

Эмпирический метод определения максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи

ГОРШКОВ А.В.

Для определения в некоторой точке отключенной ВЛ максимально возможного значения наведенного напряжения предлагается использовать эмпирический метод, основанный на натурных измерениях наведенного напряжения. Сущность предлагаемого метода заключается в выполнении трех операций. На первом этапе в рассматриваемой точке отключенной ВЛ в течение некоторого интервала времени проводится серия измерений комплексных значений наведенного напряжения. На втором этапе в результате решения обратной задачи определяются значения коэффициентов при аргументах эмпирической функции наведенного напряжения. На третьем этапе в результате решения прямой задачи определяется максимально возможное значение наведенного напряжения путем вычисления максимума эмпирической функции. Для применения на практике предлагаемого метода решена вспомогательная задача обоснованного выбора в качестве влияющих ВЛ только некоторой части из всего множества действующих ВЛ. Разработана методика определения максимально возможного значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: линия электропередачи, наведенное напряжение, методика измерения, влияющая линия электропередачи

Наведенные напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи (ВЛ) согласно [1] следует определять путем выполнения натурных измерений. При этом для обеспечения электробезопасности при проведении в некоторой точке отключенной ВЛ ремонтных работ следует ориентироваться не на измеренное в этой же точке ВЛ значение наведенного напряжения $U_{и}$, а на максимально возможное в этой точке ВЛ значение U_{m} , которое может возникнуть из-за наиболее опасной комбинации токов влияющих ВЛ.

Очевидно, что зарегистрировать при измерении именно максимально возможное значение (далее – максимальное значение) U_{m} наведенного напряжения крайне маловероятно. Поэтому в [1] предписывается определять значение U_{m} пересчетом измеренного значения наведенного напряжения $U_{и}$ на наибольшие рабочие токи влияющих ВЛ.

Если выполнение измерения наведенного напряжения принципиальных трудностей не вызывает, то с пересчетом измеренного значения $U_{и}$ на практике возникают проблемы. Связано это с тем, что при пересчете в общем случае следует учитывать влияние не одной, а нескольких влияющих ВЛ, в каждой из которых наибольшие рабочие токи отличаются от токов в момент измерения в разное число раз. Кроме того, при пересчете необходимо принимать во внимание изменения не только амплитуд фазных токов влияющих ВЛ, но и изменения их фазовых углов, а также весовые коэффици-

енты, учитывающие вклад каждой влияющей ВЛ в значение наведенного напряжения. Однако каким образом все эти факторы следует учитывать при пересчете измеренного значения $U_{и}$ для специалистов, проводящих измерения наведенных напряжений, непонятно.

Приведенные в различной методической литературе указания по пересчету измеренного значения наведенного напряжения $U_{и}$ справедливы только для простейших частных случаев. В результате пересчитанное по методическим указаниям значение может быть многократно меньше по сравнению с истинным максимальным значением наведенного напряжения U_{m} . Можно утверждать, что на данный момент в [1] и методической литературе отсутствует научно обоснованная методика определения максимального значения наведенного напряжения U_{m} в любой точке отключенной ВЛ.

В научной литературе задача пересчета измеренного значения наведенного напряжения $U_{и}$ к наиболее опасной комбинации токов влияющих ВЛ до недавнего времени не рассматривалась. Более того, в литературе не рассматривалась даже задача расчета максимального значения наведенного напряжения U_{m} , которая сводится к задаче определения наиболее опасной комбинации токов влияющих ВЛ.

Корректное решение задачи пересчета измеренного значения наведенного напряжения $U_{и}$ приве-

дено в [2], где показано, что для достоверного пересчета необходима следующая информация:

во-первых, аналитическое выражение комплексной функции наведенного напряжения $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$ в рассматриваемой точке отключенной ВЛ, аргументами которой являются комплексные токи I_i влияющих ВЛ;

во-вторых, комплексные, а не действующие значения токов I_i влияющих ВЛ;

в-третьих, большой объем исходных данных, необходимых для адекватного описания отключенной и влияющих ВЛ, — их подробные топографические и геометрические размеры, сопротивления заземлителей и проводов отключенной ВЛ и др.

Очевидно, что определение значений такого объема исходных данных является трудозатратной задачей. Сложной задачей является также вывод аналитического выражения функции $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$, адекватно описывающего физическое явление наведения напряжения на отключенной ВЛ с учетом реальной окружающей обстановки. Следовательно, достоверный пересчет измеренного значения наведенного напряжения U_m является крайне сложной задачей, требующей большого объема исходных данных и вычислений.

Следует отметить, что те же трудности, т.е. сложный вывод аналитического выражения функции $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$ и определение большого объема исходных данных, возникают и при проведении в исследовательских целях расчетов наведенных напряжений на реальных ВЛ.

В результате возникает потребность в относительно простом эмпирическом, т.е. основанном на натуральных измерениях, методе определения максимального значения U_m наведенного напряжения, который лишен указанных трудностей, характерных для способа пересчета измеренного значения и расчетного способа.

Сущность и преимущества предлагаемого эмпирического метода. Сущность предлагаемого эмпирического метода определения максимального значения наведенного напряжения U_m заключается в выполнении трех основных операций.

На первом этапе в рассматриваемой точке отключенной ВЛ в течение некоторого сравнительно длительного интервала времени, например в течение суток, проводится серия измерений комплексных значений наведенного напряжения \dot{u}_k и регистрируются комплексные значения токов влияющих ВЛ I_i в моменты измерений значений \dot{u}_k .

На втором этапе в результате решения обратной задачи вычисляются значения коэффици-

ентов при аргументах I_i функции наведенного напряжения $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$, что позволяет получить эмпирическую формулу для этой функции в рассматриваемой точке ВЛ.

На третьем этапе в результате решения прямой задачи определяется максимальное значение напряжения U_m , наведенного в рассматриваемой точке ВЛ, вычислением максимума эмпирической функции $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$.

Предлагаемый эмпирический метод имеет следующие преимущества по сравнению со способом пересчета измеренного значения и расчетным способом.

1. Отсутствие необходимости в любых исходных данных об отключенной и влияющих ВЛ, кроме токов I_i влияющих ВЛ, и, следовательно, отсутствие необходимости в проведении трудозатратных изысканий для их получения.

2. Отсутствие необходимости вывода аналитического выражения функции наведенного напряжения $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$.

3. Отсутствие необходимости создания или использования уже имеющихся компьютерных программ для пересчета (расчета) наведенного напряжения и, следовательно, отсутствие необходимости подробного моделирования в программах реальных отключенной и влияющих ВЛ.

4. Автоматический учет в полученной эмпирической формуле функции наведенного напряжения $\dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots)$ всех реальных факторов, влияющих на значение наведенного напряжения, в том числе:

топографии и геометрии отключенной и влияющих ВЛ (рельефа местности, перепада высот, провиса проводов и т.п.);

всех надземных и подземных металлоконструкций и коммуникаций, искажающих электромагнитное поле влияющих ВЛ;

анизотропии электропроводности грунта на всей территории расположения отключенной и влияющих ВЛ.

5. Незначительное влияние на определяемое значение U_m «промахов» измерений по сравнению со способом пересчета измеренного значения.

6. Возможность оценки погрешности определения максимального значения наведенного напряжения U_m .

7. Возможность выявления неучтенных влияющих ВЛ и других электроустановок, наводящих напряжение на отключенной ВЛ.

Теоретические основы эмпирического метода. Рассмотрим отключенную ВЛ длиной l , заземленную определенным способом (одним из допустимых [1]). Рассматриваемая точка, в которой требуется определить максимальное значение наведен-

ного напряжения U_m , расположена на расстоянии l_0 от первого конца отключенной ВЛ.

Далее все существующие ВЛ, наводящие на отключенной и заземленной ВЛ отличное от нуля напряжение, называются **действующими ВЛ**. Все действующие ВЛ, учитываемые на практике для определения наведенного напряжения, называются **влияющими ВЛ**.

Рассмотрим нормальный (неаварийный) режим работы действующих ВЛ, фазные токи в которых в общем случае несимметричны. Принимаем, что распределенные (первичные) параметры и нагрузки всех ВЛ являются линейными элементами, в результате чего токи в действующих ВЛ и наведенное напряжение на отключенной ВЛ являются синусоидальными функциями времени промышленной частоты. Следует отметить, что все последующие выводы справедливы и для высших гармоник токов и наведенного напряжения, частота которых не превышает некоторое предельное значение.

Тогда из решения уравнений электромагнитного поля следует, что наведенное напряжение является линейной функцией комплексных токов действующих ВЛ с неизменными коэффициентами – комплексными взаимными сопротивлениями:

$$\begin{aligned} \dot{u}(I_1, \dots, I_i, \dots) &= \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{Ai} \dot{z}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} \dot{z}_{Bi} + \dot{I}_{Ci} \dot{z}_{Ci}) = \\ &= \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1i} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2i} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i} \dot{z}_{0i}). \end{aligned} \quad (1)$$

где n – число всех действующих ВЛ; \dot{I}_{Ai} , \dot{I}_{Bi} , \dot{I}_{Ci} – комплексные фазные токи в i -ой действующей ВЛ; \dot{z}_{Ai} , \dot{z}_{Bi} , \dot{z}_{Ci} – комплексные взаимные сопротивления между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и фазными проводами i -й действующей ВЛ; \dot{I}_{1i} , \dot{I}_{2i} , \dot{I}_{0i} – комплексные токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в i -й действующей ВЛ; \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} – комплексные взаимные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й действующей ВЛ [2]:

$$\dot{z}_{1i} = \dot{z}_{Ai} + \dot{z}_{Bi} \dot{a}^2 + \dot{z}_{Ci} \dot{a}; \quad (2)$$

$$\dot{z}_{2i} = \dot{z}_{Ai} + \dot{z}_{Bi} \dot{a} + \dot{z}_{Ci} \dot{a}^2; \quad (3)$$

$$\dot{z}_{0i} = \frac{\dot{z}_{Ai} + \dot{z}_{Bi} + \dot{z}_{Ci}}{3}. \quad (4)$$

Здесь $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$ – комплексный оператор поворота.

В [2] показано, что выражение для максимального значения модуля наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ определяется как алгебраическая сумма максимально воз-

можных значений модулей составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей наведенных напряжений от всех **влияющих ВЛ**:

$$U_m = \sum_{i=1}^N (I_{1mi} z_{1i} + I_{2mi} z_{2i} + 3I_{0mi} z_{0i}), \quad (5)$$

где N – число влияющих ВЛ; I_{1mi} , I_{2mi} , I_{0mi} – максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в i -й влияющей ВЛ в нормальном режиме ее работы; z_{1i} , z_{2i} , z_{0i} – модули комплексных взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} прямой, обратной и нулевой последовательностей между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и i -й влияющей ВЛ.

Принимаем, что значения токов I_{1mi} , I_{2mi} , I_{0mi} известны, например, в результате статистической обработки данных, предоставленных диспетчерскими службами организаций–владельцев ВЛ. Тогда неизвестными в (5) являются $3N$ величины – модули комплексных взаимных сопротивлений z_{1i} , z_{2i} , z_{0i} , которые определяются в результате решения обратной задачи.

Для этого проводится серия из M измерений (в общем случае $M \neq 3N$) комплексных значений наведенного напряжения \dot{u}_k в рассматриваемой точке отключенной ВЛ:

$$\dot{u}_k = u_{xk} + ju_{yk}, \quad (6)$$

где u_{xk} и u_{yk} – вещественная и мнимая части \dot{u}_k .

Допустим, что в моменты измерений значений наведенного напряжения \dot{u}_k регистрируются комплексные значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей \dot{I}_{1ki} , \dot{I}_{2ki} , \dot{I}_{0ki} в действующих ВЛ.

Тогда согласно (1) получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для определения комплексных взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} (отметим, что согласно (5) для определения значения U_m достаточно значений модулей взаимных сопротивлений):

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1i} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2i} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0i} \dot{z}_{0i}) &= \dot{u}_1; \\ \dots & \\ \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1ki} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2ki} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0ki} \dot{z}_{0i}) &= \dot{u}_k; \\ \dots & \\ \sum_{i=1}^n (\dot{I}_{1Mi} \dot{z}_{1i} + \dot{I}_{2Mi} \dot{z}_{2i} + 3\dot{I}_{0Mi} \dot{z}_{0i}) &= \dot{u}_M, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

которую можно представить в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{I}}\mathbf{z} = \dot{\mathbf{u}}, \quad (8)$$

где $\dot{\mathbf{I}}$ – матрица размером $M \times 3n$ зарегистрированных комплексных значений токов симметричных составляющих $\dot{I}_{1ki}, \dot{I}_{2ki}, \dot{I}_{0ki}$ в действующих ВЛ в моменты измерений значений \dot{u}_k наведенного напряжения; $\dot{\mathbf{z}} = (\dot{z}_{11}, \dot{z}_{21}, \dot{z}_{01}, \dots, \dot{z}_{1n}, \dot{z}_{2n}, \dot{z}_{0n})^T$ – вектор размером $3n$ неизвестных комплексных взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1i}, \dot{z}_{2i}, \dot{z}_{0i}$; $\dot{\mathbf{u}} = (\dot{u}_1, \dots, \dot{u}_k, \dots, \dot{u}_M)^T$ – вектор размером M измеренных комплексных значений \dot{u}_k наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной ВЛ.

Обратная задача определения взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1i}, \dot{z}_{2i}, \dot{z}_{0i}$ путем решения СЛАУ (8) относится к классу некорректных задач вследствие недообусловленности или переобусловленности СЛАУ (8) и наличия погрешностей задания элементов матрицы $\dot{\mathbf{I}}$ и вектора $\dot{\mathbf{u}}$. Если даже решение некорректной задачи, полученное классическими методами, существует и оно – единственное, то, как правило, оно неустойчиво и, следовательно, непригодно для применения. Однако к настоящему времени для решения некорректных задач разработаны специальные методы регуляризации [4– 8], основанные на использовании дополнительной априорной информации, например, значений погрешностей задания матрицы и вектора правой части СЛАУ. На основе данных методов разработаны регуляризирующие алгоритмы, позволяющие на практике найти устойчивые ненулевые решения СЛАУ. В статье регуляризирующие алгоритмы не рассматриваются: только формируется СЛАУ для решения обратной задачи эмпирического метода. При этом считается, что решение сформированной системы будет получено некоторым методом регуляризации.

На данный момент для практического применения разработаны регуляризирующие алгоритмы только для вещественных СЛАУ, поэтому вместо комплексной СЛАУ (8) рассматривается вещественная СЛАУ, полученная путем разделения действительной и мнимой частей СЛАУ (8). Для формирования вещественной СЛАУ представим (8) в следующем виде:

$$(\mathbf{I}_x + j\mathbf{I}_y)(\mathbf{z}_x + j\mathbf{z}_y) = \mathbf{u}_x + j\mathbf{u}_y, \quad (9)$$

где $\mathbf{I}_x, \mathbf{I}_y$ – матрицы размером $3n$ вещественных и мнимых частей токов симметричных составляющих $I_{1ki}, I_{2ki}, I_{0ki}$ в действующих ВЛ в моменты измерений значений \dot{u}_k наведенного напряжения; $\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y$ – векторы размером $3n$ неизвестных вещественных $z_{1xi}, z_{2xi}, z_{0xi}$ и мнимых $z_{1yi}, z_{2yi}, z_{0yi}$ частей взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1i}, \dot{z}_{2i}, \dot{z}_{0i}$; $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y$ – векторы размером M вещественных u_{xk} и мнимых u_{yk}

частей измеренных значений наведенных напряжений \dot{u}_k в рассматриваемой точке отключенной ВЛ.

Раскрывая скобки в выражении (9), получаем:

$$\mathbf{I}_x \mathbf{z}_x - \mathbf{I}_y \mathbf{z}_y + j(\mathbf{I}_y \mathbf{z}_x + \mathbf{I}_x \mathbf{z}_y) = \mathbf{u}_x + j\mathbf{u}_y. \quad (10)$$

Разделяя действительную и мнимую части (10), получаем систему из двух вещественных СЛАУ:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_x \mathbf{z}_x - \mathbf{I}_y \mathbf{z}_y &= \mathbf{u}_x; \\ \mathbf{I}_y \mathbf{z}_x + \mathbf{I}_x \mathbf{z}_y &= \mathbf{u}_y; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

которую можно представить в компактной матричной форме:

$$\mathbf{I}' \mathbf{z}' = \mathbf{u}', \quad (12)$$

где \mathbf{I}' – расширенная матрица размером $2M \times 6n$, элементами которой являются матрицы токов \mathbf{I}_x и \mathbf{I}_y :

$$\mathbf{I}' = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_x & -\mathbf{I}_y \\ \mathbf{I}_y & \mathbf{I}_x \end{pmatrix}; \quad (13)$$

\mathbf{z}' – расширенный вектор размером $6n$, элементами которого являются векторы сопротивлений \mathbf{z}_x и \mathbf{z}_y :

$$\mathbf{z}' = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_x \\ \mathbf{z}_y \end{pmatrix}; \quad (14)$$

\mathbf{u}' – расширенный вектор размером $2M$, элементами которого являются векторы напряжений \mathbf{u}_x и \mathbf{u}_y :

$$\mathbf{u}' = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_x \\ \mathbf{u}_y \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Допустим, что в результате регуляризации получено устойчивое ненулевое решение \mathbf{z}' СЛАУ (12). Тогда модули взаимных сопротивлений $\dot{z}_{1i}, \dot{z}_{2i}, \dot{z}_{0i}$ определяются следующим образом:

$$z_{1i} = \sqrt{z_{1xi}^2 + z_{1yi}^2}; \quad (16)$$

$$z_{2i} = \sqrt{z_{2xi}^2 + z_{2yi}^2}; \quad (17)$$

$$z_{0i} = \sqrt{z_{0xi}^2 + z_{0yi}^2}. \quad (18)$$

Таким образом, для определения модулей взаимных сопротивлений z_{1i}, z_{2i}, z_{0i} вместо обратной задачи (8) достаточно решить обратную задачу (12).

Однако для практического использования СЛАУ (12) непригодна, так как для ее формирования необходимы значения токов всех n действующих ВЛ. В то же время очевидно, что для достовер-

ного определения максимального значения наведенного напряжения U_m учитывать влияние всех действующих в мире ВЛ нет необходимости. Достаточно ограничиться только N обоснованно выбранными ВЛ:

$$N \ll n, \quad (19)$$

которые следует считать влияющими ВЛ, а влиянием остальных ВЛ можно пренебречь. Именно по этим соображениям в (5) – учтено влияние только N ВЛ, рассматриваемых в качестве влияющих.

Упрощение СЛАУ путем учета только влияющих ВЛ. Допустим, что все ВЛ, рассматриваемые в качестве влияющих, известны и их число равно N . Учитывая вместо n действующих ВЛ только N влияющих ВЛ запишем систему (11) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_{Nx} \mathbf{z}_{Nx} - \mathbf{I}_{Ny} \mathbf{z}_{Ny} + \Delta \mathbf{u}_x &= \mathbf{u}_x; \\ \mathbf{I}_{Ny} \mathbf{z}_{Nx} + \mathbf{I}_{Nx} \mathbf{z}_{Ny} + \Delta \mathbf{u}_y &= \mathbf{u}_y, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где \mathbf{I}_{Nx} , \mathbf{I}_{Ny} – матрицы размером $M \times 3N$ вещественных и мнимых частей токов \dot{I}_{1ki} , \dot{I}_{2ki} , \dot{I}_{0ki} симметричных составляющих в N влияющих ВЛ в моменты измерений значений \dot{u}_k наведенного напряжения; \mathbf{z}_{Nx} , \mathbf{z}_{Ny} – векторы размером $3N$ неизвестных вещественных z_{1xi} , z_{2xi} , z_{0xi} и мнимых z_{1yi} , z_{2yi} , z_{0yi} частей комплексных взаимных сопротивлений z_{1i} , z_{2i} , z_{0i} между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и влияющими ВЛ; $\Delta \mathbf{u}_x$, $\Delta \mathbf{u}_y$ – векторы размером M вещественных Δu_{xk} и мнимых Δu_{yk} частей напряжений $\Delta \dot{u}_k$, наведенных всеми ВЛ, не рассматриваемыми в качестве влияющих ВЛ; \mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y – те же векторы, что и в (9).

Перенос в (20) $\Delta \mathbf{u}_x$ и $\Delta \mathbf{u}_y$ в правые части и обозначая

$$\mathbf{u}_{Nx} = \mathbf{u}_x - \Delta \mathbf{u}_x; \quad (21)$$

$$\mathbf{u}_{Ny} = \mathbf{u}_y - \Delta \mathbf{u}_y, \quad (22)$$

получаем СЛАУ для определения неизвестных \mathbf{z}_{Nx} , \mathbf{z}_{Ny} :

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_{Nx} \mathbf{z}_{Nx} - \mathbf{I}_{Ny} \mathbf{z}_{Ny} &= \mathbf{u}_{Nx}; \\ \mathbf{I}_{Ny} \mathbf{z}_{Nx} + \mathbf{I}_{Nx} \mathbf{z}_{Ny} &= \mathbf{u}_{Ny}, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

которую можно представить в компактной матричной форме:

$$\mathbf{I}'_N \mathbf{z}'_N = \mathbf{u}'_N, \quad (24)$$

где \mathbf{I}'_N – расширенная матрица размером $2M \times 6N$, элементами которой являются матрицы токов \mathbf{I}_{Nx} и \mathbf{I}_{Ny} :

$$\mathbf{I}'_N = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{Nx} & -\mathbf{I}_{Ny} \\ \mathbf{I}_{Ny} & \mathbf{I}_{Nx} \end{pmatrix}; \quad (25)$$

\mathbf{z}'_N – расширенный вектор размером $6N$, элементами которого являются векторы сопротивлений \mathbf{z}_{Nx} и \mathbf{z}_{Ny} :

$$\mathbf{z}'_N = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_{Nx} \\ \mathbf{z}_{Ny} \end{pmatrix}; \quad (26)$$

\mathbf{u}'_N – расширенный вектор размером $2M$, элементами которого являются векторы наведенных напряжений \mathbf{u}_{Nx} и \mathbf{u}_{Ny} :

$$\mathbf{u}'_N = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{Nx} \\ \mathbf{u}_{Ny} \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Вектор \mathbf{u}'_N правой части (24) неизвестен, поэтому заменим его известным вектором \mathbf{u}' (15). Вместо точной матрицы токов \mathbf{I}'_N на практике вследствие измерения токов в ВЛ с определенной точностью известна только приближенная матрица токов \mathbf{I}'_h размером $2M \times 6N$:

$$\mathbf{I}'_h = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{hx} & -\mathbf{I}_{hy} \\ \mathbf{I}_{hy} & \mathbf{I}_{hx} \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Тогда, заменяя матрицу \mathbf{I}'_N на \mathbf{I}'_h и \mathbf{u}'_N на \mathbf{u}' , получаем вместо точной СЛАУ (24) следующую приближенную систему для определения неизвестных \mathbf{z}_{Nx} , \mathbf{z}_{Ny} :

$$\mathbf{I}'_h \mathbf{z}'_N = \mathbf{u}'. \quad (29)$$

Сформированная таким способом система (29) является уже окончательным представлением обратной задачи данного эмпирического метода.

Допустим, что в результате регуляризации получено устойчивое ненулевое решение \mathbf{z}'_N СЛАУ (29). Тогда модули z_{1i} , z_{2i} , z_{0i} взаимных сопротивлений \dot{z}_{1i} , \dot{z}_{2i} , \dot{z}_{0i} определяются по выражениям (16)–(18).

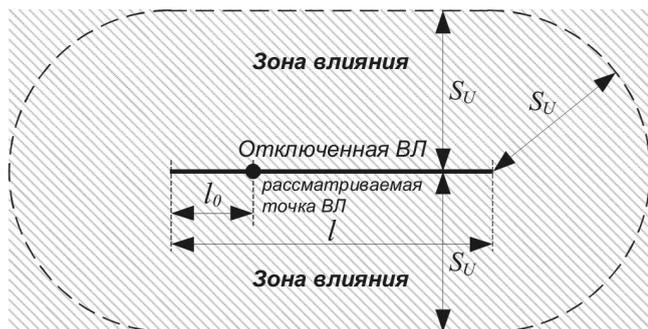
В итоге максимальное значение наведенного напряжения U_m определится решением прямой задачи (5) эмпирического метода.

Для определения данным эмпирическим методом достоверного значения наведенного напряжения U_m необходимо предварительно решить следующую вспомогательную задачу: обоснованно выбрать в качестве влияющих ВЛ только некоторую часть из всего множества действующих ВЛ. Следует понимать, что учет в качестве влияющих ВЛ только одной или нескольких произвольно выбранных действующих ВЛ может привести к существенному занижению расчетного максимального значения наведенного напряжения U_m .

Постановка вспомогательной задачи определения числа N влияющих ВЛ. Рассмотрим введенное в [3] понятие зоны влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ. Для данного эмпирического ме-

тогда дадим ее более общее по сравнению с приведенным в [3] определение: *зоной влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ* является прилегающая со всех сторон к отключенной ВЛ территория таких размеров, при которых все ВЛ, расположенные за ее границами, суммарно наводят в рассматриваемой точке напряжение не более некоторого значения ΔU , пренебрежимо малого по сравнению с некоторым базовым значением U_F .

Для однозначной определенности зона влияния в данной статье представляет собой геометрическое место точек, расположенных на расстоянии не более S_U от отключенной ВЛ (см. рисунок).



Зона влияния на рассматриваемую точку прямолинейной ВЛ

В качестве базового значения U_F в [3] рассматривается предельно допустимое значение наведенного напряжения, равное 25 В. Для данного эмпирического метода значение U_F подлежит обоснованному выбору (что будет сделано далее).

Принятое определение зоны влияния можно распространить и на отключенную ВЛ, трасса которой является криволинейной. В этом случае продольные границы зоны влияния являются эквидистантами трассы отключенной ВЛ, а торцевые границы зоны влияния, как и у прямолинейной ВЛ, — полуокружностями.

Далее все ВЛ, расположенные за границами зоны влияния, называются *удаленными ВЛ*. Так как все удаленные ВЛ суммарно наводят в рассматриваемой точке отключенной ВЛ напряжение не более пренебрежимо малого значения ΔU , то их влиянием на рассматриваемую точку отключенной ВЛ можно пренебречь. Тогда можно считать, что наведенное напряжение определяется влиянием только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния.

Далее все ВЛ, расположенные в зоне влияния, рассматриваются в качестве *влияющих ВЛ*. Тогда задача определения числа влияющих ВЛ N сводится к задаче определения размера зоны влияния S_U на рассматриваемую точку отключенной ВЛ. Разумеется, при этом предполагается, что информация о числе расположенных в зоне влияния ВЛ и значениях их токов будет предоставлена диспетчерскими службами организаций — владельцев ВЛ.

Необходимо отметить, что введенное понятие зоны влияния и приведенное ранее определение влияющей ВЛ позволяют определить абсолютную погрешность ΔU_m расчета максимального значения наведенного напряжения U_m , обусловленную учетом влияния только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния. Значение погрешности ΔU_m равно ΔU .

Определение размера S_U зоны влияния на рассматриваемую точку ВЛ. В качестве мер точности задания матриц размером $m \times n$ и векторов размером m далее рассматриваются их квадратичные нормы:

$$\|\mathbf{A}\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ki}^2}; \quad (30)$$

$$\|\mathbf{a}\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m a_k^2}. \quad (31)$$

Далее принимаем, что правая часть приближенной СЛАУ (29) задана с некоторым отклонением δ от правой части точной системы (24):

$$\|\mathbf{u}'_N - \mathbf{u}'\| \leq \delta. \quad (32)$$

Следует пояснить, что отклонение δ определяется не только значениями напряжений Δu_{xk} и Δu_{yk} , наведенных в рассматриваемой точке отключенной ВЛ всеми не влияющими, т.е. удаленными ВЛ, но и погрешностью измерения наведенного напряжения. Далее погрешностью измерения наведенного напряжения пренебрегаем (при необходимости ее можно без труда учесть) и считаем, что δ определяется только значениями напряжений, наведенных удаленными ВЛ.

Также следует пояснить, что погрешность h задания приближенной матрицы токов \mathbf{I}'_h

$$\|\mathbf{I}'_N - \mathbf{I}'_h\| \leq h \quad (33)$$

определяется погрешностями измерений токов влияющих ВЛ и необходима только для проведения регуляризации решения СЛАУ (29). Следовательно, при определении числа влияющих ВЛ погрешность h не используется.

Согласно теории регуляризации [6–8] для получения ненулевого решения \mathbf{z}'_N необходимо выполнение следующего условия для системы (29):

$$\|\mathbf{u}'\| > \delta. \quad (34)$$

Принимаем, что в любой момент измерений для модулей напряжений Δu_k , наведенных всеми удаленными ВЛ, выполняется соотношение

$$\Delta u_k = \sqrt{\Delta u_{xk}^2 + \Delta u_{yk}^2} =$$

$$= \sqrt{(u_{Nxx} - u_{xk})^2 + (u_{Nyk} - u_{yk})^2} \ll \Delta U, \quad (35)$$

где ΔU – оценка сверху модуля напряжения, наведенного в рассматриваемой точке отключенной ВЛ всеми удаленными ВЛ.

Тогда из (35) следует, что справедлива следующая оценка:

$$\|\mathbf{u}'_N - \mathbf{u}'\| = \sqrt{\sum_{k=1}^M (u_{Nxx} - u_{xk})^2 + \sum_{k=1}^M (u_{Nyk} - u_{yk})^2} \ll \sqrt{M} \Delta U. \quad (36)$$

Следовательно, в соответствии с выражениями (32) и (36) можно принять

$$\delta = \sqrt{M} \Delta U, \quad (37)$$

тогда условие (34) получения ненулевого решения \mathbf{z}'_N можно записать как

$$\|\mathbf{u}'\| = \sqrt{\sum_{k=1}^M u_{xk}^2 + \sum_{k=1}^M u_{yk}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^M u_k^2} > \sqrt{M} \Delta U. \quad (38)$$

Рассматривая вместо нормы $\|\mathbf{u}'\|$ среднеквадратичное значение u_σ модулей u_k измеренных значений наведенных напряжений:

$$u_\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M u_k^2} = \frac{\|\mathbf{u}'\|}{\sqrt{M}}, \quad (39)$$

условие (38) получения ненулевого решения \mathbf{z}'_N можно записать как

$$u_\sigma > \Delta U. \quad (40)$$

Определить оценку сверху ΔU модуля напряжения, наведенного всеми удаленными ВЛ, можно, например, по приведенной в [3] методике, где все множество удаленных ВЛ заменено эквивалентными параллельными и перпендикулярными отключенной ВЛ двухцепными ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов. В данном случае под эквивалентностью понимается, что суммарная длина всех эквивалентных удаленных ВЛ равна суммарной длине всех реальных удаленных ВЛ.

В этом случае выражение для ΔU имеет следующий вид [3]:

$$\Delta U = 4U_d \psi_1 \left(\frac{S_U}{D} \right), \quad (41)$$

где

$$U_d = \frac{I_{1m} \rho \beta_{cp} l_0 v(l_0) k_m}{\pi D^2};$$

$$\beta_{cp} = 1 + k_\omega (H + h_{cp});$$

$$k_\omega = \sqrt{\frac{j\omega \mu_0}{\rho}};$$

$$v(l_0) = \begin{cases} 1 & \text{для ВЛ, заземленной на одном конце;} \\ \frac{2(l-l_0)}{l} & \text{для ВЛ, заземленной на обоих концах;} \end{cases}$$

$$k_m = \left(1 + \frac{I_{2m}}{I_{1m}} \right) \frac{k_\omega (h_{\max} - h_{\min})}{\beta_{cp}} + \frac{3I_{0m}}{I_{1m}};$$

$\psi_1(a)$ – тригамма-функция [9]:

$$\psi_1(a) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(a+n)^2}; S_U – \text{размер зоны влияния на}$$

рассматриваемую точку отключенной ВЛ; D – среднее расстояние между соседними эквивалентными удаленными ВЛ; I_{1m} , I_{2m} , I_{0m} – максимально возможные значения модулей токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в удаленных ВЛ в нормальном режиме их работы; ρ – эквивалентное удельное электрическое сопротивление слоя грунта толщиной, равной глубине проникновения в него электромагнитной волны частотой 50 Гц; k_ω – модуль волнового числа грунта; l – длина отключенной ВЛ; l_0 – расстояние по трассе отключенной ВЛ до рассматриваемой точки; H – средняя высота фазных проводов отключенной ВЛ; h_{cp} – средняя высота фазных проводов удаленных ВЛ; h_{\min} и h_{\max} – средние значения минимальной и максимальной высоты подвеса фазных проводов удаленных ВЛ.

Подставляя (41) в (40), получаем уравнение для определения размера S_U зоны влияния на рассматриваемую точку отключенной ВЛ (строго говоря, это уравнение для определения нижней границы $\inf S_U$ размера S_U):

$$\psi_1 \left(\frac{S_U}{D} \right) = \frac{u_\sigma}{4U_d}. \quad (42)$$

Формально решение уравнения (42) можно записать как

$$S_U = D \psi_1^{-1} \left(\frac{u_\sigma}{4U_d} \right), S_U > 0,$$

где $\psi_1^{-1}(a)$ – обратная тригамма-функция.

На практике уравнение (42) можно решить численными методами, используя системы компьютерной математики, например Mathcad.

Уравнение (42) можно также решить аналитически, используя приближенное выражение для тригамма-функции [9]:

$$\psi_1(a) \approx \frac{1}{a} + \frac{1}{2a^2},$$

тогда решением уравнения (42) является:

$$S_U = S_0 + \sqrt{S_0(S_0 + D)};$$

$$S_0 = \frac{2U_d}{u_\sigma} D = \frac{2I_{1m}\rho\beta_{cp}l_0v(l_0)k_m}{u_\sigma\pi D}.$$

Очевидно, что для определения размера зоны влияния необходимы значения следующих величин – эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта ρ , среднего расстояния D между соседними эквивалентными удаленными ВЛ, максимально возможных значений I_{1m} , I_{2m} и I_{0m} модулей токов симметричных составляющих в удаленных ВЛ в нормальном режиме их работы, средней высоты фазных проводов H отключенной ВЛ, значения высоты фазных проводов удаленных ВЛ h_{\min} , h_{\max} , h_{cp} . Способы определения этих величин приведены в [3].

Согласно (40) абсолютную погрешность ΔU_m определения максимального значения U_m , обусловленную учетом влияния только ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U , можно определить как $\Delta U_m = u_\sigma$. При необходимости уменьшения погрешности ΔU_m , например до значения $\Delta U_m = \varepsilon u_\sigma$, $\varepsilon > 1$, условие (40) получения ненулевого решения z'_N следует ужесточить:

$$\varepsilon u_\sigma > \Delta U. \quad (43)$$

В этом случае размер зоны влияния определяется как

$$S_U = D\psi_1^{-1}\left(\frac{\varepsilon u_\sigma}{4U_d}\right), \quad S_U > 0, \quad (44)$$

где $\psi_1^{-1}(a)$ – обратная триганма-функция.

Тогда приближенное выражение для определения размера зоны влияния имеет вид:

$$S_U = S_0 + \sqrt{S_0(S_0 + D)}; \quad (45)$$

$$S_0 = \frac{2U_d}{\varepsilon u_\sigma} D = \frac{2I_{1m}\rho\beta_{cp}l_0v(l_0)k_m}{\varepsilon u_\sigma\pi D}.$$

Следует отметить, что при $\varepsilon \geq 1$ провести регуляризацию решения СЛАУ (29) невозможно и, следовательно, невозможно получить устойчивое ненулевое решение z'_N .

Также следует отметить, что согласно выражению (43) в качестве базового значения U_F , необходимого для понятия термина «размер зоны влияния», можно принять среднеквадратичное значение u_σ модулей измеренных комплексных значений \dot{u}_k наведенного напряжения.

Из выражений (44) и (45) следует важный вывод: чем меньше среднеквадратичное значение модулей u_σ всех измеренных напряжений в проведенной серии измерений, тем большим должен быть размер зоны влияния и, следовательно, тем большее число ВЛ следует учитывать в качестве влияющих ВЛ.

Пример определения размера S_U зоны влияния.

Рассмотрим пример определения размера зоны влияния S_U на рассматриваемую точку отключенной ВЛ по выражению (44).

При расчетах принято: $f = 50$ Гц; $l = 50$ км; $l_0 = 25$ км; $H = 30$ м; $h_{\max} = 40$ м; $h_{\min} = 20$ м; $h_{cp} = 30$ м; $D = 10$ км; $\rho = 30$ Ом·м (характерное для московского региона значение согласно [10]).

Расчетные значения размера S_U зоны влияния при несимметрии фазных токов в удаленных ВЛ в нормальном режиме их работы со средними значениями токов $I_{1m} = 600$ А; $I_{2m} = 60$ А; $I_{0m} = 60$ А приведены в таблице.

Приведенный пример демонстрирует существенную зависимость размера S_U зоны влияния от среднеквадратичного значения u_σ модулей u_k измеренных значений наведенных напряжений в проведенной серии измерений. При очень малом значении u_σ (по сравнению, например, с предельно допустимым значением 25 В) размер зоны влияния может составлять десятки и сотни километров и, следовательно, число ВЛ, которые следует учесть в качестве влияющих, может быть велико. При большом числе влияющих ВЛ из-за организационных трудностей возможно отсутствие полной информации о значениях токов всех влияющих ВЛ, в результате будет невозможно на практике приме-

Параметр $\varepsilon = \frac{\Delta U_m}{u_\sigma}$	Расчетные значения размера зоны S_U , км, при различных значениях u_σ , В							
	0,5	1,0	2,5	5	10	25	50	100
0,1	238	122	52	28	16	8,4	5,5	3,7
0,2	122	63	28	16	9,7	5,5	3,7	2,5
0,5	52	28	14	8,4	5,5	3,3	2,3	1,6
0,7	38	22	11	6,8	4,5	2,7	1,9	1,4
0,999*	28	16	8,4	5,5	3,7	2,3	1,6	1,1

* При $\varepsilon \geq 1$ устойчивое ненулевое решение z'_N не существует.

нить данный эмпирический метод. В таком случае можно считать, что проведенная серия измерений, для которой среднеквадратичное значение u_σ имеет очень малое значение, является неинформативной для достоверного определения максимального значения наведенного напряжения U_m .

Методика определения максимального значения наведенного напряжения эмпирическим методом.

1. В рассматриваемой точке отключенной и заземленной ВЛ в течение некоторого интервала времени проводится серия из M измерений комплексных значений наведенного напряжения ($\dot{u}_1, \dots, \dot{u}_k, \dots, \dot{u}_M$).

2. Вычисляется среднеквадратичное значение u_σ модулей u_k измеренных комплексных значений наведенного напряжения \dot{u}_k .

3. Задается допустимая абсолютная погрешность $\Delta U_m < u_\sigma$ определения максимально возможного значения U_m наведенного напряжения и вычисляется параметр $\varepsilon = \Delta U_m / u_\sigma$.

4. По выражению (44) определяется размер зоны влияния S_U на рассматриваемую точку отключенной ВЛ.

5. Диспетчерскими службами организаций – владельцев ВЛ предоставляется следующая информация:

число N всех ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U ;

комплексные значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей $\dot{I}_{1ki}, \dot{I}_{2ki}, \dot{I}_{0ki}$ всех N ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U , в моменты проведения измерений наведенного напряжения;

значения погрешности измерения токов $\dot{I}_{1ki}, \dot{I}_{2ki}, \dot{I}_{0ki}$;

максимально возможные значения токов модулей $I_{1mi}, I_{2mi}, I_{0mi}$ всех N ВЛ, расположенных в зоне влияния размером S_U , в нормальном режиме их работы.

6. Формируется СЛАУ (29) из $2M$ уравнений с $6N$ неизвестными величинами – вещественными $z_{1xi}, z_{2xi}, z_{0xi}$ и мнимыми $z_{1yi}, z_{2yi}, z_{0yi}$ частями комплексных взаимных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и расположенными в зоне влияния ВЛ.

7. Методом регуляризации находится численное устойчивое ненулевое решение z'_N СЛАУ (29). Априорной информацией для регуляризации являются погрешность h задания матрицы токов \mathbf{I}'_h и погрешность $\delta = \sqrt{M} \Delta U_m$ задания вектора \mathbf{u}' СЛАУ

(29). Кроме того, априорной информацией являются следующие условия: $z_{1i} \ll z_{0i}$ и $z_{2i} \ll z_{0i}$ [2].

8. По (16)–(18) вычисляются модули z_{1i}, z_{2i}, z_{0i} взаимных сопротивлений между рассматриваемой точкой отключенной ВЛ и расположенными в зоне влияния ВЛ.

9. По (5) вычисляется максимально возможное значение наведенного напряжения U_m в рассматриваемой точке отключенной ВЛ. Абсолютная погрешность полученного значения U_m , обусловленная учетом влияния только тех ВЛ, которые расположены в зоне влияния размером S_U , равна ΔU_m .

Следует отметить, что для определения распределения значений U_m по длине отключенной ВЛ наиболее рациональным будет измерение наведенных напряжений одновременно в разных точках ВЛ. При этом отключенная ВЛ должна быть заземлена только на концах (или одном конце) без заземления в рассматриваемых точках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** по охране труда при эксплуатации электроустановок. Приказ Минтруда России от 19.02.2016 № 74н.
2. **Горшков А.В.** Определение максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи. – *Электричество*, 2017, № 11, с. 12–21.
3. **Горшков А.В.** Определение числа влияющих линий для расчета наведенного напряжения на отключенной воздушной линии электропередачи. – *Электричество*, 2018, № 6, с. 4–15.
4. **Тихонов А.Н.** Решение некорректно поставленных задач и метод регуляризации. – *Доклады АН СССР*, 1963, т. 151, № 3, с. 501–504.
5. **Тихонов А.Н.** О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения. – *Доклады АН СССР*, 1965, т. 163, № 3, с. 591–594.
6. **Тихонов А.Н.** О приближенных системах линейных алгебраических уравнений. – *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1980, т. 20, № 6, с. 1373–1383.
7. **Тихонов А.Н.** О нормальных решениях приближенных систем линейных алгебраических уравнений. – *Доклады АН СССР*, 1980, т. 254, № 3, с. 549–554.
8. **Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.** Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983, 200 с.
9. **Абрамовиц М., Стиган И.** Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979, 832 с.
10. **Правила** защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линии электропередачи. Ч. 1. Общие положения. Опасные влияния. М., Л.: Энергия, 1966, 42 с.

[03.06.2019]

А в т о р: Горшков Андрей Вячеславович – кандидат техн. наук, начальник проектного отдела ООО «НПФ ЭЛНАП». диссертацию защитил в 1999 г.

An Empirical Method for Determining the Maximal Induced Voltage Value at the Considered Point of a Disconnected Overhead Power Line

GORSHKOV Andrey V. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia*) – Head of Design Department of LLC «NPF ELNAP», Cand. Sci. (Eng.)

For determining the maximum possible voltage induced at a certain point of a disconnected overhead power line, it is proposed to use an empirical method based on field measurements of induced voltages. The essence of the proposed method consists in carrying out the following three stages. At the first stage, a series of measurements of complex induced voltage values is carried out during a certain interval of time at the considered point of the disconnected overhead line. At the second stage, the values of coefficients at the arguments of the empirical induced voltage function are determined by solving the inverse problem. At the third stage, the maximally possible induced voltage value is determined as a result of solving the direct problem by calculating the maximum of the empirical function. For the possibility of applying the proposed method in practice, the auxiliary problem of soundly selecting only part out of the entire multitude of operating overhead power lines as influencing ones is solved. A procedure for determining the maximum possible induced voltage value at the considered point of a disconnected overhead line has been developed.

Key words: power transmission line, induced voltage, measurement procedure, influencing power line

REFERENCES

1. **Pravila po okhrane truda...** *Prikaz Mintruda Rossii ot 19.02.2016 No. 74 n* (Order of the Ministry of Labor dated 19.02.2016 No. 74 n).
2. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 12–21.
3. **Gorshkov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 6, pp. 4–15.
4. **Tikhonov A.N.** *Doklady Akademii nauk SSSR – in Russ. (Reports of the USSR Academy of Sciences)*, 1963, vol. 151, No. 3, pp. 501–504.
5. **Tikhonov A.N.** *Doklady Akademii nauk SSSR – in Russ. (Reports of the USSR Academy of Sciences)*, 1965, vol. 163, No. 3, pp. 591–594.
6. **Tikhonov A.N.** *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki – in Russ. (Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics)*, 1980, vol. 20, No. 6, pp. 1373–1383.
7. **Tikhonov A.N.** *Doklady Akademii nauk SSSR – in Russ. (Reports of the USSR Academy of Sciences)*, 1980, vol. 254, No. 3, pp. 549–554.
8. **Tikhonov A.N., Goncharskii A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.** *Regulyarizuyushchiye algoritmy i apriornaya informatsiya* (Regularization algorithms and a priori information). Moscow, Nauka, 1983, 200 p.
9. **Abramovits M., Stigan I.** *Spravochnik po spetsial'nyim funktsiyam* (Special features reference). Moscow, Nauka, 1979, 832.
10. **Pravila zashchity ustroystv provodnoi svyazi... Chast' 1. Obshchiye polozeniya. Opasnye vliyaniya** (Rules for protecting wired devices... Part. 1. General provisions. Dangerous effects). Moscow, Leningrad, Energiya, 1966, 42 p.

[03.06.2019]