

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

Г.И. Кольниченко[✉], Я.В. Тарлаков, М.С. Усачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

g_kolnic@mail.ru

Приведено описание нового метода расчета электрических параметров систем электроснабжения, основу которого составляют универсальные формулы для определения собственных и взаимных сопротивлений. Эти формулы, полученные авторами в результате матричных преобразований системы узловых уравнений, дают возможность рассчитать искомые параметры электрических режимов точным методом в пределах нескольких циклов расчета. Повторение циклов продиктовано необходимостью учета нелинейности отдельных элементов систем электроснабжения (генераторов, нагрузок и др.). Предложенный метод снимает проблему сходимости итерационного процесса счета используемых ныне расчетных методов. Он дает быстрое и надежное получение решения задач расчета установившихся режимов систем электроснабжения и может быть использован в задачах исследования их переходных режимов. Это подтверждено практикой его применения в режимных расчетах систем электроснабжения лесного и агропромышленного комплекса, а также государственных энергосистем и систем электроснабжения оборонных объектов страны.

Ключевые слова: системы электроснабжения, метод электрического расчета, алгоритм и программа расчета, прямые и итерационные методы

Ссылка для цитирования: Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Алгоритмизация электрических расчетов систем электроснабжения предприятий лесного комплекса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 135–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-135-146

Расчеты установившихся режимов при создании, эксплуатации и развитии систем электроснабжения выполняются чаще других расчетов, поскольку они необходимы для определения допустимых и оптимальных режимов, проверки статической и динамической устойчивости, анализа надежности и др. [1–7].

Эффективность таких расчетов в значительной степени зависит от используемых расчетных методов. В настоящее время разработаны программы для ЭВМ, реализующие методы, которые обладают различными свойствами в зависимости от целей и видов расчета электрических систем и их режимов [8–19].

Сопоставление расчетных методов — не простая задача. Нельзя однозначно ответить на вопрос, какой метод лучше.

По построению процесса расчета методы могут быть следующих типов:

– прямые — в случае определения искомых величин в один шаг, например путем решения системы линейных уравнений;

– итерационные — в случае определения искомых величин за много шагов для постепенного уточнения получения результатов.

Накоплен достаточно большой опыт практических расчетов установившихся режимов на ЭВМ, который убедительно свидетельствует о наибольшей эффективности применения уравнений, записанных в виде нелинейных уравнений узловых напряжений. Эти уравнения описывают установившийся режим электрической системы при задании нелинейных источников тока. В схеме замещения электрической системы нелинейными источниками тока являются генераторы и нагрузки потребителей, токи которых нелинейно зависят от приложенного к ним напряжения.

Расчет установившегося режима сложной электроэнергетической системы сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений, которые решаются одним из итерационных методов. Недостатком таких методов является то, что сходимость итерационного процесса в некоторых известных и распространенных случаях может оказаться замедленной или вообще необеспеченной. Это касается прежде всего схем с высокой степенью неоднородности параметров, схем с продольной емкостной компенсацией, с трехобмоточными трансформаторами с очень малым сопротивлением средней обмотки, а также расчетов

электрических режимов, близких к предельным по соображениям статической устойчивости [20–26].

В связи с этим возникла необходимость разработать метод электрического расчета систем электроснабжения, отвечающего требованиям удобства реализации на ЭВМ и снимающего проблему сходимости итерационного процесса счета.

Цель работы

Цель работы — разработка метода расчета электрических параметров систем электроснабжения, на основе универсальных формул для определения собственных и взаимных сопротивлений.

Объекты и методы исследования

В Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан такой метод и на его основе созданы алгоритмы расчетов параметров установившегося режима систем электроснабжения предприятий лесного и агропромышленного комплексов страны [27].

Особенность метода заключается в применении точного метода расчета собственных и взаимных значений сопротивлений, используемых для определения искомых параметров установившихся режимов (токов, напряжений, мощностей) в пределах нескольких циклов расчета.

Повторение циклов расчета связано с необходимостью учета нелинейности проводимости генераторов и нагрузок, что достигается корректировкой их значений в зависимости от уровня напряжений (или токов), уточняющихся в каждом цикле расчета.

Систему уравнений узловых напряжений при направлении токов к узловым точкам можно записать в виде

$$\sum_{j=0}^l y_{ij}(\dot{U}_j - \dot{U}_i) + \sum_{J=1}^m y_{Ji}(\dot{E}_J - \dot{U}_i) + \sum_{\alpha=1}^S y_{i0(\alpha)}(-\dot{U}_i) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где n — число узлов в схеме;

i, j — номера узлов, принадлежащих ветви сети (или нескольким ветвям, включенным параллельно между этими узлами);

l — число ветвей сети, включенных в узел i ;

m — число генераторных ветвей, присоединенных к этому узлу;

S — число нагрузок, включенных в узел i ;

α — номера нагрузочных ветвей узла i .

Из полной матрицы коэффициентов системы уравнений (1) можно выделить квадратную симметричную матрицу коэффициентов при узловых напряжениях Y , порядок, который равен числу узлов n в схеме (см. выражение (11)).

Матричные преобразования системы уравнений (1) позволили получить универсальные выражения для расчета собственных и взаимных сопротивлений в виде:

$$Z_{JJ} = \frac{Z_{Ji}^2}{Z_{Ji} + Z_{ii}^*}; \quad (2)$$

$$Z_{JF} = \frac{Z_{Ji} Z_{Fj}}{Z_{ij}^*}; \quad (3)$$

$$Z_{i0;F} = \frac{Z_{i0} Z_{Fj}}{Z_{ij}^*}; \quad (3a)$$

$$Z_{ij;Pm} = \frac{Z_{ij} Z_{Pm}}{Z_{jm}^* - Z_{im}^*}. \quad (4)$$

где Z_{JJ} — собственное сопротивление J -й генераторной ветви, включенной в узел i ;

Z_{JF} — взаимное сопротивление между генераторными ветвями Ji и Fj ;

$Z_{i0;F}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью Fj и нагрузочной ветвью $i0$;

$Z_{ij;Pm}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью Pm и ветвью ij ;

$Z_{Ji}, Z_{Fj}, Z_{Pm}, Z_{i0}, Z_{ij}$ — сопротивления ветвей электрической системы, относительно которых определяются собственные и взаимные сопротивления;

$Z_{ii}^*, Z_{ij}^*, Z_{im}^*, Z_{jm}^*$ — соответствующие элементы обращенной матрицы узловых проводимостей $Y^{-1} = Z^*$, содержащие в индексах номера узлов, в которые включены рассматриваемые ветви;

J, F, P — номера генераторов электрической системы;

i, j, m — номера узлов сети, к которым присоединены генераторы, нагрузки и ветви сети [28];

индекс «*» отличает элементы обращенной матрицы $Y^{-1} = Z^*$ от сопротивлений схемы;

Y — неособенная матрица, т. е. ее определитель не равен нулю (это положение известно, начиная с Кирхгофа [29–35]).

Для всякой неособенной матрицы существует обратная матрица. Другими словами, невырожденность матрицы Y означает, что всегда

существует матрица $Y^{-1} = Z^*$ и, следовательно, выражения (2) — (4) универсальны, т. е. они пригодны для расчета собственных и взаимных сопротивлений в электрических системах постоянного и переменного тока любой конфигурации и принципиально любой сложности.

Собственные и взаимные сопротивления, определяемые по формулам (2) — (4), позволяют рассчитывать параметры режимов электрических систем. Принципиальная блок-схема алгоритма электрического расчета систем электроснабжения представлена на рис. 1.

В качестве исходных (см. рис. 1, блок 1) для расчетов установившихся режимов должны быть заданы следующие данные:

- сопротивления и проводимости линий электропередачи (ЛЭП), генераторных ветвей, трансформаторов и других продольных элементов электрической системы;

- проводимости и сопротивления нагрузочных ветвей;

- другие проводимости на землю (емкостные проводимости высоковольтных ЛЭП, реакторов и т. д.);

- информация о топологической схеме (схеме соединения) системы электроснабжения (например, таковой является информация в виде номеров узлов, к которым присоединены ветви).

Параметры всех элементов расчетной схемы должны быть выражены в именованных единицах, т. е. все сопротивления схемы выражаются в омах. Как известно, сопротивления различных элементов расчетной схемы задают в разных единицах измерения. Для их определения в именованных единицах в электроэнергетической литературе даны соответствующие формулы, с помощью которых все сопротивления расчетной схемы не только выражены в омах, но и приводятся к одному и тому же базисному напряжению, т. е. к среднему напряжению одной и той же электрической ступени [1].

Приведение сопротивления, выраженного в омах, к выбранному базисному напряжению, выполняют по формуле

$$z' = (k_1 \cdot k_2 \dots k_n)^2 z, \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_n — коэффициенты трансформации трансформаторов, через которые сопротивление z связано со ступенью базисного напряжения; коэффициенты трансформации определяют в направлении от выбранной базисной ступени к той ступени, на которой включено рассматриваемое сопротивление. Если в целях упрощения для каждой электрической ступени принять определенное среднее напряжение, то коэффициенты трансформации, используемые для приведения

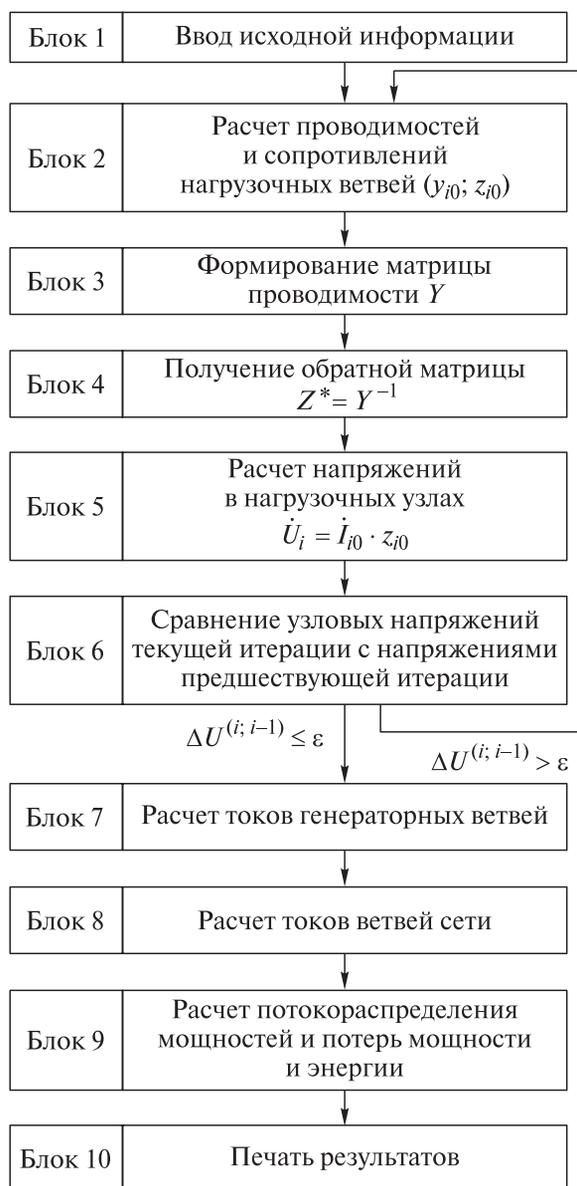


Рис. 1. Принципиальная блок-схема программы электрического расчета систем электроснабжения

Fig. 1. Principal block diagram of the electrical calculation programme for power supply systems

сопротивлений, представляют собой отношения средних напряжений двух ступеней. В связи с тем, что для каждой ступени принято среднее напряжение, промежуточные коэффициенты трансформации сокращаются, и пересчет сопротивлений можно вести по формуле

$$z' = z \frac{U_{\delta}^2}{U_{cp}^2}, \quad (6)$$

где z — сопротивление элемента, заданное при среднем напряжении U_{cp} ступени, на которой включен данный элемент, Ом;
 z' — сопротивление, приведенное к принятому базисному напряжению U_{δ} , Ом.

Нагрузки можно задавать либо мощностями (или токами) или статическими характеристиками, отражающими нелинейные зависимости мощностей нагрузок от приложенного напряжения, что необходимо для представления нагрузки в виде сопротивления (проводимости) на любом этапе расчета (см. рис. 1, блок 2).

Сопротивления z (проводимости $y = 1/z$) нагрузки в цепях однофазного и трехфазного тока рассчитываются по величине мощности, напряжения или тока по формулам:

– для однофазных цепей при известном (заданном) напряжении

$$z = \frac{|U|^2}{\hat{S}}; \quad (7)$$

или при известном (заданном) токе

$$z = \frac{\hat{S}}{|I|^2}; \quad (8)$$

– для трехфазных цепей при известном (заданном) напряжении

$$z = \sqrt{3} \frac{|U|^2}{\hat{S}}; \quad (9)$$

или при известном (заданном) токе

$$z = \sqrt{3} \frac{\hat{S}}{|I|^2}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) S — трехфазная мощность; U и I — линейные напряжение и сила тока соответственно.

По приведенным значениям сопротивлений вычисляются проводимости, которые входят в состав элементов матрицы Y (см. рис. 1, блок 3), исходя из того, что диагональные элементы ($-y_{ii}$) матрицы Y — это полные узловые проводимости (т. е. сумма проводимостей всех ветвей, подключенных к узлу i) с обратным знаком.

Недиагональными элементами матрицы $y_{ij} = 1/z_{ij}$ являются проводимости ветвей, соединяющих узлы i и j . Если узлы i и j не принадлежат одной ветви, то $y_{ij} = 0$. Примечательным свойством матрицы Y является большое количество нулевых элементов. Объясняется это тем, что в реальных схемах электрических систем каждый узел связан лишь с небольшим количеством соседних узлов. А если узлы не соединены ветвью между собой, то и проводимость на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы Y равна нулю.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена схема реальной электрической сети, в которой нагрузки получают электроэнергию от двух источников (А и Б), на шинах которых с помощью силовых трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой поддерживается постоянство напряжений $\dot{U}_I = 115$ кВ и $\dot{U}_{II} = 39 \angle 3^\circ$ кВ. Линии электропередачи W_1 и W_2 связывают источники I и II с подстанциями 10 кВ в узлах 3, 4, 6 через трехфазный трехобмоточный силовой трансформатор мощностью 63 000 кВ, 1А (63 МВ, 1А) с номинальными напряжениями обмоток 115/38,5/11 кВ. Протяженности ЛЭП и марки проводов указаны на схеме (см. рис. 2).

На рис. 3 приведена расчетная схема замещения, параметры которой приведены к ступени 11 кВ и представлены к расчету в именованных единицах.

В качестве примера рассчитаем значение приведенного сопротивления линии электропередачи W_1 (ЛЭП — 11 кВ) с удельным сопротивлением $z_0 = 0,13 + j0,44$ Ом/км и протяженностью $l = 80$ км:

$$z_{15} = z_0 1/K_{н.н., в.н.}^2 = (0,13 + j0,44) 18010,0956^2 = 0,095 + j0,322 \text{ Ом},$$

где $K_{н.н., в.н.} = \frac{U_{н.н.}}{U_{в.н.}} = \frac{11}{115} = 0,0956$ — коэффициент

трансформации между обмоткой соответственно низшего (н.н) и высшего (в.н) напряжения.

Аналогично рассчитаны сопротивления (z) и проводимости ($y = 1/z$) остальных элементов электрической системы (см. рис. 3), с помощью которых и формируется матрица Y коэффициентов при узловых напряжениях.

Матрица Y имеет порядок, равный числу узлов сети $n = 6$ (см. рис. 3)

$$Y = \begin{pmatrix} -y_{11} & y_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{21} & -y_{22} & y_{23} & 0 & y_{25} & 0 \\ 0 & y_{32} & -y_{33} & y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{43} & -y_{44} & 0 & y_{46} \\ 0 & y_{52} & 0 & 0 & -y_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{64} & 0 & -y_{66} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Как отмечено выше, матрица Y всегда симметричная, так как $y_{ij} = y_{ji}$ (т. е. $y_{12} = y_{21}$, $y_{23} = y_{32}$ и т. д.), в ней i и j — номера узлов сети (т. е. номера строк и столбцов).

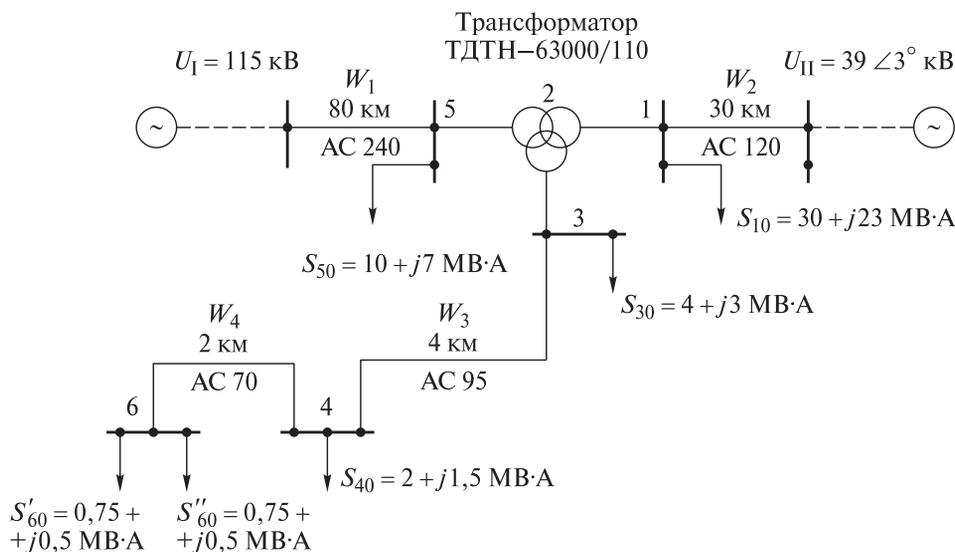


Рис. 2. Схема электрической сети: линии электропередачи, кВт: W_1 — 110; W_2 — 35; W_3 , W_4 — 10
Fig. 2. Scheme of the electric network: power lines, kW: W_1 — 110; W_2 — 35; W_3 , W_4 — 10

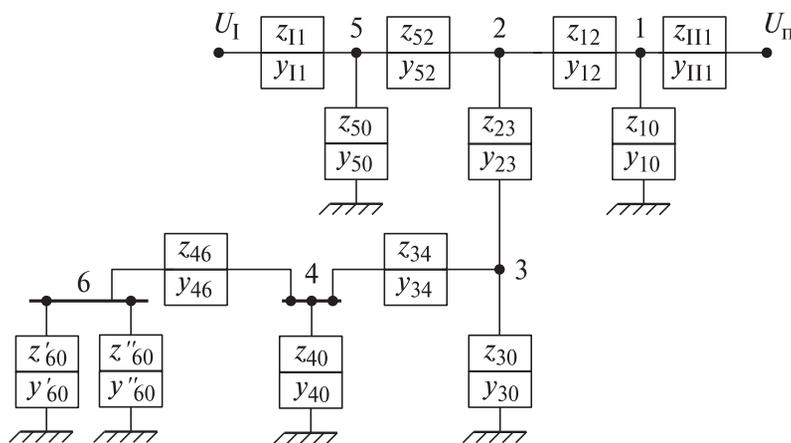


Рис. 3. Расчетная схема замещения электрической сети
Fig. 3. Calculated equivalent electric circuit model

Диагональные элементы рассчитываются как обратная по знаку сумма проводимостей ветвей, сходящихся в узле. Например, $-y_{11} = -(y_{12} + y_{11} + y_{10})$; $-y_{22} = -(y_{21} + y_{23} + y_{25})$; $-y_{33} = -(y_{30} + y_{32} + y_{34})$ и т. д.

Нужные проводимости ветвей для вычисления диагонального элемента извлекаются из массива проводимостей исходной информации по номеру узла, к которому эти ветви подключены.

После обращения матрицы Y получается матрица $Z^* = Y^{-1}$, которая также обладает свойством симметрии, однако без нулевых элементов. С ее помощью рассчитываются собственные и вза-

имные сопротивления по формулам (2) — (4). Каждое из этих сопротивлений является коэффициентом пропорциональности между напряжением источника и составляющей тока, которую источник поставляет в ветви сети.

Полный ток каждой ветви схемы равен сумме составляющих от действия каждого источника, т. е. количество составляющих тока равно количеству источников электроэнергии (генераторов). По схеме на рис. 2 ток каждой ветви имеет две составляющие ($I_{I; ij} + I_{II; ij}$) соответственно от источников с напряжением U_I и U_{II} . При их вычислении программа обращается к формулам (2) — (4) в зависимости от вида

Т а б л и ц а 1

Численные значения элементов матрицы Y Numerical values of Y matrix elements

Номер столбца	Номер строки					
	1	2	3	4	5	6
1	$-217,96 + j0,834$	217,39	0	0	0	0
2	217,39	$-217,8 + j13,05$	$0,299 - j8,05$	0	$0,115 - j4,997$	0
3	0	$0,299 - j8,05$	$-0,67 + j8,473$	$0,351 - j0,26$	0	0
4	0	0	$0,351 - j0,26$	$-1,062 + j0,788$	0	$0,701 - j0,52$
5	0	$0,115 - j4,997$	0	0	$-1,01 + j7,89$	0
6	0	0	0	$0,701 - j0,52$	0	$-0,709 + j0,525$

Т а б л и ц а 2

Численные значения элементов матрицы $Z^* = Y^{-1}$ Numerical values of matrix elements $Z^* = Y^{-1}$

Номер столбца	Номер строки					
	1	2	3	4	5	6
1	$-0,108507$ $-j0,311646$	$-0,105388$ $-j0,31205$	$-0,104329$ $-j0,305067$	$-0,0993661$ $-j0,290416$	$-0,0862661$ $-j0,188109$	$-0,0984642$ $-j0,287283$
2	$-0,105388$ $-j0,31205$	$-0,106862$ $-j0,312466$	$-0,105774$ $-j0,305469$	$-0,100741$ $-j0,290799$	$-0,0872144$ $-j0,188273$	$-0,099825$ $-j0,287661$
3	$-0,104329$ $-j0,305067$	$-0,105774$ $-j0,305469$	$-0,109649$ $-j0,419988$	$-0,104446$ $-j0,399824$	$-0,0860769$ $-j0,183972$	$-0,103548$ $-j0,395528$
4	$-0,0993661$ $-j0,290416$	$-0,100741$ $-j0,290799$	$-0,104446$ $-j0,399824$	$-1,8514$ $-j1,67893$	$-0,08197$ $-j0,175134$	$-1,83264$ $-j1,66015$
5	$-0,0862661$ $-j0,188109$	$-0,0872144$ $-j0,188273$	$-0,0860769$ $-j0,183972$	$-0,0819727$ $-j0,175134$	$-0,08277$ $-j0,23663$	$-0,0811949$ $-j0,173233$
6	$-0,0984642$ $-j0,287283$	$-0,099825$ $-j0,287661$	$-0,103548$ $-j0,395528$	$-1,83264$ $-j1,66015$	$-0,081195$ $-j0,173233$	$-2,72467$ $-j2,31586$

ветви (генераторной, нагрузочной, ветви сети между двумя узлами), формируя поиск нужных параметров в массивах исходной информации и в матрице Y и $Z^* = Y^{-1}$.

Для схемы на рис. 3 численные значения элементов матриц Y и Z^* приведены в табл. 1 и табл. 2.

Процесс формирования расчетных выражений иллюстрируется примером.

Пример:

А. Расчет тока в генераторной ветви I5

$$\dot{I}_{I5} = \dot{I}_{I,15} + \dot{I}_{II,15} = \frac{\dot{U}_I}{Z_{I5,15}} + \frac{\dot{U}_{II}}{Z_{II,15}},$$

где $Z_{I5,15}$ — собственное сопротивление, определяющее величину тока, поставляемого генератором I в ветвь I5;

$Z_{II,15}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью II и ветвью I5, т. е. определяющее величину тока $\dot{I}_{II,15}$.

Для расчета величины $Z_{I5,15}$ используется формула (2), т. е. в нашем случае

$$Z_{I5,15} = \frac{Z_{I5}^2}{Z_{I5} + Z_{55}^*},$$

а для расчета $Z_{II,15}$ служит формула (3)

$$Z_{II,15} = \frac{Z_{II} Z_{I5}}{Z_{I5}^*}.$$

Б. Расчет тока в нагрузочной ветви 3-го узла

$$\dot{I}_{30} = \dot{I}_{I,30} + \dot{I}_{II,30} = \frac{\dot{U}_I}{Z_{I5,30}} + \frac{\dot{U}_{II}}{Z_{II,30}},$$

где $Z_{I5,30}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью I5 и нагрузочной ветвью 3-го узла;

$Z_{II,30}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью II и нагрузочной ветвью 3-го узла.

Согласно формуле (3а) математические выражения для расчета этих сопротивлений будут иметь вид:

Результаты расчета узловых напряжений (В) итераций 1–4

Calculation results of iterations 1-4 nodal voltages (В)

Номер итерации	Напряжение				
	U_1	U_3	U_4	U_5	U_6
1	33761,15	9453,24	8999,71	105464,4	8904,24
2	34770,77	9900,27	9249,09	107107,7	9112,26
3	34961,26	9957,5	9332,98	107508,4	9201,05
4	34993,7	9967,28	9352,9	107573,2	9223,2

$$Z_{15;30} = \frac{Z_{15}Z_{30}}{Z_{53}^*};$$

$$Z_{III;30} = \frac{Z_{III}Z_{30}}{Z_{13}^*}.$$

В числители этих выражений вошли сопротивления из массива исходных данных, в знаменатели — элементы матрицы $Y^{-1} = Z^*$.

В. Расчет тока в ветви сети между узлами 3 и 4

$$\dot{I}_{34} = \dot{I}_{I;34} + \dot{I}_{II;34} = \frac{\dot{U}_I}{Z_{15;34}} + \frac{\dot{U}_{II}}{Z_{III;34}},$$

где $Z_{15;34}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью I5 и ветвью сети 3–4;

$Z_{III;34}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью II2 и ветвью сети 3–4.

Для расчета взаимных сопротивлений $Z_{15;34}$ и $Z_{III;34}$ используем формулу (4):

$$Z_{15;34} = \frac{Z_{15}Z_{34}}{Z_{54}^* - Z_{53}^*};$$

$$Z_{III;34} = \frac{Z_{III}Z_{34}}{Z_{14}^* - Z_{13}^*}.$$

Все необходимые для расчетов сопротивления извлекаются из массивов исходной информации и матриц Y и Z^* с помощью номеров узлов, в которые включены эти сопротивления.

Вычисленные токи ветвей и известные их сопротивления (см. рис. 3) позволяют рассчитать напряжения в узлах схемы (см. рис. 1, блок 5).

После завершения первого цикла расчета полученные напряжения сравниваются с теми напряжениями, которые были заданы в начале расчета и на основе которых были рассчитаны значения проводимостей нагрузок. Если различие напряжений в любом узле превышает допустимое значение, то управление переда-

ется блоку 2 (см. рис. 1), т. е. начинается повторный цикл расчета, в ходе которого заново рассчитываются проводимости, зависящие от напряжений.

Таким образом, напряжения в конце каждого цикла сопоставляются с напряжениями предыдущего цикла до тех пор, пока их различие не станет меньше заданного расчетчиком значения. Когда выполнится это условие, повторение цикла отменяется и уравнение передается блоку 7 (см. рис. 1) для определения всех остальных параметров режима системы электроснабжения, включающих в себя (помимо токов и напряжений) распределение потоков и потерь мощности и электроэнергии во всех элементах системы.

Для электрической сети на рис. 2 при заданном значении $\varepsilon = 1\%$ требуется три итерации (табл. 3) и менее 0,5 с времени, что также подтверждает эффективность предлагаемого метода, который представляет собой применение точного метода с коррекцией для определения неизвестных параметров нелинейной системы уравнений узловых напряжений.

Результаты расчета режима электрической сети (см. рис. 1, см. табл. 3), свидетельствуют о том, что напряжения узлов 4 и 6 примерно на 15% меньше номинальных значений, что требует проведения соответствующих технических мероприятий для их повышения до приемлемых значений.

Главное преимущество предлагаемого метода состоит в надежном и быстром получении результата. Недостатком его является необходимость определять и, главное, запоминать матрицу $Z^* = Y^{-1}$, в которой нет нулевых элементов (см. табл. 2).

Применение этого метода для расчетов режимов электрических систем с огромным количеством узлов невозможно без специальных методов эквивалентирования, так как требует использования ЭВМ с большой памятью. Но таковыми являются крупные электроэнергетические системы большой энергетики. Системы

электроснабжения предприятий лесного и агропромышленного комплексов характеризуются во много раз меньшими объемами узлов и ветвей. В связи с этим возможностей существующих ПЭВМ вполне достаточно для их расчета и анализа.

Выводы

Получены универсальные формулы расчета собственных и взаимных сопротивлений в электрических системах любой конфигурации, в связи с чем предлагаемый метод является точным методом с коррекцией. Коррекция необходима в каждом цикле расчета с целью учета нелинейности отдельных параметров электрической системы.

Предложенный метод обеспечивает быстрое и более надежное получение результатов расчета по сравнению с известными и распространенными в электроэнергетике итерационными методами с их нерешенной проблемой сходимости итерационного процесса счета.

Алгоритмы, реализующие метод, имеют несомненную перспективу использования в различных задачах анализа как установившихся, так и переходных процессов, что подтверждено практикой их применения для электрического расчета систем электроснабжения лесного и агропромышленного комплексов, а также режимных параметров государственных энергосистем и систем электроснабжения оборонных объектов страны.

Список литературы

- [1] Веников В.А., Зуев Э.Н., Строев В.А. Электрические системы. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
- [2] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Альянс, 2009. 592 с.
- [3] Илюшин П.В., Тьквинский А.М. Особенности обеспечения надежного электроснабжения промышленных потребителей в изолированных энергосистемах // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2019. Т. 11. № 1 (41). С. 39–50.
- [4] Аюев Б.И. Жуков А.В. Новые подходы к мониторингу запаса устойчивости электроэнергетических систем // Энергосистема: управление, конкуренция образование: Сб. докладов III Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 13–16 октября 2008. В 2 т. Екатеринбург: Изд-во УГТИ–УПИ, 2008. Т. 1. 453 с.
- [5] Seyfullin A.Y., Vinogradov A.V., Dorokhov A.S., Vinogradova A.V. Selection and Justification of the Structure of the Basic Data of Monitoring Systems of Electrical Modes of the Rural Electrical Grids and the Principles of Their Processing // 2021 3rd Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 10–12 November 2021. Lipetsk, 2021. pp. 1195–1200. DOI:10.1109/SUMMA53307.2021.9632027
- [6] Dmitriev S.A., Khalyasmaa A.I., Semerikov A.S., “Functional state assessment of the power supply system based on system operation parameters”, Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, Saint Petersburg, 25–27 May 2016, Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016, pp. 141–144.
- [7] Гурьев В.В., Кувшинов В.В., Якимович Б.А. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. Т. 25. № 1. С. 108–117.
- [8] Туфанов В.А., Федченко В.Г., Архипцев Ю.Ф. Применение вычислительных методов в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
- [9] Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н., Шабовта М.Ю., Соколов Я.А., Тищенко И.И. Уменьшение технологических потерь электроэнергии в городских распределительных сетях напряжением 10 кВ путем оптимизации мест размыкания контуров // Электротехнические и компьютерные системы, 2016. № 21(97). С. 70–75.
- [10] Shu J., Quan S.S., Zhang L.Z. Optimal operation of distribution power system including distributed generator // International Conference on Power System Technology. Zhejiang: IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [11] Гительман Л.Д., Добродей В.В., Кожевников М.В. Инструменты устойчивого развития региональной энергетики // Экономика региона, 2020. Т. 16. Вып. 4. С. 1208–1223.
- [12] Трубицин М.А., Микаэльян Е.Ю. К вопросу расчета установившихся режимов электроэнергетических систем // Инженерный вестник Дона, 2020. № 9(69). С. 49–55.
- [13] Бадалян Н.П. Моделирование и расчет установившихся режимов электрических сетей // Вестник научных конференций, 2020. № 2–3(54). С. 14–18.
- [14] Гуревич Ю.Е. Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. М.: Элекс-КМ, 2008. 248 с.
- [15] Арестова А.Ю., Лыкин А.В., Сидоркин Ю.М., Фролова Я.А. Электрические системы и сети. Установившиеся режимы электрических сетей. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. 98 с.
- [16] Акишин Л.А. Математические задачи электроэнергетики. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2010. 100 с.
- [17] Listopad S. Architecture of the hybrid intelligent multi-Agent system of heterogeneous thinking for planning of distribution grid restoration // Baltic J. of Modern Computing, 2019, v. 7, no. 4, pp. 487–499.
- [18] Rezaeva M.A. Semendyaev R.Y. Development and application of convolutional neural network for the recognition of objects in the scheme of electric grid // J. of Physics: Conf. Ser., Vladivostok, 07–08 October 2021. Vladivostok, 2021, pp. 012–020.

- [19] Медов Р.В. Развитие методов и программного обеспечения исследований несимметричных режимов электроэнергетических систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Санкт-Петербург. С.-Петербург. гос. техн. ун-т, 2002, 18 с.
- [20] Семенюк Н.В. Влияние неоднородности электрической сети на оптимальность параметров электроэнергетического режима // Энергетические установки и технологии, 2020, Т. 6, № 4, С. 61–66.
- [21] Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М. Разработка базы данных электрооборудования 35–220 кВ для САПР «ОРУ САД» // Электротехнические системы и комплексы, 2018, № 2(39), С. 28–30.
- [22] Васильев П.А. Совершенствование методов и алгоритмов расчета и анализа установившихся режимов электрических сетей энергосистем: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2006. 123 с.
- [23] Алтухова М.К. Повышение эффективности численного решения уравнений предельных установившихся режимов и идентификации чувствительных элементов в электроэнергетической системе // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2019, № 2(81), С. 77–83.
- [24] Крюков А.В. Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2012. 236 с.
- [25] Marujo D., Zanatta G.L., Floréz H.A.R. Optimal management of electrical power systems for losses reduction in the presence of active distribution networks // Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), 2021, v. 103, no. 3, pp. 1725–1736.
- [26] Marković N.A., Bjelić S.N., Marković F.N. Diagnostics Algorithms for Analysis and Assessment of Steady States and Disorders in Electrical Networks // International J. of Image, Graphics and Signal Processing, 2022, v. 14, iss. 4, pp. 1–12.
- [27] Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Сиротов А.В., Усачев М.С. Основы электротехники и электроснабжения предприятий лесного комплекса. Основы электроснабжения. СПб.: Лань, 2022. 252 с.
- [28] Кольниченко Г.И. К прямому методу расчета режимов электрических систем с помощью ЦВМ // Известия вузов. Энергетика, 1973, № 2, С. 3–7.
- [29] Идельчик В.И. Пример анализа существования и единственности уравнений установившегося режима // Электричество, 1983, № 6, С. 56–59.
- [30] Тесленко Е.А., Екимова М.Ю. Математическое описание состояний изучаемых объектов и процессов измерений анализируемых физических систем // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023, Т. 27, № 6. DOI 10.18698/2542-1468-2023-6-178-188.
- [31] Идельчик В.И., Ярош В.А. Анализ результатов исследования существования и единственности решения уравнений установившегося режима // Advances in Science and Technology: сб. статей IX Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 31 июля 2017 года. М.: Актуальность. РФ, 2017. С. 79–80.
- [32] Сафарян В.С., Сафарян Л.В. Аналитическое исследование установившегося режима двухузловой сети // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика, 2018, № 1, С. 64–72.
- [33] Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В. Сложнозамкнутые системы электроснабжения и расчет их электрических режимов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК, 2022, Т. 69, № 4(49), С. 131–136.
- [34] Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. Investigation of Existence of Steady States of a Solar Power Plant Operating in the Distribution Network of an Electric Power System // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, v. 25, no. 2, pp. 89–96.
- [35] Соснина Е.Н., Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В. Исследование установившихся режимов работы распределительной электрической сети с тиристорным регулятором напряжения // Промышленная энергетика, 2021, № 12, С. 2–15.
- [36] Marujo D., Zambroni De Souza A.C., Lopes B.I.L., Oliveira D.Q. Active Distribution Networks Implications on Transmission System Stability // J. of Control, Automation and Electrical Systems, 2019, v. 30, no. 3, pp. 380–390.

Сведения об авторах

Кольниченко Георгий Иванович [✉] — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), g_kolnic@mail.ru

Тарлаков Яков Викторович — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), tarlakov@mgul.ac.ru

Усачев Максим Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), usachev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 01.07.2024.

Одобрено после рецензирования 18.12.2024.

Принята к публикации 20.02.2025.

CONSTRUCTING ALGORITHM OF ELECTRICAL COMPUTATIONS FOR ELECTRICAL POWER SUPPLY OF FORESTRY ENTERPRISES

G.I. Kol'nichenko✉, Y.V. Tarlakov, M.S. Usachev

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

g_kolnic@mail.ru

Designing, operation and development of electrical power supply systems is impossible without multiple computations of its steady-state modes. Such computations give necessary information while identifying allowable and optimal operation modes of power supply systems as well as while checking its static and dynamic stability, analyzing its reliability. Nowadays computation of a complex electrical power system steady-state mode is reduced to solving systems of nonlinear equations by one of iterative methods. The drawback of such methods is that iteration convergence is often lowered or even uncovered. Due to this fact a new electrical computation method has been developed in Mytishchi branch of BMSTU which allows to get results by several repeated computation cycles necessary to consider nonlinearity of electrical power supply system elements (generators, loads etc). Within each cycle computation is made based on universal formulae obtained as a result of a direct computation method of intrinsic and mutual resistance. This method provides higher speed and reliability of getting results. A disadvantage of this method is the necessity to identify and remember inverse matrix elements of node voltage equation coefficients in which there are no null elements. However, while computing power supply systems of forest complex which has lower scale than electrical systems of large energetics this drawback can be considered insignificant. In authors' view the method given can be successfully used while researching time-independent and transient processes which is proved by using it in computing electrical power supply systems in various industries of our country.

Keywords: electrical power supply systems, electrical computation method, computation algorithm and program, direct and iterative methods

Suggested citation: Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Usachev M.S. *Algoritmizatsiya elektricheskikh raschetov sistem elektrosnabzheniya predpriyatiy lesnogo kompleksa* [Constructing algorithm of electrical computations for electrical power supply of forestry enterprises]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 135–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-135-146

References

- [1] Venikov V.A., Zuev E.N., Stroev V.A. *Elektricheskie sistemy* [Electrical systems]. Elektricheskie seti [Electrical networks]. Moscow: Al'yans [Higher School], 1998, 511 p.
- [2] Idel'chik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Alliance, 2009, 592 p.
- [3] Ilyushin P.V., Tykvinskiy A.M. *Osobennosti obespecheniya nadezhnogo elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebitелей v izolirovannykh energosistemakh* [Features of ensuring reliable power supply to industrial consumers in isolated power systems]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan State Power Engineering University], 2019, v. 11, no. 1 (41), pp. 39–50.
- [4] Ayuev B.I. Zhukov A.V. *Novye podkhody k monitoringu zapasa ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem* [New approaches to monitoring the stability margin of electric power systems]. *Energosistema: upravlenie, konkurentsia obrazovanie: sb. dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Power system: management, competition, education: collection of scientific papers. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference], Ekaterinburg, October 13–16, 2008. In 2 volumes. Ekaterinburg: UGTI-UPI, 2008, v. 1, 453 p.
- [7] Gur'ev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. *Issledovanie ustanovivshikhsya rezhimov solnechnoy elektrostantsii, rabotayushchey v raspredelitel'noy seti elektroenergeticheskoy sistemy* [Study of steady-state modes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov], 2022, v. 25, no. 1, pp. 108–117.
- [8] Tufanov V.A., Fedchenko V.G., Arkhiptsev Yu.F. *Primenenie vychislitel'nykh metodov v energetike* [Application of computational methods in power engineering]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 136 p.
- [9] Besarab A.N., Nevol'nichenko V.N., Shabovta M.Yu., Sokolov Ya.A., Tishchenko I.I. *Umen'shenie tekhnologicheskikh poter' elektroenergii v gorodskikh raspredelitel'nykh setyakh napryazheniem 10 (6) kV putem optimizatsii mest razmykaniya konturov* [Reduction of technological losses of electric power in urban distribution networks with a voltage of 10 (6) kV by optimizing the places of circuit opening]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy* [Electrical and computer systems], 2016, no. 21 (97), pp. 70–75.
- [11] Gitel'man L.D., Dobrodey V.V., Kozhevnikov M.V. *Instrumenty ustoychivogo razvitiya regional'noy energetiki* [Instruments for sustainable development of regional energy]. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], 2020, v. 16, iss. 4, pp. 1208–1223.
- [12] Trubitsin M.A., Mikael'yan E.Yu. *K voprosu rascheta ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [On the issue of calculating steady-state modes of electric power systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2020, no. 9 (69), pp. 49–55.

- [13] Badalyan N.P. *Modelirovanie i raschet ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey* [Modeling and calculation of steady-state modes of electrical networks]. *Vestnik nauchnykh konferentsiy* [Bulletin of scientific conferences], 2020, no. 2–3(54), pp. 14–18.
- [14] Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh ustoychivosti energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley* [Application of mathematical models of electrical load in calculating the stability of power systems and the reliability of power supply to industrial consumers]. Moscow: Eleks-KM, 2008, 248 p.
- [15] Arestova A.Yu., Lykin A.V., Sidorkin Yu.M., Frolova Ya.A. *Elektricheskie sistemy i seti. Ustanovivshiesya rezhimy elektricheskikh setey* [Electrical systems and networks. Steady-state modes of electrical networks]. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy universitet [Novosibirsk State Technical University], 2020, 98 p.
- [16] Akishin L.A. *Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Mathematical problems of electric power engineering]. Irkutsk: Publishing house of IrSTU, 2010, 100 p.
- [19] Medov R.V. *Razvitie metodov i programmnogo obespecheniya issledovaniy nesimmetrichnykh rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Development of methods and software for studying asymmetric modes of electric power systems: author's abstract]. Diss. Cand. Sci. (Tech.) 05.14.02. St. Petersburg, St. Petersburg State Tech. University, 2002, 18 p.
- [20] Semenyuk N.V. *Vliyaniye neodnorodnosti elektricheskoy seti na optimal'nost' parametrov elektroenergeticheskogo rezhima* [Influence of electrical network heterogeneity on the optimality of electric power mode parameters]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Power Installations and Technologies], 2020, v. 6, no. 4, pp. 61–66.
- [21] Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. *Razrabotka bazy dannykh elektrooborudovaniya 35–220 kV dlya SAPR «ORU CAD»* [Development of a 35–220 kV electrical equipment database for the ORU CAD system]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Engineering Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 28–30.
- [22] Vasil'ev P.A. *Sovershenstvovanie metodov i algoritmov rascheta i analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey energosistem* [Improving the methods and algorithms for calculating and analyzing the steady-state modes of electrical networks of power systems]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Novocheerkassk, 2006, 123 p.
- [23] Altukhova M.K. *Povyshenie effektivnosti chislennogo resheniya uravneniy predel'nykh ustanovivshikhsya rezhimov i identifikatsii chuvstvitel'nykh elementov v elektroenergeticheskoy sisteme* [Improving the efficiency of numerical solutions of equations of limit steady-state modes and identification of sensitive elements in the electric power system]. *Izvestiya NTTs Edinoy energeticheskoy sistemy* [Bulletin of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System], 2019, no. 2(81), pp. 77–83.
- [24] Kryukov A.V. *Predel'nye rezhimy elektroenergeticheskikh sistem* [Limit modes of electric power systems]. Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya [Irkutsk State University of Transport], 2012, 236 p.
- [27] Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Sirotoy A.V., Usachev M.S. *Osnovy elektrotekhniki i elektrosnabzheniya predpriyatiy lesnogo kompleksa. Osnovy elektrosnabzheniya* [Fundamentals of electrical engineering and power supply of forestry enterprises]. St. Petersburg: Lan', 2022, 252 p.
- [28] Kol'nichenko G.I. *K pryamomu metodu rascheta rezhimov elektricheskikh sistem s pomoshch'yu TsVM* [On a Direct Method for Calculating Electrical System Modes Using a Digital Computer]. *Izvestiya vuzov. Energetika* [News of Universities. Power Engineering], 1973, no. 2, pp. 3–7.
- [29] Idel'chik V.I. *Primer analiza sushchestvovaniya i edinstvennosti uravneniy ustanovivshegosya rezhima* [An Example of Analysis of the Existence and Uniqueness of Steady-State Equations]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1983, no. 6, pp. 56–59.
- [30] Teslenko E.A., Ekimova M.Yu. *Matematicheskoe opisanie sostoyaniy izuchaemykh ob'ektov i protsessov izmereniy analiziruemyykh fizicheskikh sistem* [Mathematical description of studied objects states and measurement processes of analyzed physical systems]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 178–188. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-178-188
- [31] Idel'chik V.I., Yarosh V.A. *Analiz rezul'tatov issledovaniya sushchestvovaniya i edinstvennosti resheniya uravneniy ustanovivshegosya rezhima* [Analysis of the Results of a Study of the Existence and Uniqueness of a Solution to Steady-State Equations]. *Advances in Science and Technology: sb. statey IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Advances in Science and Technology: Collection of Articles from the IX International Scientific and Practical Conference], Moscow, July 31, 2017. Moscow: Aktualnost.RF, 2017, pp. 79–80.
- [32] Safaryan V.S., Safaryan L.V. *Analiticheskoe issledovanie ustanovivshegosya rezhima dvukhuzlovoy seti* [Analytical study of the steady-state mode of a two-node network]. *Vestnik Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Elektrotekhnika, energetika* [Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical engineering, power engineering], 2018, no. 1, pp. 64–72.
- [33] Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V. *Slozhnozamknutyie sistemy elektrosnabzheniya i raschet ikh elektricheskikh rezhimov* [Complex closed-loop power supply systems and calculation of their electrical modes]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK* [Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex], 2022, v. 69, no. 4(49), pp. 131–136.
- [34] Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. *Investigation of Existence of Steady States of a Solar Power Plant Operating in the Distribution Network of an Electric Power System*. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, v. 25, no. 2, pp. 89–96.
- [35] Sosnina E.N., Kralin A.A., Asabin A.A., Kryukov E.V. *Issledovanie ustanovivshikhsya rezhimov raboty raspredelitel'noy elektricheskoy seti s tiristornym regulyatorom napryazheniya* [Study of steady-state operating modes of a distribution electric network with a thyristor voltage regulator]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2021, no. 12, pp. 2–15.
- [36] Marujo D., Zambroni De Souza A.C., Lopes B.I.L., Oliveira D.Q. *Active Distribution Networks Implications on Transmission System Stability*. *J. of Control, Automation and Electrical Systems*, 2019, v. 30, no. 3, pp. 380–390.

Authors' information

Kol'nichenko Georgiy Ivanovich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),
g_kolnic@mail.ru

Tarlakov Yakov Viktorovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi
branch), tarlakov@mgul.ac.ru

Usachev Maksim Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi
branch), usachev@mgul.ac.ru

Received 01.07.2024.

Approved after review 18.12.2024.

Accepted for publication 20.02.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest