

## ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МНОГОЦЕПНЫХ, МНОГОФАЗНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**В. М. Постолатий, О. Х. Чалбаш**

*Институт энергетики Академии наук Молдовы*

**Аннотация.** В статье описан комплекс уравнений для расчета управляемых компактных многоцепных электропередач. Приведены уравнения для вычисления зарядов проводов; эквивалентных, собственных и взаимных частичных емкостей, индуктивного сопротивления; дифференциальные уравнения распределения векторов напряжений и токов вдоль линии и их решения. Для выполнения численных расчетов разработан специальный софт. Приведены результаты расчетов значений векторов напряжений вдоль линии для двухцепной ВЛ-500 кВ в 3Д-изображении и векторов тока в 2Д-изображении. Приведена графическая визуализация динамики изменения векторов на фотоизображениях центрального окна компьютерной программы.

**Ключевые слова:** Уравнения многоцепных многофазных линий электропередачи, эквивалентные параметры, корни характеристического уравнения, постоянные интегрирования.

### Введение

Настоящая работа посвящена разработке диалогового интерактивного программного инструментария для анализа параметров высоковольтных линий (ВЛ), в частности, для анализа параметров динамики изменения напряжений и токов вдоль ВЛ на основе уравнений многоцепных многофазных линий электропередачи переменного тока, которые описаны в работах [1-10] с использованием теоретических базовых классических положений [11-20]. Концепция предполагает разработку взаимосвязанного комплекса математических моделей и численных методов их решения, реализованных в интерактивном программном приложении.

Интерактивность означает выделение набора исходных параметров ВЛ (геометрии размещения фазных проводов ВЛ, значений напряжений и токов в начале ВЛ, углов фазового сдвига и др.) и функционально связанных с ними выходных параметров. Таким образом, возникает возможность анализа выходных данных при изменении исходных параметров. При этом стратегия изменения исходных данных является

прерогативой эксперта или лица, принимающего решения (ЛПР).

В данной статье представлено описание комплекса математических моделей и результаты выполнения численных методов расчета, а также их графическая интерпретация для конкретного варианта ВЛ, изложено описание блок-схемы и интерфейса программного приложения.

### Описание

В качестве инструмента для моделирования используются следующие математические модели:

1. Логарифмические функции для вычисления удельных индуктивных сопротивлений фазных проводов ВЛ;
2. Уравнения Максвелла для вычисления собственных и взаимных емкостей многофазных линий;
3. Система дифференциальных уравнений для вычисления динамики изменения напряжений и токов вдоль ВЛ.

Первая модель может быть представлена (в терминах натуральных логарифмов) группой уравнений вида, соответственно, для фазных, грозозащитных и земляного проводов: ( $i = \overline{1, n}$  и  $j = \overline{1, n}$ ).

$$X_{0j} = k \left( \frac{I_{i \neq j}}{I_j} \ln \frac{r}{d_{ji \neq j}} + \dots \frac{I_{i+1}}{I_j} \ln \frac{r}{d_{ji+1}} + \dots \frac{I_{n \neq j}}{I_j} \ln \frac{r}{d_{jn \neq j}} + \frac{I_{зем}}{I_j} \ln \frac{r}{d_{jзем}} + \frac{I_{тр1}}{I_j} \ln \frac{r}{d_{jтр1}} + \frac{I_{тр2}}{I_j} \ln \frac{r}{d_{jтр2}} \right), \quad (1)$$

$$X_{0тр1} = k \left( \frac{I_i}{I_{тр1}} \ln \frac{r_{тр1}}{d_{тр1i}} + \dots \frac{I_{i+1}}{I_{тр1}} \ln \frac{r_{тр1}}{d_{тр1i+1}} + \dots \frac{I_n}{I_{тр1}} \ln \frac{r_{тр1}}{d_{тр1n}} + \frac{I_{зем}}{I_{тр1}} \ln \frac{r_{тр1}}{d_{тр1зем}} + \frac{I_{тр2}}{I_{тр1}} \ln \frac{r_{тр1}}{d_{тр1тр2}} \right) \quad (2)$$

$$X_{0зем} = k \left( \frac{I_i}{I_{зем}} \ln \frac{r_{зем}}{d_{тр1i}} + \dots \frac{I_{i+1}}{I_{зем}} \ln \frac{r_{зем}}{d_{тр1i+1}} + \dots \frac{I_n}{I_{зем}} \ln \frac{r_{зем}}{d_{тр1n}} + \frac{I_{тр1}}{I_{зем}} \ln \frac{r_{зем}}{d_{земтр1}} + \frac{I_{тр2}}{I_{зем}} \ln \frac{r_{зем}}{d_{земтр2}} \right) \quad (3)$$

© Постолатий В. М., Чалбаш О. Х.

где  $k$  - коэффициент, учитывающий размерность ( $k = 0.0628$ );

$r$  - эквивалентные радиусы фазных расщепленных проводов;

$i, j, n$  - индексы и число фазных проводов;

$r_{тр}, r_{зем}$  - радиусы грозозащитного и земляного проводов, соответственно;

$I_i$  - вектор тока в  $i$ -ом фазном проводе;

$I_{тр}, I_{зем}$  - вектора токов в грозозащитном и земляном проводах, соответственно;

$d_{ji}$  - расстояние между  $j$ -ым и  $i$ -ым фазными проводами;

$d_{jтр}, d_{jзем}$  - расстояния между  $j$ -ым фазным проводом, и грозозащитным и земляным проводами, соответственно.

Вторая модель предназначена для вычисления эквивалентных ёмкостей проводов в многопроводной системе (рисунок 1). Эквивалентные ёмкости провода в многопроводной системе может быть вычислена из выражения:

$$C_{zi} = \frac{q_i}{U_i}, \quad (4)$$

где  $q_i$  - заряд  $i$ -го провода, вычисленный с учетом всех остальных проводов и земли;

$U_i$  - напряжение  $i$ -го провода.

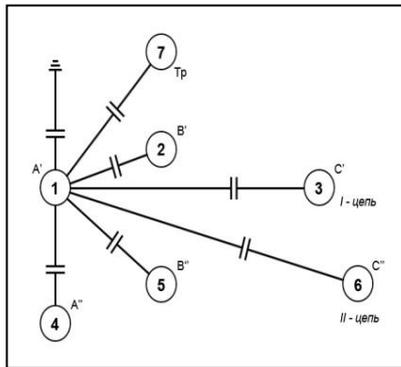


Рис. 1. Ёмкостная связь фазы А двухцепной ВЛ

На основании первой группы уравнений Максвелла, выражение для определения заряда  $i$ -го провода многофазной линии можно записать следующим образом:

$$q_i = C_{ii}U_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij}(U_i - U_j), \quad (i=\overline{1, n}) \quad (5)$$

где  $\dot{U}_i$  и  $\dot{U}_j$  - напряжения  $i$ -ой и  $j$ -ой фаз;

$C_{ii}$  - собственная частичная ёмкость  $i$ -го провода относительно земли.

Собственные, а также взаимные частичные ёмкости (между  $i$ -ой и  $j$ -ой фазами) можно

определить посредством ёмкостных коэффициентов:

$$C_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_{ij}, \quad (j=\overline{1, n}), \quad (6)$$

$$C_{ij} = -\beta_{ij}, \quad (i=\overline{1, n}, j=\overline{1, n}). \quad (7)$$

Совокупность емкостных коэффициентов представляет собой матрицу  $[\beta_{ij}]$ , которая получается путем обращения матрицы потенциальных коэффициентов  $[\alpha_{ij}]$  [6]:

$$[\beta_{ij}] = [\alpha_{ij}]^{-1}. \quad (8)$$

Непосредственно элементы матрицы потенциальных коэффициентов могут быть получены из выражений:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{b_{ij}}{a_{ij}} \quad \text{при } i \neq j, \quad (9)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad \text{при } i=j,$$

где  $b_{ij}$  - расстояние между проводами и их зеркальными изображениями;

$a_{ij}$  - расстояние между фазными проводами;

$h_i$  - высота провода над землей;

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  ф/м).

Таким образом, выражение (4) с учетом (5) примет вид:

$$C_{zi} = C_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij} \frac{(U_i - U_j)}{U_i}. \quad (10)$$

Расчетные параметры, полученные на основе первых двух моделей, используются для решения системы дифференциальных уравнений (третья модель).

Данная система дифференциальных уравнений применима для двух цепной линии с однолинейным изображением трехфазных цепей и может быть записана следующим образом (при отсчете расстояния от начала линии):

$$\begin{aligned} -\frac{dU_1}{dx} &= (r_{01} + jL_1) \dot{I}_1 - jM_1 \dot{I}_2 \\ -\frac{dU_2}{dx} &= (r_{02} + jL_2) \dot{I}_2 - jM_2 \dot{I}_1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$-\frac{dI_1}{dx} = (g_{01} + jC_{01}) \dot{U}_1 - (g_{12} + jC_{12}) \dot{U}_2$$

$$-\frac{dI_2}{dx} = (g_{02} + jC_{02}) \dot{U}_2 - (g_{12} + jC_{12}) \dot{U}_1$$



$$\begin{aligned} \gamma^2 - k^2 &= \pm \delta^2 \\ k^2 &= \gamma^2 \pm \delta^2 \end{aligned}$$

Поэтому возможны четыре варианта корней системы уравнений:

$$k_{1,2} = \pm \sqrt{\gamma^2 + \delta^2} \quad (17)$$

$$k_{3,4} = \pm \sqrt{\gamma^2 - \delta^2} \quad (18)$$

Причем корни (18) могут быть комплексными при значениях  $\gamma^2 < \delta^2$ .

Далее, введем значения параметров  $\gamma^2$  и  $\delta^2$  (замещения, выполненные при переходе от системы уравнений (11) к системе (12), см. ниже):

$$\begin{aligned} \gamma^2 &= (r_0 + j\omega L)Y_\Sigma - j\omega M Y_{12}; \\ \delta^2 &= (r_0 + j\omega L)Y_{12} - j\omega M Y_\Sigma; \end{aligned}$$

или, преобразовав, с учетом  $X^{c\delta} = \omega L$  и  $X^{s\delta} = \omega M$ , получим базовые уравнения для вычисления вышеуказанных параметров:

$$(r_0 + j \cdot X^{c\delta}) Y_\Sigma - j \cdot X^{s\delta} \cdot Y_{12} = \gamma^2 \quad (19)$$

$$(r_0 + j \cdot X^{c\delta}) Y_{12} - j \cdot X^{s\delta} \cdot Y_\Sigma = \delta^2 \quad (20)$$

где  $\omega$  – частота [рад/сек];

В базовых уравнениях (19) и (20) присутствуют комплексные величины поперечных проводимостей,  $Y_\Sigma$  и  $Y_{12}$ , которые, в свою очередь, необходимо также выразить через исходные данные проекта.

Суммарная поперечная проводимость фаз первой и второй цепей (если они одинаковы) в терминах комплексных чисел определится из уравнения:

$$g_0 + j\omega(C_D^{c\delta} + jC_M^{c\delta}) + g_{12} + j\omega(C_D^{s\delta} + jC_M^{s\delta}) = Y_\Sigma, \quad (21)$$

а удельная проводимость между фазой одной цепи и всеми фазами второй цепи в терминах комплексных чисел определится из уравнения:

$$g_{12} + j\omega(C_D^{s\delta} + jC_M^{s\delta}) = Y_{12}. \quad (22)$$

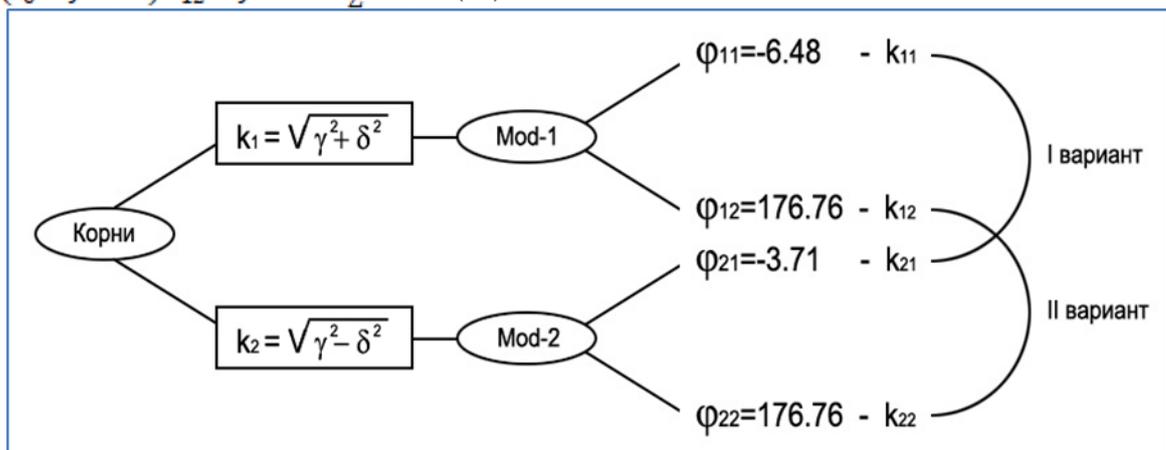


Рис. 2 Схема образования вариантных решений

Решение системы дифференциальных уравнений для напряжений после интегрирования и вспомогательных вычислений может быть записано следующим образом:

$$\dot{U}_1 = -\dot{A} ch(\dot{k}_1 x) + \dot{B} sh(\dot{k}_1 x) + \dot{C} ch(\dot{k}_2 x) + \dot{D} sh(\dot{k}_2 x) \quad (23)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{A} ch(\dot{k}_1 x) + \dot{B} sh(\dot{k}_1 x) - \dot{C} ch(\dot{k}_2 x) - \dot{D} sh(\dot{k}_2 x) \quad (24)$$

$$D = \frac{(I_{2H}^D - I_{1H}^D) + j(I_{2H}^M + I_{1H}^M)}{2b} \quad (28)$$

Запишем далее выражения для вычисления свободных коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ :

$$A = -\frac{(U_{1H}^D + U_{2H}^D) + j(U_{1H}^M + U_{2H}^M)}{2} \quad (25)$$

$$B = -\frac{(I_{1H}^D + I_{2H}^D) + j(I_{1H}^M + I_{2H}^M)}{2a} \quad (26)$$

$$C = \frac{(U_{2H}^D - U_{1H}^D) + j(U_{2H}^M - jU_{1H}^M)}{2} \quad (27)$$

где  $U_{1H}^D$  и  $U_{1H}^M$  – действительная и мнимая компоненты напряжения в начале первого провода ВЛ;

$U_{2H}^D$  и  $U_{2H}^M$  – действительная и мнимая компоненты напряжения в начале второго провода ВЛ;

$I_{1H}^D$  и  $I_{1H}^M$  – действительная и мнимая компоненты тока в начале первого провода ВЛ;

$I_{2H}^D$  и  $I_{2H}^M$  – действительная и мнимая компоненты напряжения в начале второго провода ВЛ;

$a$  и  $b$  – расчетные параметры (см. выражения (29) и (30)).

В выражениях для вычисления свободных коэффициентов присутствуют промежуточные переменные  $a$  и  $b$ . Для их вычисления используются корни характеристического уравнения и параметры собственной и взаимной поперечной проводимости ВЛ:

$$a = \frac{Y_{\Sigma} - Y_{12}}{k_1}, \quad (29)$$

$$b = \frac{Y_{\Sigma} + Y_{12}}{k_2}. \quad (30)$$

В выражениях (29) и (30) фигурируют корни характеристического уравнения в обобщенном виде. При проведении расчетов используются соответствующие парные значения  $k_1, k_3$  и  $k_2, k_4$ .

$$UD(X)_1 = (-3621324.87) \cdot 0.5 \cdot [e^{kd_1x} (\cos(km_1x))] + 4198675.13 \cdot 0.5 \cdot \quad (31)$$

$$\cdot [e^{-kd_1x} (\cos(-km_1x))] - (-14503125) \cdot 0.5 [e^{kd_1x} (\sin(km_1x)) - e^{-kd_1x} (\sin(-km_1x))];$$

$$UM(X)_1 = (-3621324.87) \cdot 0.5 \cdot [e^{kd_1x} (\sin(km_1x))] + 4198675.13 \cdot 0.5 \cdot \quad (32)$$

$$\cdot [e^{-kd_1x} (\sin(-km_1x))] + (-14503125) \cdot 0.5 \cdot [e^{kd_1x} (\cos(km_1x)) - e^{-kd_1x} (\cos(-km_1x))];$$

Здесь  $kd_1$  и  $km_1$  это действительная и мнимая части комплексного числа – корня характеристического уравнения  $k_1$ .

Следует отметить, что выражения (31) и (32) не являются общим решением системы дифференциальных уравнений, а представляют собой лишь частный случай, возникающий при равенстве напряжений и токов в начале первого и второго проводов ВЛ. Иначе, при равенстве нулю свободных членов  $C = 0$  и  $D = 0$ . В результате уравнения (23) и (24) становятся «усеченными», без третьих и четвертых слагаемых.

$$\dot{I}(X)_1 = -\dot{A} a \operatorname{sh}(\dot{k}_1x) - \dot{B} a \operatorname{ch}(\dot{k}_1x) - \dot{C} b \operatorname{sh}(\dot{k}_2x) - \dot{D} b \operatorname{ch}(\dot{k}_2x), \quad (33)$$

$$\dot{I}(X)_2 = -\dot{A} a \operatorname{ch}(\dot{k}_1x) - \dot{B} a \operatorname{ch}(\dot{k}_1x) + \dot{C} b \operatorname{sh}(\dot{k}_2x) + \dot{D} b \operatorname{ch}(\dot{k}_2x). \quad (34)$$

Аналогично, не приводя здесь всех достаточно громоздких преобразований,

Для того чтобы конечные выражения (23) и (24) представить как комплексные числа в традиционном виде, воспользуемся следующими формулами:

$$\operatorname{ch}(k_1x) = \frac{e^{k_1x} + e^{-k_1x}}{2},$$

$$\operatorname{sh}(k_1x) = \frac{e^{k_1x} - e^{-k_1x}}{2},$$

и воспользовавшись формулой Эйлера, преобразуем гиперболические уравнения, помня, что  $k_1$  и  $k_2$  – это комплексные числа:

$$e^{x+jy} = e^x e^{jy} = e^x (\cos y + j \sin y);$$

В частном случае

$$e^{jy} = (\cos y + j \sin y);$$

Не приводя здесь всех достаточно громоздких преобразований, запишем их итоговые результаты для напряжений:

В дальнейшем также понадобятся параметры, обозначающие динамику изменения углов поворота модулей векторов напряжения относительно установленной системы координат. Для этого можно использовать следующее выражение:

$$\lambda_u(X) = \operatorname{Arctg} \left( \frac{UM(X)_1}{UD(X)_1} \right);$$

где  $X$  будет принимать дискретные значения от 0 до 6000 км.

Аналогичным образом можно записать частное решение системы дифференциальных уравнений для вычисления токов:

запишем итоговые результаты для токов в следующем виде:

$$ID(X)_1 = -122.437 \cdot 0.5 [e^{kd_1x} (\cos(km_1x))] + 1824.093 \cdot 0.5 [e^{-kd_1x} (\cos(-km_1x))] + \quad (35)$$

$$+ 30.374 \cdot 0.5 [e^{kd_1x} (\sin(km_1x)) - e^{-kd_1x} (\sin(-km_1x))],$$

$$IM_1 = -30.374 \cdot 0.5 [e^{kd_1x} (\cos(km_1x)) - e^{-kd_1x} (\cos(-km_1x))] -$$

$$-122.437 \cdot 0.5[e^{kd_1x}(\sin(km_1x))] + 1824.093 \cdot 0.5[e^{-kd_1x}(\sin(-km_1x))]. \quad (36)$$

Для углов поворота модулей векторов тока относительно установленной системы координат можно использовать следующее выражение:

$$\lambda_l(X) = \text{Arctg} \left( \frac{IM(X)_l}{ID(X)_l} \right),$$

где  $X$  также будет принимать дискретные значения от 0 до 6000 км.

### Выводы.

На основе представленных аналитических выкладок были разработаны численные методы и алгоритмы, реализованные в интерактивных

программных приложениях, скрины из которых приведены на рис. 3-11.

Приведенные ниже расчеты выполнены для ВЛ класса 500 кВ.. Численные методы и алгоритмы разработаны на основании приведенных выше математических моделей. Для автоматизации вычислительных процедур была разработана специализированная программа.

Результаты вычислений и приведены в таблицах 1-7.

Таблица 1

Удельные индуктивные сопротивления фазных проводов ВЛ

№	№ варианта	Значение	Номера фазовых проводов (уд. индуктивное сопротивление Ом/км)					
			Фаза №1	Фаза №2	Фаза №3	Фаза №4	Фаза №5	Фаза №6
1	2	4	5	6	7	8	9	10
1	7	Действительное	0.48	0.418	0.48	0.48	0.418	0.48
2		Мнимое	-0.056	0	0.055	-0.056	0	0.055

Таблица 2

Результаты вычислений промежуточных и конечных параметров емкостей фазных проводов  
Потенциальные коэффициенты (I-ая группа формул Максвелла)

$$\alpha_{ij} - [M/\Phi]$$

	1F			2F		
1F	159.856 E-9	39.558 E-9	25.665 E-9	44.635 E-9	32.871 E-9	24.214 E-9
	39.558 E-9	155.987 E-9	35.225 E-9	32.871 E-9	32.329 E-9	28.615 E-9
	25.665 E-9	35.225 E-9	151.052 E-9	24.214 E-9	28.615 E-9	35.935 E-9
2F	44.635 E-9	32.871 E-9	24.214 E-9	159.856 E-9	39.558 E-9	25.665 E-9
	32.871 E-9	32.329 E-9	28.615 E-9	39.558 E-9	155.987 E-9	35.225 E-9
	24.214 E-9	28.615 E-9	35.935 E-9	25.665 E-9	35.225 E-9	151.052 E-9

Таблица 3

Емкостные коэффициенты (II-ая группа формул Максвелла)

$$\beta_{ij} - [\Phi/КМ E-12]; (\beta_{ij} = \alpha_{ij} / \det()); \det() = 8.767 E+66$$

	1F			2F		
1F	7.247838	-1.1960839	-0.4847725	-1.45927513	-0.7297117	-0.4018323
	-1.1960839	7.39134026	-1.10834277	-0.7297117	-0.7453725	-0.6469907
	-0.4847725	-1.10834277	7.44907236	-0.4018323	-0.6469907	-1.26529467
2F	-1.45927513	-0.7297117	-0.4018323	7.247838	-1.1960839	-0.4847725
	-0.7297117	-0.7453725	-0.6469907	-1.1960839	7.39134026	-1.10834277
	-0.4018323	-0.6469907	-1.26529467	-0.4847725	-1.10834277	7.44907236

Таблиця 4

Частичная взаимная емкость между фазами ВЛ.  $c_{ij}$  – [Ф/КМ Е-12]  
Собственная частичная емкость фазных проводов.  $c_{ii}$  – [Ф/КМ Е-12]

	1F			2F		
1F	2.97616243	1.1960839	0.4847725	1.45927513	0.7297117	0.4018323
	1.1960839	2.96483874	1.10834277	0.7297117	0.7453725	0.6469907
	0.4847725	1.10834277	3.54183912	0.4018323	0.6469907	1.26529467
2F	1.45927513	0.7297117	0.4018323	2.97616243	1.1960839	0.4847725
	0.7297117	0.7453725	0.6469907	1.1960839	2.96483874	1.10834277
	0.4018323	0.6469907	1.26529467	0.4847725	1.10834277	3.54183912

\*) В выражении  $\beta_{ij} = \alpha_{ij} / \det()$  использована транспонированная матрица алгебраических дополнений матрицы потенциальных коэффициентов  $[\alpha_{ij}]$

Таблиця 5

Результаты вычисления эквивалентных емкостей на фазных проводах ВЛ.  $c_{3i}$  – [Ф/КМ]

		Действительная часть	Мнимая часть
1F	1	7.194763 E-9	0.8999656 E-9
	2	8.486533 E-9	-0.1476246 E-9
	3	7.504747 E-9	-0.7523411 E-9
2F	4	7.194763 E-9	0.8999656 E-9
	5	8.486533 E-9	-0.1476246 E-9
	6	7.504747 E-9	-0.7523411 E-9

Таблиця 6

Результаты вычисления компонент вектора напряжения вдоль линии

№	X [км]	UD [КВ]	UM [КВ]	Angl $\lambda_U$ [град]	Angl $\lambda_{UN}$ [град]
1	2	3	4	5	6
0	0	288675.1	0	0	0
8	480	258446.6	121446.3	25.1	25.1
16	960	173123.3	220646.7	51.8	51.8
24	1440	49285.4	276006.9	79.8	79.8
32	1920	-87978.9	274595.7	-72.3	107.7
40	2400	-210136.6	215121.1	-45.7	134.3
48	2880	-291122.6	108528.3	-20.5	159.5
56	3360	-312881.0	-23973.2	4.3	184.3
64	3840	-269361.4	-155107.5	29.9	209.9
72	4320	-168090.7	-257128.7	56.8	236.8
80	4800	-28929.7	-307672.5	84.6	264.6
88	5280	119794.6	-294631.2	-67.9	292.1
96	5760	247033.9	-218996.8	-41.6	318.4
100	6000	293747.3	-161695.2	-28.9	331.1

Таблиця 7

Результаты вычисления компонент вектора тока вдоль линии

№	X [км]	ID [А]	IM [А]	Angl $\lambda_I$ [град]	Angl $\lambda_{IN}$ [град]
1	2	3	4	5	6
0	0	0	1200	0	0
8	480	1645.6	-40.2	-1.5	358.5
16	960	1749.0	-53.1	-1.8	358.2

## Результаты вычисления компонент вектора тока вдоль линии

24	1440	1488.4	-34.8	-1.4	358.6
32	1920	917.3	7.9	0.4	0.4
40	2400	153.9	59.6	21.1	21.1
48	2880	-643.4	100.8	-9	171.0
56	3360	-1308.8	113.7	-5	175.0
64	3840	-1703.5	88.0	-3	177.0
72	4320	-1744.4	24.6	-0.9	179.1
80	4800	-1421.8	-64.0	2.5	182.5
88	5280	-801.4	-155.7	10.9	190.9
96	5760	-11.1	-224.4	87.1	272.9
100	6000	397.0	-242.5	-31.5	328.5

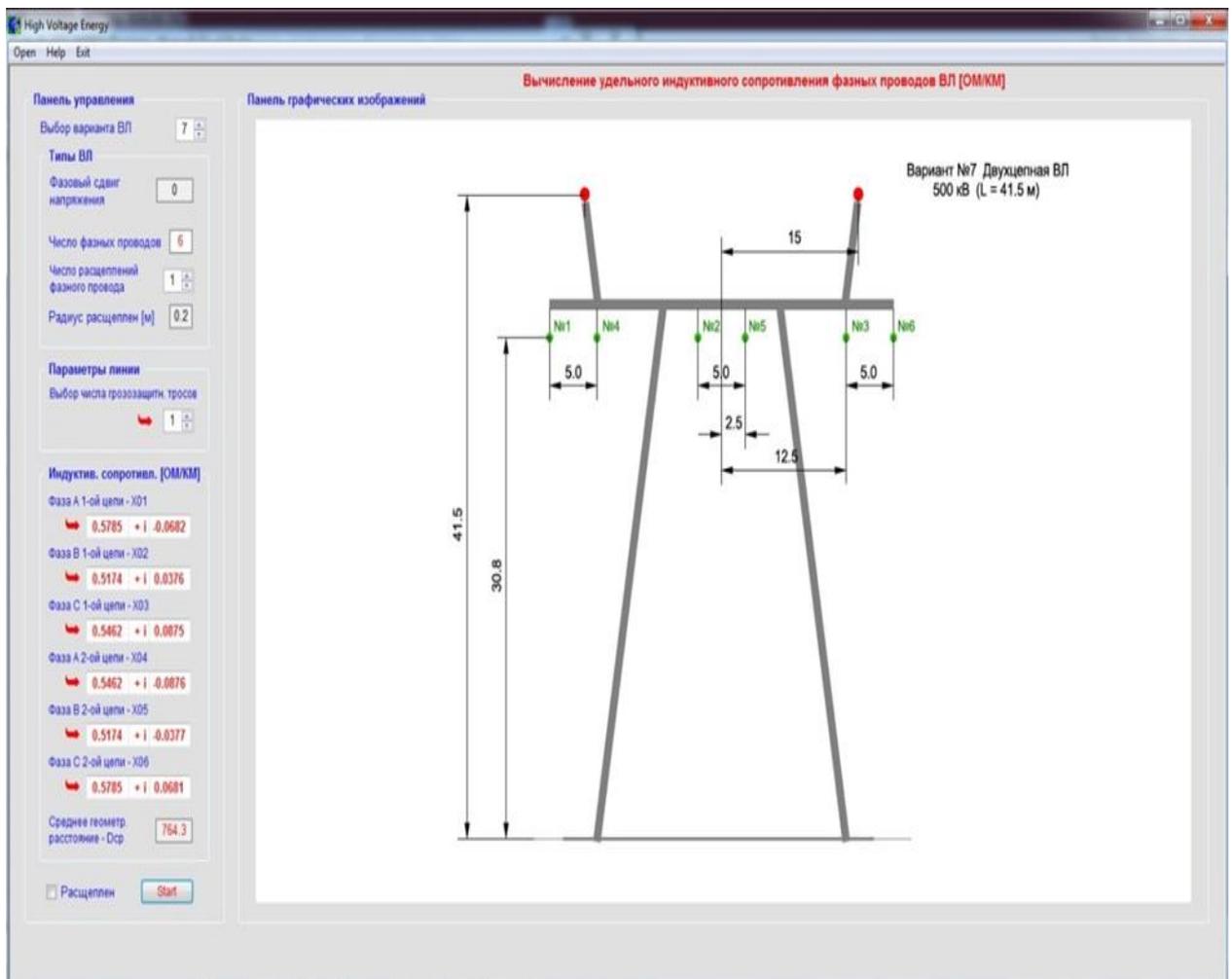


Рис. 3. Геометрический профиль двухцепной ВЛ класса 500кВ

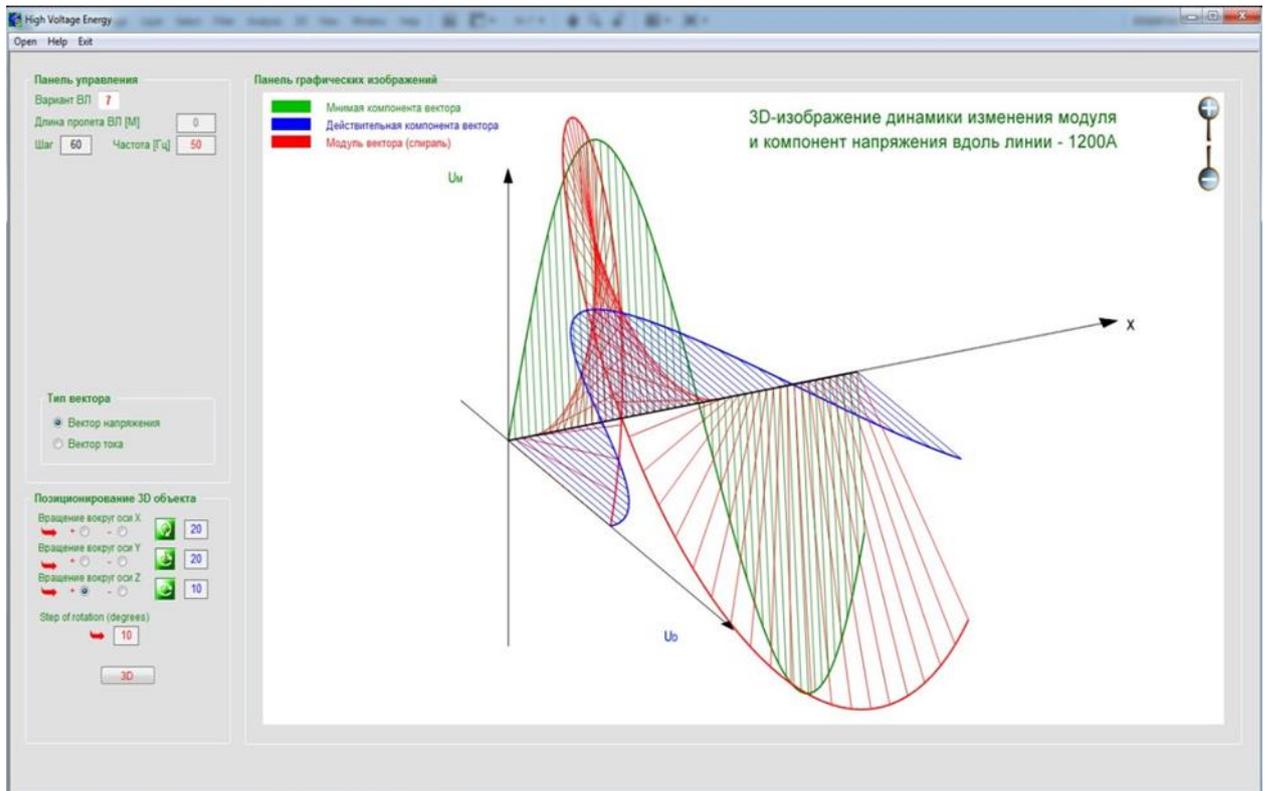


Рис. 4. Динамика изменения компонентов векторов напряжения и их модуля

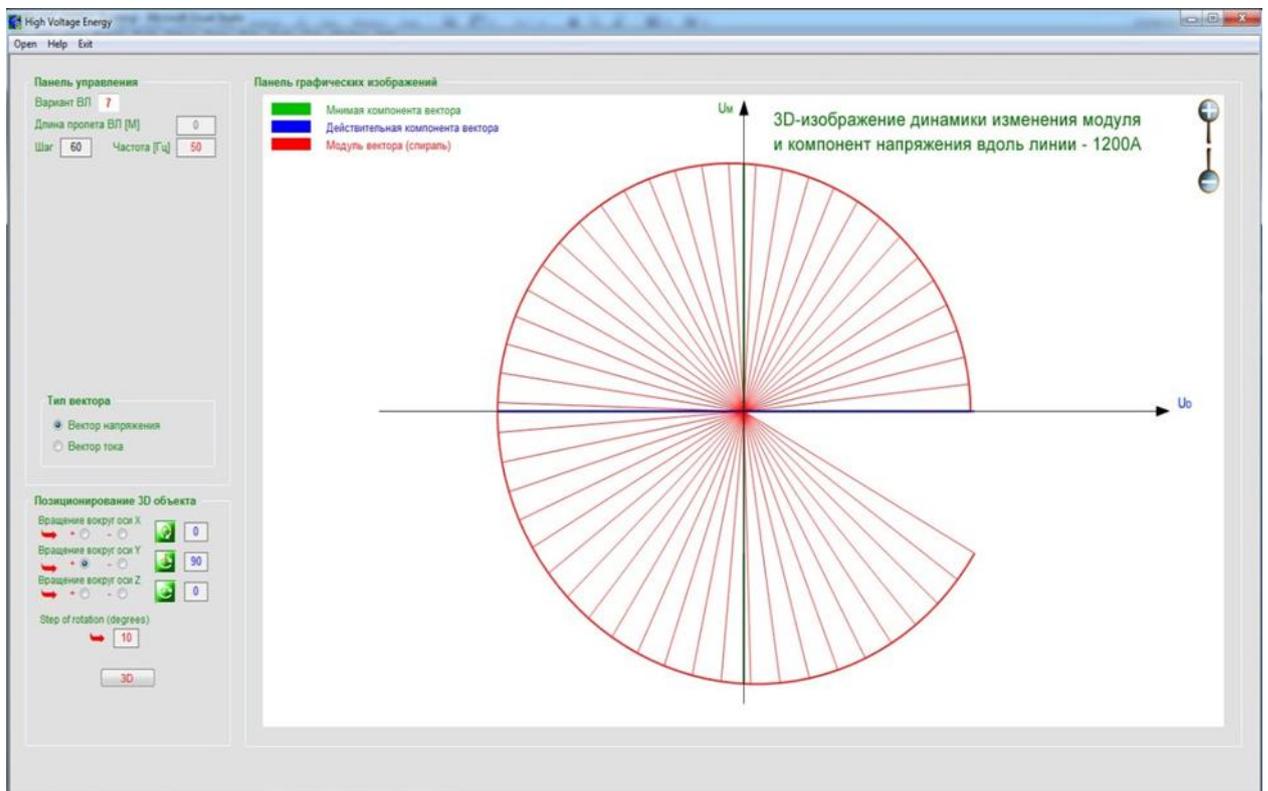


Рис. 5. Проекция модуля напряжения (3D-изображение)

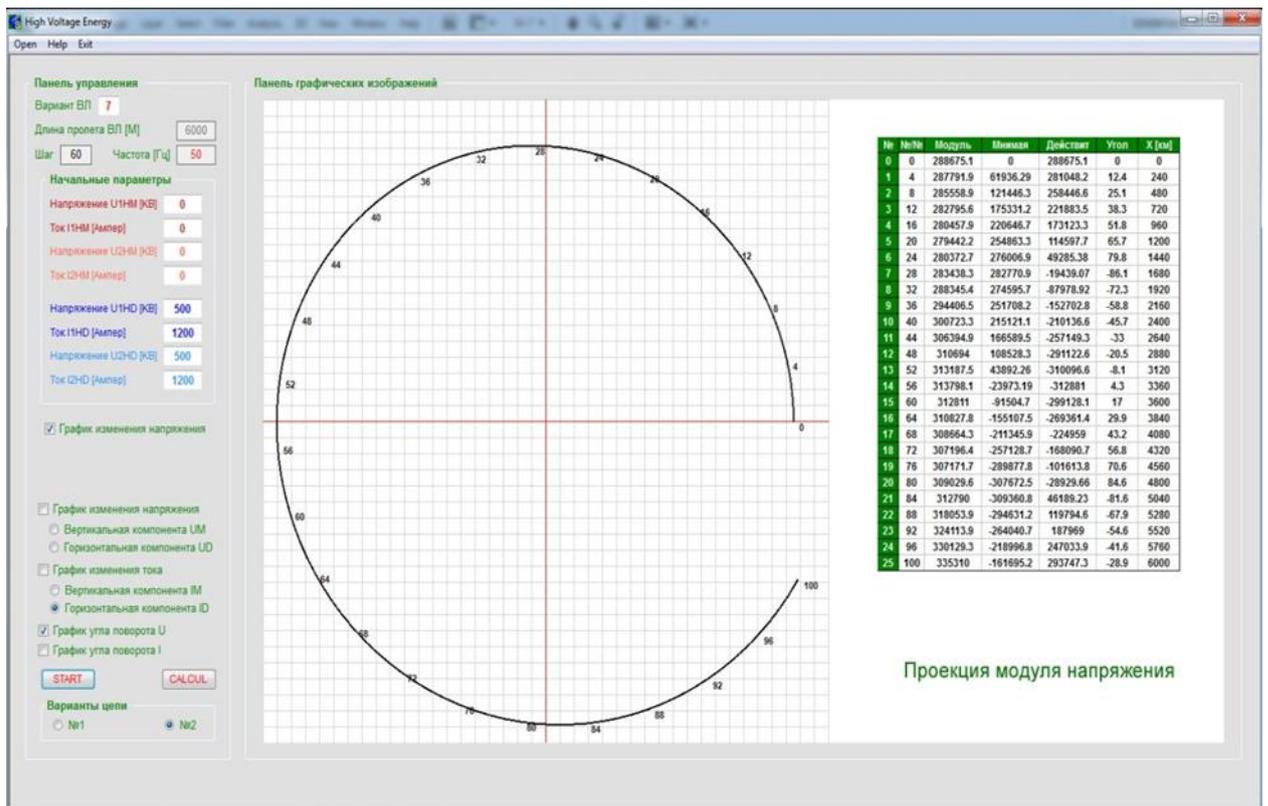


Рис. 6. Проекция модуля напряжения (2D-изображение)

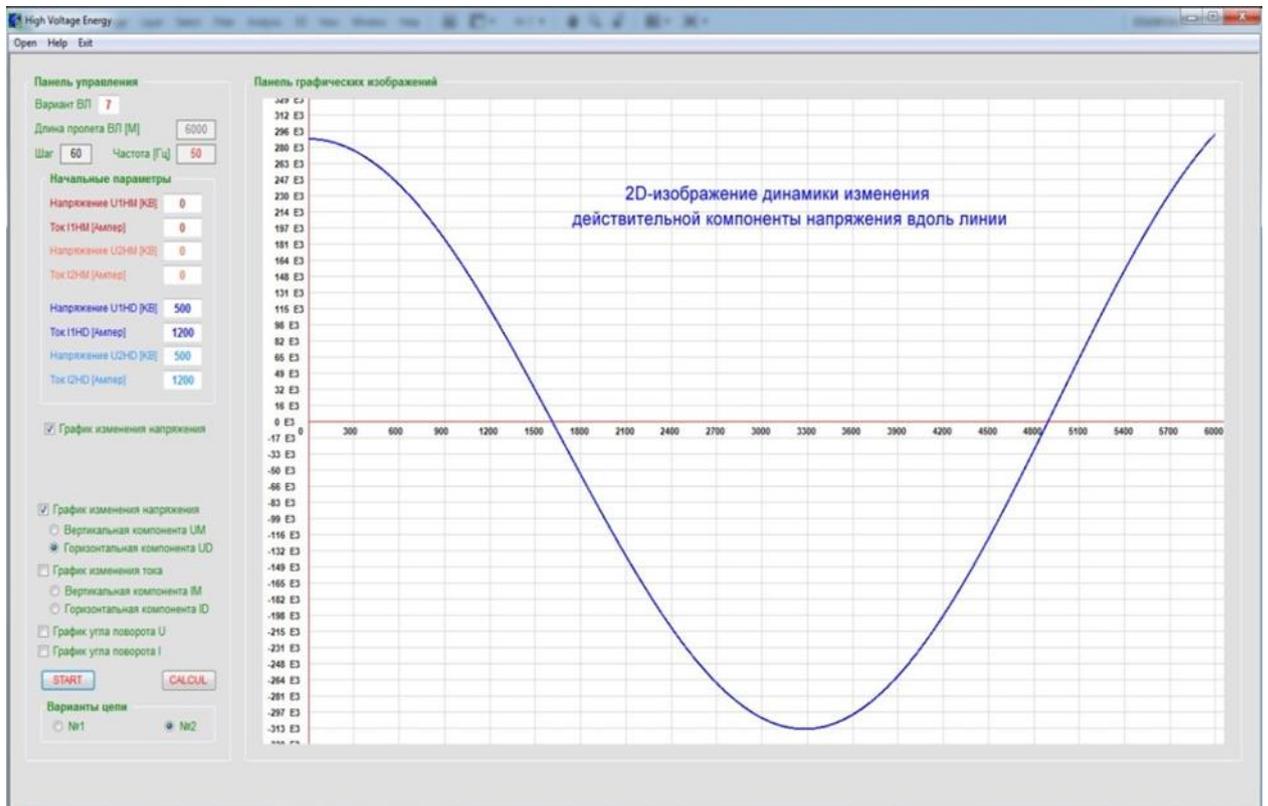


Рис. 7. Динамика изменения мнимой компоненты напряжения вдоль линии

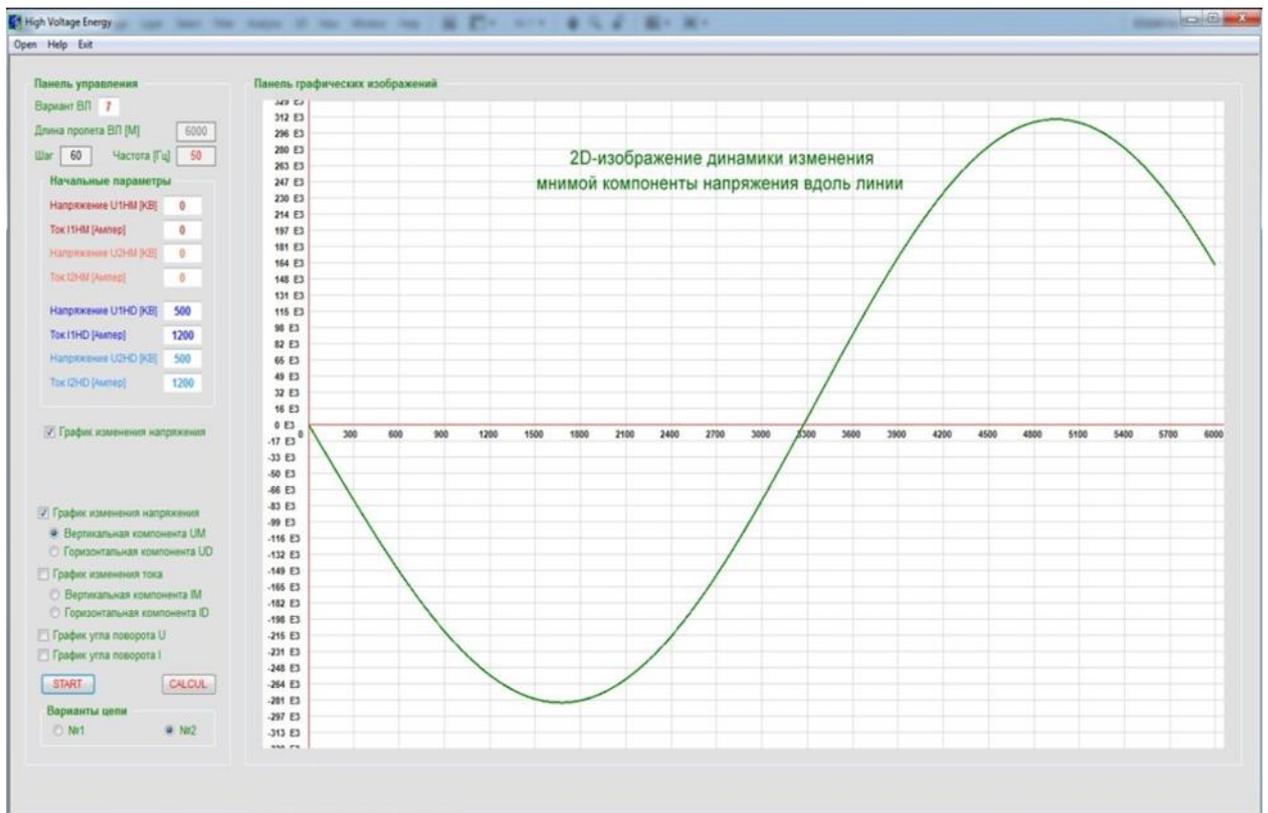


Рис. 8. Динамика изменения мнимой компоненты напряжения вдоль линии

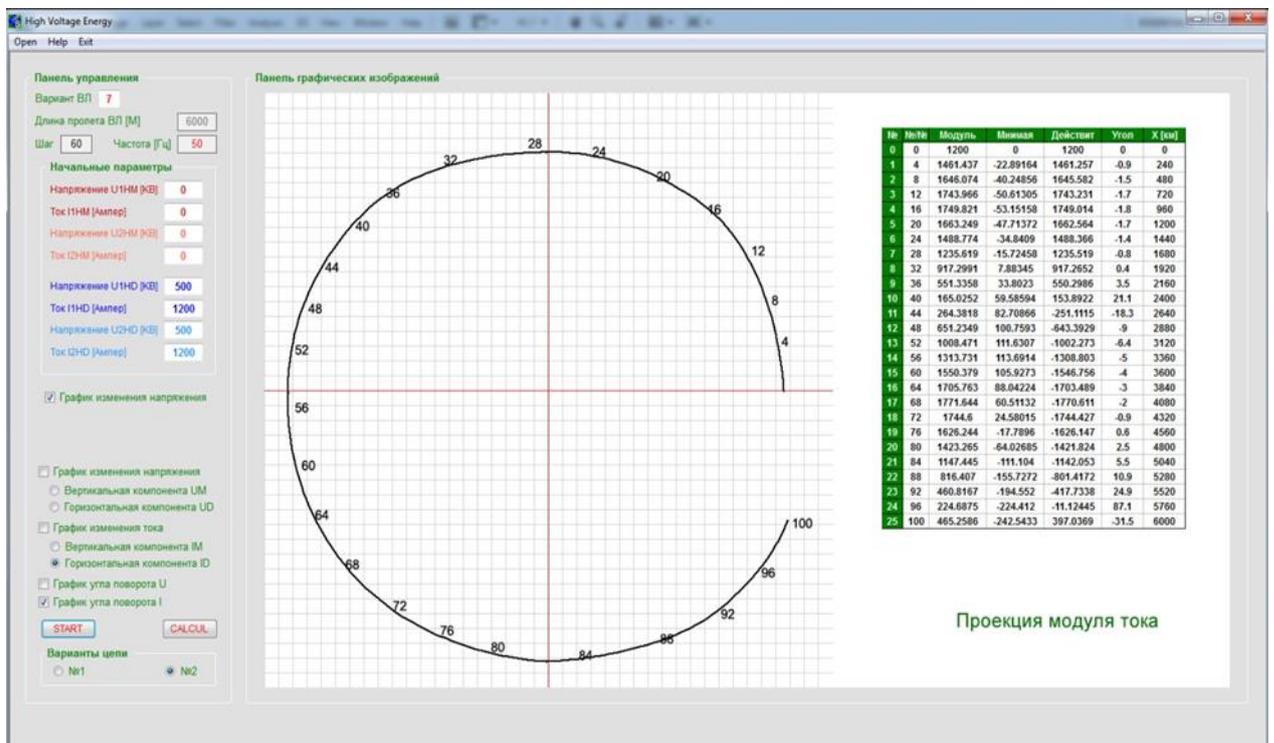


Рис. 9. Проекция модуля тока (2D-изображение)

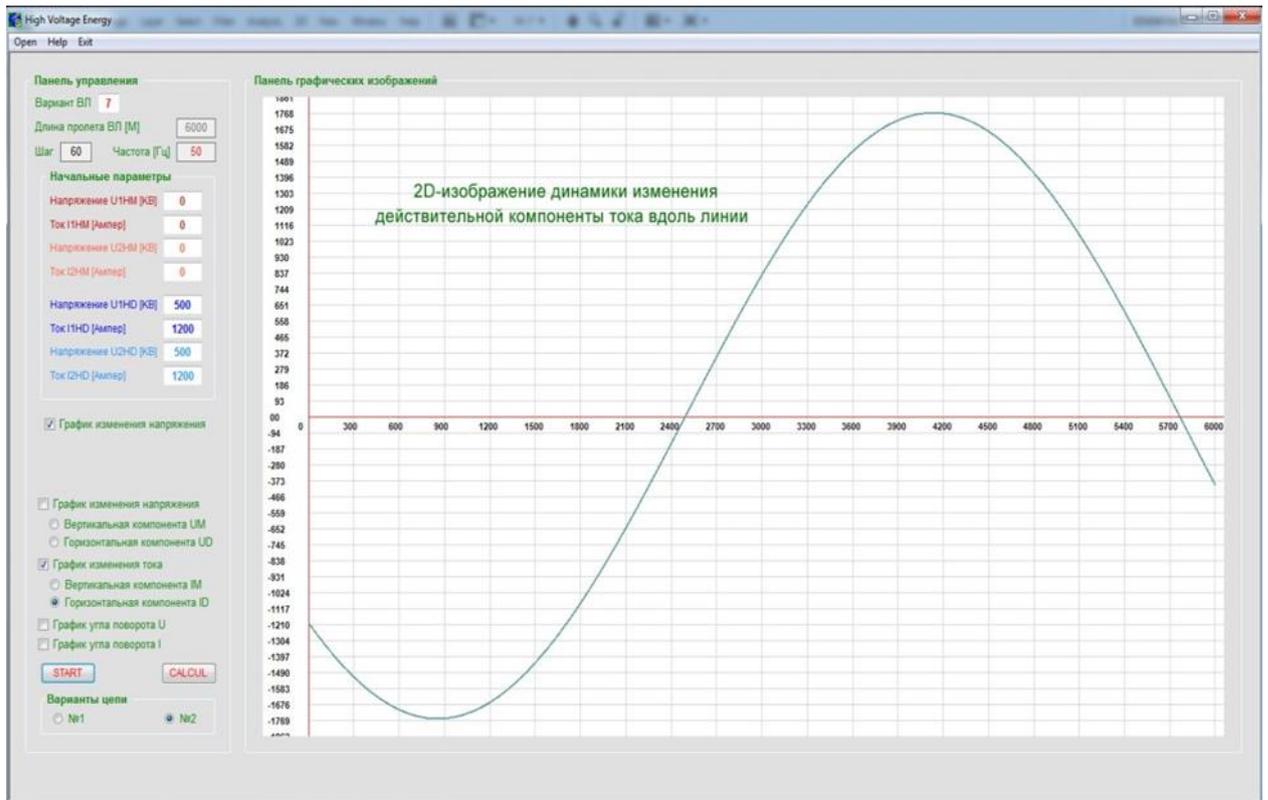


Рис. 10. Динамика изменения действительной компоненты тока вдоль линии

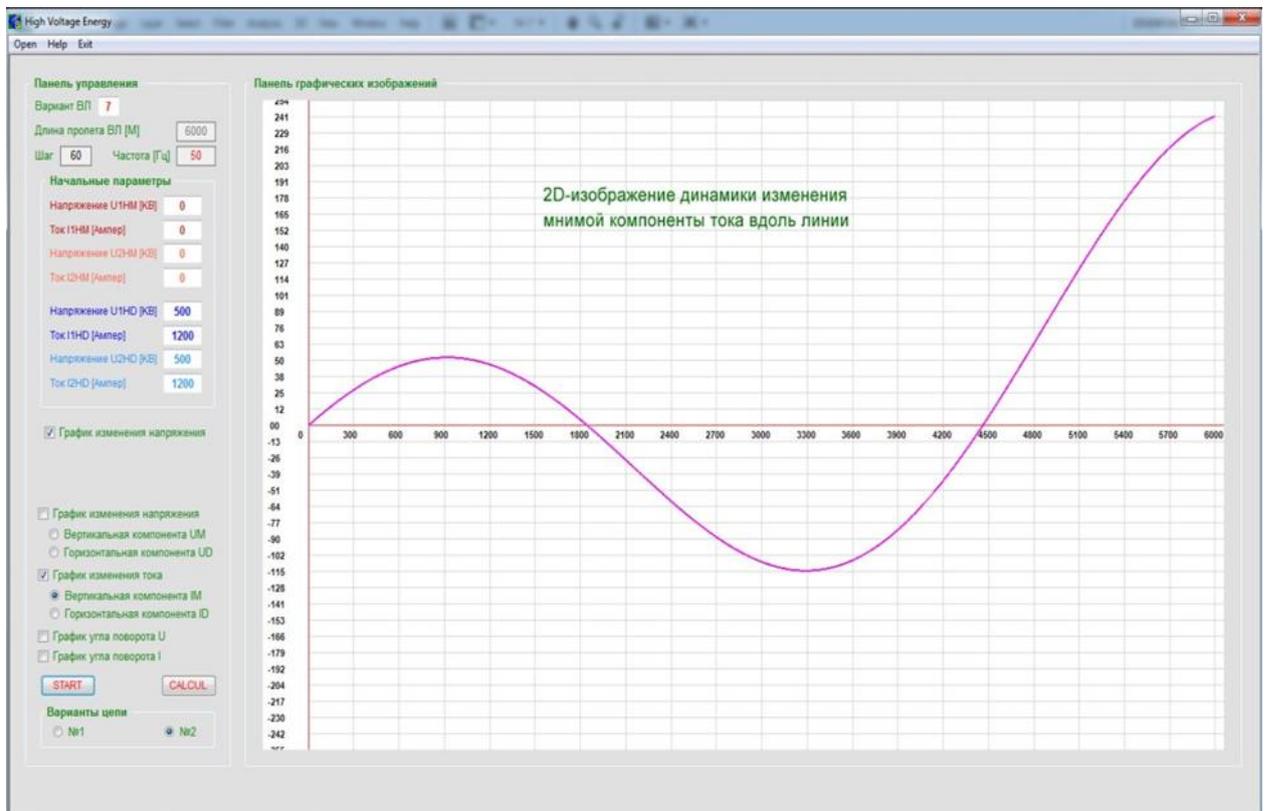


Рис. 11. Динамика изменения мнимой компоненты тока вдоль линии

**Список использованной литературы**

1. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока (flexible AC Transmission system, FACTS). [Текст] Составитель д.т.н. профессор Ю. Г. Шакарян, ОАО «ВНИИЭ», 41 с.
2. Ракушев, Н. Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. [Текст] – М.: ГЭИ, 1957, –160 с.
3. А. с. 218294 (СССР). Способ передачи электроэнергии /В. А. Веников, Г. В. Чалый, В. М. Постолатий. – Заявл. 6.12.66. № 1116879. Оpubл. в Б.И., 1968, № 17.
4. А. с. 266924 (СССР). Способ передачи электроэнергии /В. А. Веников, Ю. Н. Астахов, В. М. Постолатий. – Заявл. 4.11.68. № 1280553. Оpubл. в Б.И., 1970, № 12.
5. А. с. 566288 (СССР). Электропередача переменного тока / В. М. Постолатий, В. А. Веников, Ю. Н. Астахов, Г. В. Чалый, Л. П. Калинин. Заявл. 21.03.74. № 2006496. Оpubл. в Б. И., 1977, № 27.
6. Электропередача переменного тока /Постолатий В. М., Веников В. А., Астахов Ю. Н., Чалый Г. В., Калинин Л. П. Патенты: США №4001672, 1977; ГДР № 116990, 1976; Франции № 7508749, 1977; Англии № 1488442, 1978; Швеции № 75032268, 1978; Канады № 1038029, 1978; ФРГ № 2511928, 1979; Японии № 1096176, 1982.
7. Астахов, Ю. Н., Веников, В. А., Постолатий, В. М. и др. основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи, – Электричество, 1977, № 12, с. 37–44.
8. Управляемые электропередачи. [Текст] Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001–2007 г.г. Составители: Постолатий В. М., Быкова Е. В. Кишинев, 2007. 234 с.
9. Устройство изменения фазового сдвига /Бошняга В. А., Калинин Л. П., Постолатий В. М. Патенты: США № 3975673, 1976; ГДР № 119494, 1976; ГДР № 123846, 19774 США № 4013942, 19774 Англии № 1484522, 1977; Франции № 7522737, 1977; Англии № 1493652, 1978; Швеции № 7508349, 1978; Швеции № 7508350, 1978; ФРГ № 2531578, 1978; ФРГ № 2531644, 1978; Франции № 7522615, 1978; Канады № 1045202, 1978; Канады № 1041172, 1978.
10. Ю. П. Рыжов. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗов [Текст] /Ю. П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.: илл.
11. Г. Н. Александров. Передача электрической энергии. [Текст] СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. 412 с. (Энергетика в политехническом университете).
12. Поливанов, К. М. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля. [Текст] – М.: Энергия. 1969. – 352 с.
13. Вульф, А. А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. [Текст] – М.: ГЭИ, 1941. – 100 с.
14. Веников, В. А. Дальние электропередачи. – М.Л.: ГЭИ, 1960. – 312 с.
15. Щербаков, В. К., Лукашов, Э. С., Ольшевский, О. В., Путилова, А. Т. Настроенные электропередачи. [Текст] Новосибирск, 1963.
16. Вершков, В. А., Нахапетян, К. Т., Ольшевский, О. В., Совалов, С. А., Фотин, В. П., Щербаков, В. К. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ ЕЭС Европейской части СССР. [Текст] Электричество, 1968, № 8.
17. Библия энергетика: ПУЭ (шестое и седьмое издания, все действующие разделы); [Текст] МПОТ; ПТЭ. – Новосибирск: Сиб. унив. Из-во, 2011.– 688 с., илл.
18. Feasibility study for the interconnection of the power systems of the Republic of Moldova and Romania. Part 1. Component A. Tasc 3: Feasibility study LEA 400 kV Vulcanesti - Chisinau. ISPE, ivl, Moldelectrica, Energy Project, December 2017.
19. В. М. Постолатий. Компактные управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи переменного тока. Монография. (в трех частях): [Текст] ТАŞМ. Кишинев, 2017, 732 с. ISBN 978-9975-62-404-6.
20. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей, ВУЗов. – 7-ое изд. перераб. и доп. [Текст] – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с., ил.

**References**

1. Managed (flexible) AC transmission systems (FACTS).[Upravlyayemyye (gibkiye) sistemy peredachi peremennogo toka] Compiled by Doctor of Technical Sciences Professor Yu. G. Shakaryan, JSC "VNIIE", 41 pp.
2. Rakushev, N. F. Ultra-long-distance transmission of energy by alternating current through open lines.[Sverkhdal'nyaya peredacha energii peremennym tokom po razomknutym liniyam] - M.: SEI, 1957, –160 p.
3. V. A. Venikov, G. V. Chaly, V. M. Postolati (1968), A. s. 218294 (USSR). The method of transmission of electricity [Sposob peredachi el-

- ektroenergii] Declared. 6.12.66. No. 1116879. Publ. in B.I., 1968, No. 17.
4. 4. V. M. Postolaty, V. A. Venikov, Yu. N. Astakhov (1970) A. p. 266924 (USSR). The method of transmission of electricity [Sposob peredachi elektroenergii] Declared. 4.11.68. No. 1280553. Publ. in B.I., 1970, No. 12.
5. 5. V. M. Postolaty, V. A. Venikov, Yu. N. Astakhov, G. V. Chaly, L. P. Kalinin (1977) A. p. 566288 (USSR). AC Power Transmission [Elektroperedacha peremennogo toka ],. Claim 03/21/74. No. 2006496. Publ. in B.I., 1977, No. 27
6. Postolati V. M., Venikov V. A., Astakhov Yu. N., Chaly G. V., Kalinin L. P. AC power transmission [Elektroperedacha peremennogo toka], Patents: United States No. 4001672, 1977; GDR No. 116990, 1976; France No. 7508749, 1977; England No. 1488442, 1978; Sweden No. 75032268, 1978; Canada No. 1038029, 1978; Germany No. 2511928, 1979; Japan No. 1096176, 1982.
7. Astakhov, Yu. N., Venikov, V. A., Postolatiy, V. M. and other (1977) Basic principles for creating and technical characteristics of controlled self-compensating power lines, [osnovnyye printsipy sozdaniya i tekhnicheskiye kharakteristiki upravlyayemykh samokompensiruyushchikhsya liniy elektroperedachi], Electricity, , No. 12, p.
8. Postolati V. M., Bykova E. V (2007) Managed Power Transmission. [Upravlyayemyye elektroperedachi] Issue No. 8 (23), proceedings of the Institute of Energy of the Academy of Sciences of Moldova for 2001-2007. Chisinau, 234 s.
9. Bosnjaga V. A., Kalinin L. P., Postolati V. M. The device for changing the phase shift [Ustroystvo izmeneniya fazovogo sdviga] Patents: United States No. 3975673, 1976; GDR No. 119494, 1976; GDR No. 123846, 1977 USA No. 4013942, 1977 of England No. 1484522, 1977; France No. 7522737, 1977; England No. 1493652, 1978; Sweden No. 7508349, 1978; Sweden No. 7508350, 1978; Germany No. 2531578, 1978; Germany No. 2531644, 1978; France No. 7522615, 1978; Canada No. 1045202, 1978; Canada No. 1041172, 1978.
10. Yu.P. Ryzhov. (2007) Long-distance power transmission of extra-high voltage: a textbook for universities [Dal'niye elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya: uchebnik dlya VUZov] M.: Publishing House MPEI., 488 p. III.
11. G. N. Alexandrov.(2007) Transmission of electrical energy [Peredacha elektricheskoy energii]. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 412 p. (Energy at the Polytechnic University).
12. Polivanov, K. M. (1969) Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Part 3. Electromagnetic field theory.[Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. CH.3. Teoriya elektromagnitnogo polya] M.: Energy. 352 p.
13. Wulf, A. A. (1941) The problem of the transfer of electric energy to extremely long distances along compensated lines. [Problema peredachi elektricheskoy energii na sverkhdal'niye rasstoyaniya po kompensirovannym liniyam] M SEI, 100 p.
14. Venikov, V. A. (1960 ) Long-distance power transmission. [Dal'niye elektroperedachi] M.L SEI., 312 p.
15. Shcherbakov, V. K., Lukashov, E. S., Olshesky, O. V., Putilova, A. T. (1963) Tuned power lines. [Nastroyennyye elektroperedachi] Novosibirsk,.
16. Vershkov, V. A., Nakhapetyan, K. T., Olshesky, O. V., Sovalov, S. A., Fotin, V. P., Shcherbakov, V. K. (1968) Complex tests of half-wave power transmission in a network 500 kV UES of the European part of the USSR. [Kompleksnyye ispytaniya poluvolnovoy elektroperedachi v seti 500 kV YEES Yevropeyskoy chasti SSSR], Electricity 1968, No. 8.
17. Bible Energy: PUE [Bibliya energetika: PUE](sixth and seventh editions, all applicable sections); MPOT; PTE. - Novosibirsk: Sib. univ. Izvo, 2011.– 688 p., III.
18. . Feasibility study for the interconnection of the power systems of the Republic of Moldova and Romania. Part 1. Component A. Tasc 3: Feasibility study LEA 400 kV Vulcanesti - Chisinau. ISPE, ivl, Moldelectrica, Energy Project, December 2017.
19. V. M. Postolati (2017) Compact controlled self-compensating high-voltage AC power lines [Kompaktnyye upravlyayemyye samokompensiruyushchiesya vysokovol'tnyye linii elektroperedachi peremennogo toka] Monograph. (in three parts): TAŞM. Chisinau,, 732 p. ISBN 978-9975-62-404-6.
20. . L. A. Bessonov. (1978) Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits. [Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: Elektricheskiye tsepi]A textbook for students of electrical, energy and instrument majors, universities. - 7th ed. reslave. and add. - M.: Higher school,. - 528 p., III.

## BASIC EQUATIONS OF THE MULTI-CIRCUIT, MULTI-PHASE AC POWER LINES

V. M. Postolati, O. Kh. Chalbash

*Institute of Power Engineering of the Academy Science of Moldova*

**Abstract.** *Different types of overhead lines (AC) of AC transmission are described and classified according to the main distinctive features.. All types of AC overhead lines in the design schemes are modeled by parameters that take into account their specificity. For all types of AC overhead lines, the calculated values are the specific values of the longitudinal active ( $r_0$ ) and inductive ( $X_0$ ) resistances, as well as the transverse specific conductivities: active ( $g_0$ ) and capacitive ( $\epsilon_0$ ). Additional characteristics are: characteristic impedance ( $Z_c$ ), natural power (PH) and charging power ( $Q_c$ ). Inductive resistance and transverse capacitive conductivity depend on the strength of the magnetic and electric fields, respectively, which, in turn, depend on the design of overhead lines and parameters and mode - voltage phases and flowing currents. Characteristics of overhead lines in general are determined by the specified parameters and the length of the line. All interconnections of parameters and operating characteristics of an overhead transmission line are described by their basic equations. The article presents the basic equations for the most general case of the basic equations of voltage and current of an overhead transmission line containing any number of phases, forming the corresponding number of circuits for stationary full-phase and half-phase modes. Initially, equivalent circuits of multi-phase multi-phase overhead lines were developed, then equations of voltage and current distribution over an infinitesimal portion of overhead lines in partial derivatives were compiled. After the transition to sinusoidal images of current and voltage, the equations are integrated. Thus decisions in a general view turn out. Then the initial conditions are formed - the integration constants, the calculations of the distribution of voltage and current along the line are performed. Calculations are made for the example of a double-circuit compact USVL-500 kV. The data are presented in tabular and graphical form.*

**Keywords:** *a list of 5 - 10 keywords that reflect the theme of the article. Keywords separated by a comma.*

## ОСНОВНІ РІВНЯННЯ БАГАТОЛАНЦЮГОВІ, БАГАТОФАЗНІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

В. М. Постолатій, О. Х. Чалбаш

*Інститут енергетики Академії наук Молдови*

**Анотація.** *Описано різні типи повітряних ліній (ПЛ) електропередачі змінного струму і проведена класифікація за основними відмітними ознаками. Всі типи ПЛ змінного струму в розрахункових схемах моделюються параметрами, що враховують їх специфіку. Для всіх типів ВЛ змінного струму в якості розрахункових приймаються питомі значення поздовжніх активного ( $r_0$ ) і індуктивного ( $X_0$ ) опорів, а також поперечних питомих провідностей: активної ( $g_0$ ) і ємнісний ( $\epsilon_0$ ). Додатковими є показники: хвильовий опір ( $Z_c$ ), натуральна потужність (PH) і зарядна потужність ( $Q_c$ ). Індуктивний опір і поперечна ємнісна провідність залежать від напруженості магнітного і електричного поля, відповідно, які, в свою чергу, залежать від конструкції ПЛ і параметрів і режиму - напруги фаз і протікають струмів. Характеристики ВЛ в цілому визначаються зазначеними параметрами і довжиною лінії. Всі взаємні зв'язки параметрів і режимних характеристик ПЛ описуються їх основними рівняннями. У статті наведено виведені для самого загального випадку основні рівняння напруг і струмів ВЛ, що містять будь-яке число фаз, яке формує відповідне число ланцюгів для стаціонарних полнофазних і неповнофазних режимів. Спочатку розроблені схеми заміщення багатоланцюгових багатофазних ВЛ, потім складені рівняння поширення напруги і струму на нескінченно малій ділянці ПЛ в приватних похідних. Після переходу до синусоїдальним зображень струму і напруги рівняння інтегруються. Таким чином виходять рішення в загальному вигляді. Потім формуються початкові умови - постійні інтегрування, виконуються розрахунки*

розподілу напруги і струму вздовж лінії. На прикладі Дволанцюговий компактної УСВЛ-500 кВ виконані розрахунки. Дані наведені в табличному і графічному вигляді.

**Ключові слова:** Рівняння багатоланцюгових багатофазних ліній електропередачі, еквівалентні параметри, коріння характеристичного рівняння, постійні інтегрування.

Получено 15.10.2019



**Postolatii Vitaliy Mikhailovich**, доктор хабилитат технических наук, академик, заведующий лабораторией управляемых линий электропередачи Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД 2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: [vpostolati@rambler.ru](mailto:vpostolati@rambler.ru).

**Postolatiy Vitaliy**, doctor habilitat of technical sciences, academician, head of the laboratory controlled power transmission lines of the Institute of Power Engineering the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str., MD 2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: [vpostolati@rambler.ru](mailto:vpostolati@rambler.ru).

**ORCID ID:** 0000-0001-8709-9493



**Chalbash Oleg Khalilievich**, доктор экономических наук, Институт энергетики. Ул. Академическая, 5, Кишинев, Молдова.

E-mail: [olegch0@yandex.ru](mailto:olegch0@yandex.ru), [+373 69273631](tel:+37369273631)

**Chalbash Oleg Halilievich**, Doctor of Economics, Institute of Power Engineering. St. Academicheskaiia, 5, Chisinau, Moldova. E-mail:

[olegch0@yandex.ru](mailto:olegch0@yandex.ru), [+373 69273631](tel:+37369273631)

**ORCID ID:** 0000-0002-2915-9926