43	3,13	2,36

Получено 05.11.2007

S. G. Dodolev, V. S. Mogila. Accounting estimation of the mutual electrostatic influence of electro transmission lines.

This article examines the methods of determining the influence of high-voltage wires of contact network (CN) on lines of autoblocking and longitudinal supply. The article presents the measurements of the buses of the tractive substation Bobr, which supplies the area of Slavnoye – Novosady, Orshansky node of Minsk branches of the Belorussian railway. The article offers methods of determining the mutual influence of tractive network and high-voltage lines of autoblocking on the electrified areas of the railway. On the grounds of given methods, a mathematical model of the mutual influence of contact network and longitudinal electrotransmission lines has been designed. The article cites an example of a calculation of mutual electrostatic influence of the two-way area of the railway, electrified by 1×25 kilovolts, with two wires rail and longitudinal supply line of 6 kilovolts. Based on the calculations conducted for various modes of CN functions, factors of non-symmetry on the zero and reverse sequence were developed.

Расчеты показали, что несимметрия фазных напряжений возникает в основном из-за появления в их составе нулевой последовательности. Обратная последовательность не рассматривается, т. к. она лежит в пределах нормы [2]. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных говорят об адекватности предложенной модели взаимного влияния КС и ЛЭП АБ.

Список литературы

1 Измеритель показателей качества электрической энергии ЭРИС КЭ.02. Руководство по эксплуатации 4222-005-002066411-01-РЭ. Сертификат соответствия 19.03.2001 г.

2 ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; введен 1999-01-01. – М., 2002.

3 **Марквардт, К. Г.** Энергоснабжение электрических железных дорог. – 3-е изд., перераб. и доп. / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1965. – 466 с.

4 **Нейман, Л. Р.** Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 2 т. Т. 2. – 3-е изд., перераб. и доп. / Л. Р. Нейман, К. С. Димирчан. – Л. : Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 416 с.

5 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники : учеб. для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л. А. Бессонов. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1973. – 752 с.