

УДК 62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ СМЕЖНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Айдарова Айгерим Рашидовна

аспирант

Абылгазиев Жыргалбек Сагындыкович

аспирант

Асанова Салима Муратовна

кандидат технических наук

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Бишкек (Кыргызстан)

mail@apriori-journal.ru

Аннотация. На основе метода переменных состояний, составлена математическая модель двух смежных линий электропередач с учетом их взаимных электрических и магнитных влияний. Представлены результаты численного моделирования процессов линий электропередач, которые могут быть использованы при решении задач электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: метод переменных состояний; математическая модель; электрическое и магнитное влияние двух линий; граф; матрица.

MODELLING OF MUTUAL ELECTROMAGNETIC INFLUENCES OF ADJACENT POWER LINES

Aidarova Aigerim Rashidovna

post-graduate student

Abylgaziev Zhirgalbek Sagindikovich

post-graduate student

Asanova Salima Muratovna

candidate of technical sciences

Kyrgyz State Technical University of I. Razzakov, Bishkek (Kyrgyzstan)

Abstract. On the basis of a method of variable states, the mathematical model of two adjacent power lines taking into account their mutual electric and magnetic influences is made. The result of numerical modeling of processes of these of a power line which can be used at the solution of problems of their electromagnetic compatibility is presented.

Key words: method of variable states; mathematical model; electric and magnetic influence of two lines; columns; matrix.

В настоящее время проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) в системах электроснабжения предприятий, где широко используются частотно-регулируемые электроприводы на базе силовых полупроводниковых преобразователей, приобретает актуальный характер, так как эти электроприводы искажают формы кривых напряжения и тока сети, что, в свою очередь, негативно влияет на режимы работы различных типов электроустановок, приводит к ложному срабатыванию релейной защиты и автоматики, являясь главной причиной нарушения ЭМС

электрооборудования. Кроме того, наличие большого числа электромагнитных помех (ЭМП) различных типов затрудняет, а в худшем случае, делает невозможным, нормальное функционирование некоторых видов электрооборудования, что является причиной возникновения отказов и аварийных ситуаций в сетях этих предприятий [2].

В качестве ЭМП может фигурировать практически любое электромагнитное явление в широком диапазоне частот.

При проектировании линий электропередачи необходимо учитывать различные ситуации, в том числе и результаты расчетов наводимых напряжений на смежные линии со стороны высоковольтных или сильноточных ЛЭП. Расчеты режима многопроводной системы со взаимными электрическими и магнитными влияниями автоматически приводят к определению наведенных напряжений на смежных проводах, позволяя решать проблемы электромагнитной совместимости.

Исследования ЭМП которые можно выполнять на основе математического моделирования необходимы как на эксплуатируемых, так и на вновь создаваемых объектах.

В работе [1] моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП рассмотрено для случая, когда одна линия является активной, т.е. вначале этой линии действует источник $e(t)$, а в конце подключена нагрузка сопротивлением Z_H . Вторая линия по концам которой подключены сопротивления R_A и R_B , расположена параллельно первой на некотором расстоянии. Математическая модель этих линий получена методом переменных состояний [3].

В данной работе выполнено дальнейшее обобщение этой модели, с помощью которой можно анализировать различные варианты взаимодействия для двух линий.

Схема замещения исследуемой сети и соответствующий этой схеме нормальный граф изображены на рисунках 1 и 2.

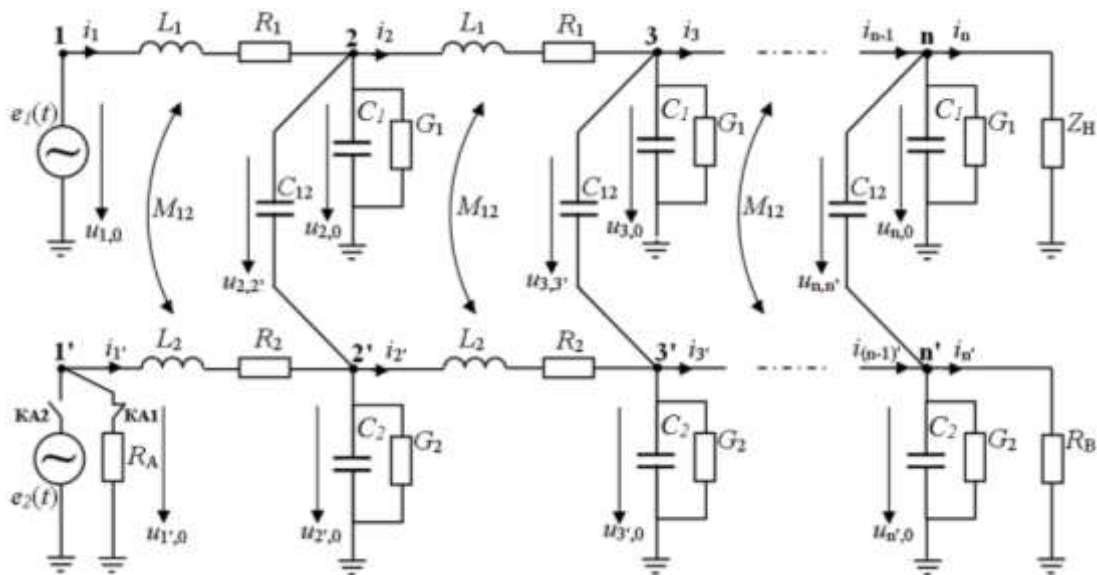


Рис. 1. Схема замещения исследуемой сети, где $Z_H = R_H + j\omega L_H$

На рис. 1 коммутационные аппараты KA_1 и KA_2 изображены только для того, чтобы иметь возможность анализа электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП для двух вариантов. Первый: вариант верхняя линия активна, а нижняя пассивна (KA_1 – замкнут, KA_2 – разомкнут); второй: обе линии активны (KA_1 – разомкнут, KA_2 – замкнут).

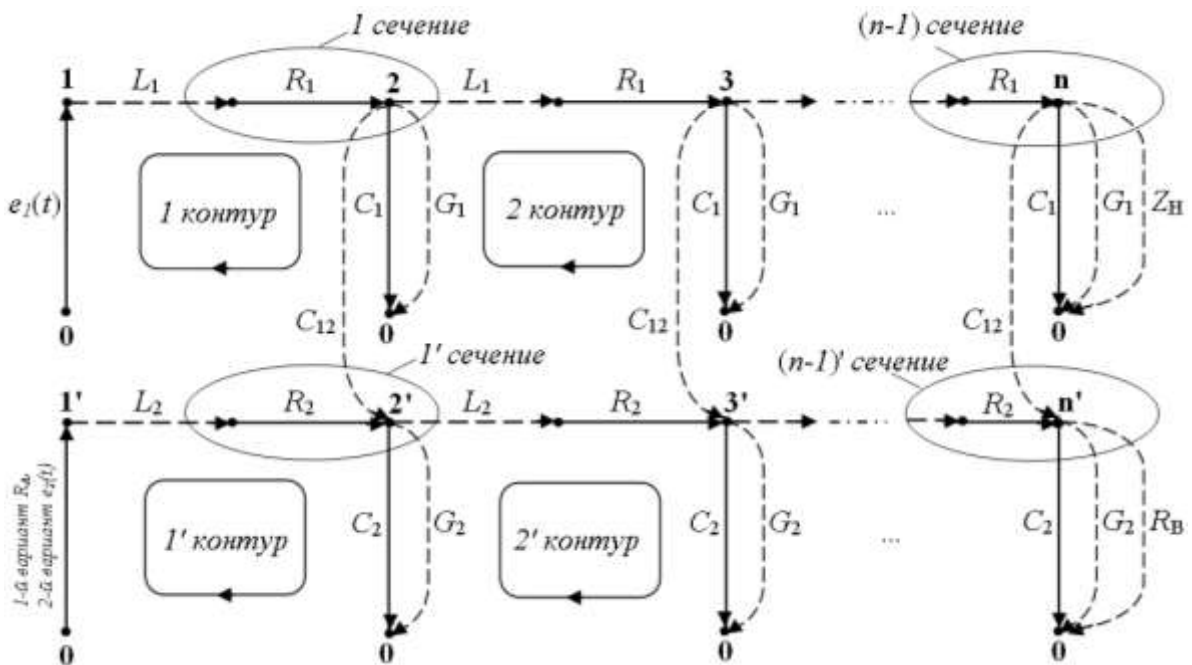


Рис. 2. Нормальный граф исследуемой сети, где в 1-м варианте ветвь дерева (0-1') содержит R_A , т.е. KA_1 – замкнут, а KA_2 – разомкнут, а во 2-м варианте ветвь дерева (0-1') содержит $e_2(t)$, т.е. KA_1 – разомкнут, KA_2 – замкнут

В качестве переменных состояния выбраны напряжения $u_{2,0}, u_{3,0}, \dots, u_{n,0}, u_{2',0}, u_{3',0}, \dots, u_{n',0}$ и токи $i_1, i_2, \dots, i_n, i_1', i_2', \dots, i_n'$ вдоль 1-ой и 2-ой линий. Выделение этих величин в качестве переменных, характеризующих энергетическое состояние электрической цепи, позволяет формировать дифференциальные уравнения в нормальной форме, так как только в этих элементах токи и напряжения связаны между собой через производные.

Составим уравнения для независимых сечений и независимых контуров по первому и соответственно второму законам Кирхгофа для 1-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа (рис. 2) содержит R_A , т.е. коммутационный аппарат KA_1 замкнут, а KA_2 разомкнут:

$$1) \text{ Для 1-го сечения: } i_1 - i_2 - i_{C1} - i_{G1} - i_{C12} = 0,$$

$$\text{где } i_{C1} = C_1 \frac{du_{2,0}}{dt}; \quad i_{G1} = G_1 u_{2,0}; \quad i_{C12} = C_{12} \frac{du_{2,2'}}{dt} = C_{12} \frac{du_{2,0}}{dt} - C_{12} \frac{du_{2',0}}{dt}.$$

Тогда получим:

$$(C_1 + C_{12}) \frac{du_{2,0}}{dt} - C_{12} \frac{du_{2',0}}{dt} = i_1 - i_2 - G_1 u_{2,0}; \quad (1)$$

$$2) \text{ Для 2-го сечения: } i_2 - i_3 - i_{C1} - i_{G1} - i_{C12} = 0,$$

$$\text{где } i_{C1} = C_1 \frac{du_{3,0}}{dt}; \quad i_{G1} = G_1 u_{3,0}; \quad i_{C12} = C_{12} \frac{du_{3,3'}}{dt} = C_{12} \frac{du_{3,0}}{dt} - C_{12} \frac{du_{3',0}}{dt}.$$

Тогда:

$$(C_1 + C_{12}) \frac{du_{3,0}}{dt} - C_{12} \frac{du_{3',0}}{dt} = i_2 - i_3 - G_1 u_{3,0}. \quad (2)$$

Аналогично и для других сечений.

$$3) \text{ Для } (n-1)\text{-го сечения: } i_{n-1} - i_n - i_{C1} - i_{G1} - i_{C12} = 0,$$

$$\text{где } i_{C1} = C_1 \frac{du_{n,0}}{dt}; \quad i_{G1} = G_1 u_{n,0}; \quad i_{C12} = C_{12} \frac{du_{n,n'}}{dt} = C_{12} \frac{du_{n,0}}{dt} - C_{12} \frac{du_{n',0}}{dt}.$$

Тогда:

$$(C_1 + C_{12}) \frac{du_{n,0}}{dt} - C_{12} \frac{du_{n',0}}{dt} = i_{n-1} - i_n - G_1 u_{n,0}; \quad (3)$$

$$4) \text{ Для 1'-го сечения: } i_1' - i_2' - i_{C2} - i_{G2} + i_{C12} = 0,$$

$$\text{где } i_{C2} = C_2 \frac{du_{2',0}}{dt}; \quad i_{G2} = G_2 u_{2',0}; \quad i_{C12} \text{ приведен в пункте 1 (см. выше).}$$

Тогда получим:

$$(C_2 + C_{12}) \frac{du_{2,0}'}{dt} - C_{12} \frac{du_{2,0}}{dt} = i_1' - i_2' - G_2 u_{2,0}'; \quad (4)$$

5) Для $(n-1)$ '-го сечения: $i_{(n-1)'} - i_{n'} - i_{C2} - i_{G2} + i_{C12} = 0$,

где $i_{C2} = C_2 \frac{du_{n,0}'}{dt}$; $i_{G2} = G_2 u_{n,0}'$; $i_{n'} = \frac{u_{n,0}'}{R_B} = G_B u_{n,0}'$, i_{C12} имеет вид пункта 3 (см. выше).

Тогда получим:

$$(C_2 + C_{12}) \frac{du_{n,0}'}{dt} - C_{12} \frac{du_{n,0}}{dt} = -G_B u_{n,0}' - i_{(n-1)'} - G_2 u_{n,0}'; \quad (5)$$

6) Для 1-го контура: $u_{L1} + u_{R1} + u_{2,0} \pm u_{M12} = e_1(t)$,

где $u_{L1} = L_1 \frac{di_1}{dt}$; $u_{R1} = R_1 i_1$; $u_{M12} = M_{12} \frac{di_1'}{dt}$.

Тогда:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M_{12} \frac{di_1'}{dt} = e_1(t) - R_1 i_1 - u_{2,0}; \quad (6)$$

7) Для 2-го контура: $u_{L1} + u_{R1} + u_{3,0} - u_{2,0} \pm u_{M12} = 0$,

где $u_{L1} = L_1 \frac{di_2}{dt}$; $u_{R1} = R_1 i_2$; $u_{M12} = M_{12} \frac{di_2'}{dt}$.

Тогда:

$$L_1 \frac{di_2}{dt} \pm M_{12} \frac{di_2'}{dt} = u_{2,0} - u_{3,0} - R_1 i_2. \quad (7)$$

Аналогично и для других контуров.

8) Для $(n-1)$ -го контура: $u_{L1} + u_{R1} + u_{n,0} - u_{(n-1),0} \pm u_{M12} = 0$,

где $u_{L1} = L_1 \frac{di_{n-1}}{dt}$; $u_{R1} = R_1 i_{n-1}$; $u_{M12} = M_{12} \frac{di_{(n-1)'}}{dt}$.

Тогда получим:

$$L_1 \frac{di_{n-1}}{dt} \pm M_{12} \frac{di_{(n-1)'}}{dt} = u_{(n-1),0} - u_{n,0} - R_1 i_{n-1}; \quad (8)$$

9) Для n -го контура: $u_{LH} + u_{RH} - u_{n,0} = 0$, где $u_{LH} = L_H \frac{di_n}{dt}$; $u_{RH} = R_H i_n$.

Тогда:

$$L_H \frac{di_n}{dt} = u_{n,0} - R_H i_n; \quad (9)$$

10) Для 1'-го контура: $u_{RA} + u_{L2} + u_{R2} + u_{2,0} \pm u_{M12} = 0$,

где $u_{L2} = L_2 \frac{di_1'}{dt}$; $u_{R2} = R_2 i_1'$; $u_{RA} = R_A i_1'$; $u_{M12} = M_{12} \frac{di_1}{dt}$.

Тогда:

$$L_2 \frac{di_1'}{dt} \pm M_{12} \frac{di_1}{dt} = -R_A i_1' - u_{2',0} - R_2 i_1'; \quad (10)$$

11) Для $(n-1)$ '-го контура: $u_{L2} + u_{R2} + u_{n',0} - u_{(n-1)',0} \pm u_{M12} = 0$,

где $u_{L2} = L_2 \frac{di_{(n-1)'}}{dt}$; $u_{R2} = R_2 i_{(n-1)'}$; $u_{M12} = M_{12} \frac{di_{n-1}}{dt}$,

Тогда получим:

$$L_2 \frac{di_{(n-1)'}}{dt} \pm M_{12} \frac{di_{n-1}}{dt} = u_{(n-1)',0} - u_{n',0} - R_2 i_{(n-1)'}. \quad (11)$$

Уравнения для 2-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа (рис. 2) содержит $e_2(t)$, т.е. коммутационный аппарат КА1 разомкнут, а КА2 замкнут, составляются уравнения, аналогичные (1)-(11).

Далее уравнения (1) (11) запишем в матричной форме: (1)-(11)

$$H \frac{dX}{dt} = K \cdot X + S \cdot E \quad \text{или} \quad \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} G & F_{12} \\ F_{21} & R \end{bmatrix} \cdot X + S \cdot E, \quad (12)$$

где $X = [u_{2,0} \ u_{3,0} \ \dots \ u_{n,0} \ u_{2',0} \ u_{3',0} \ \dots \ u_{n',0} \ i_1 \ i_2 \ \dots \ i_{n-1} \ i_n \ i_1' \ i_2' \ \dots \ i_{(n-1)'}]^T$,

$$C = \begin{bmatrix} C_1 + C_{12} & 0 & \dots & 0 & -C_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_1 + C_{12} & \dots & 0 & 0 & -C_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_1 + C_{12} & 0 & 0 & \dots & -C_{12} \\ -C_{12} & 0 & \dots & 0 & C_2 + C_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -C_{12} & \dots & 0 & 0 & C_2 + C_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -C_{12} & 0 & 0 & \dots & C_2 + C_{12} \end{bmatrix},$$

$$G = \text{diag}\{-G_1 \ -G_1 \ \dots \ -G_1 \ -G_2 \ -G_2 \ \dots \ -G_2 \ -G_B\},$$

$$E = [e_1(t) \ e_2(t)]^T,$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \pm M_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \pm M_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \pm M_{12} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & L_H & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \pm M_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 & L_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \pm M_{12} & \dots & 0 & 0 & 0 & L_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \pm M_{12} & 0 & 0 & 0 & \dots & L_2 \end{bmatrix},$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad F_{21} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix},$$

Для 1-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа (рис. 2) содержит R_A , т.е. КА1 – замкнут, а КА2 – разомкнут, подматрица R и матрица S записываются следующим образом:

$$R = \text{diag}\{-R_1 \quad -R_1 \quad \dots \quad -R_1 \quad -R_H \quad -R_2 - R_A \quad -R_2 \quad \dots \quad -R_2\},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Для 2-го варианта, когда ветвь дерева (0-1') нормального графа (рис. 2) содержит $e_2(t)$, т.е. КА1 – разомкнут, а КА2 – замкнут, подматрица R и матрица S записываются следующим образом:

$$R = \text{diag}\{-R_1 \quad -R_1 \quad \dots \quad -R_1 \quad -R_H \quad -R_2 \quad -R_2 \quad \dots \quad -R_2\},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Для численного интегрирования запишем (12) в форме Коши:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot E \quad \text{или} \quad \frac{dX}{dt} = f(x, t, e(t)), \quad x(0) = x_0, \quad (13)$$

где $A = H^{-1}K$, $B = H^{-1}S$, $f(x, t, e(t))$ – m -мерная вектор-функция; $e(t)$ – m -мерный вектор внешних воздействий; x_0 – m -мерный вектор начальных значений искомых величин.

Численное интегрирование полученных дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге-Кутты четвертой степени [4], который является одним из методов повышенной точности и наилучшим с точки зрения решения задач на ЭВМ.

Результаты моделирования линии с одним источником

Результаты моделирования методом Рунге-Кутты четвертой степени при заданных значениях параметров линии напряжением 220 кВ и 500 кВ ($R_1 = 0.0127$ Ом/км; $R_2 = 0.0127$ Ом/км; $L_1 = 0.0009337$ Гн/км; $L_2 = 0.0009337$ Гн/км; $G_1 = 0$ См/км; $G_2 = 0$ См/км; $C_1 = 0.000000012$ Ф/км; $C_2 = 0.000000012$ Ф/км; $C_{12} = 0.000000006$; $f = 60$ Гц; $Z_H = 100$ Ом) показаны на графике (рис. 3).



Рис. 3. Графики тока в начале первой (1) и в конце второй (2) линий

Моделирования при активности обеих линий проводится при других значениях параметров: $U_1, U_2, f_1, f_2, L_{12}, C_{12}$.

Полученные графики результатов в работе не приводятся из-за ограниченности объема статьи.

Заключение. Полученная математическая модель позволяет моделировать физические процессы в ЛЭП с учетом взаимно индуктивных и емкостных связей, в результате можно решать целый ряд важных научных и практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией ЭЭС. Модель также дает возможность предусматривать различные ситуации и решать множество задач, связанных, к примеру, с расчетами режимов систем при обрывах проводов линий, КЗ, или однофазных КЗ в сетях с изолированной нейтралью. В частности, можно рассчитывать наводимые напряжения линии со стороны высоковольтных или сильноточных ЛЭП.

Список использованных источников

1. Асанова С.М. Моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП на основе метода переменных состояний // Проблемы управления и информационных технологий. Матер. 2-й Междунар. конф. Бишкек: ИАИТ, 2015. С. 231-234.
2. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. 120 с.
3. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М.: Высшая школа., 1988. 335 с.
4. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975.