

РАСЧЁТ ЦЕПИ ФАЗА – НУЛЕВОЙ ПРОВОД СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,38 кВ

Павел Олегович Гуков

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Расчёт электрической сети 0,38 кВ относится к категории самых сложных задач по определению параметров режимов сетей. Сельские электрические сети 0,38 кВ представляют собой совокупность линий с односторонним питанием. При составлении схем замещения таких линий необходимо учитывать разветвлённый характер и наличие неполнофазных участков, к которым относятся двухфазные и однофазные ответвления. Ещё одной отличительной особенностью рассматриваемых сетей является несимметрия нормальных режимов из-за разной нагрузки фаз. Поэтому в расчёте нельзя ограничиться рассмотрением только одной фазы и использовать расчётные выражения для симметричных режимов. Показано применение метода контурных токов и метода узловых потенциалов для расчёта цепи фазы – нулевой провод как основного элемента конфигурации линии 0,38 кВ. В схему замещения петли внесены в соответствии с требованиями ПУЭ повторные заземления. Наличие последних учитывается введением контуров, включающих участки нулевого провода и повторные заземлители. Контуров головного участка линии включают сопротивление трансформатора, приведённые к низкой стороне, и сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора. При составлении узловых уравнений за узел с нулевым потенциалом принимается нейтраль обмотки низкого напряжения трансформатора. Для рассматриваемого в работе примера однофазной цепи результаты, полученные двумя методами, полностью совпадают. Предложенные расчётные модели можно использовать для определения параметров однофазных ответвлений, для расчётов токов однофазных коротких замыканий и режимов участков с любым количеством фаз. Для расчёта полнофазных режимов необходимо добавить уравнения для двух других фаз в соответствующие системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: линия электропередачи 0,38 кВ, несимметричный режим, цепь фазы – нулевой провод, метод контурных токов, метод узловых потенциалов, ток короткого замыкания.

CALCULATION OF PHASE – NEUTRAL CONDUCTOR SUPPLY SYSTEM OF 0.38 kV RURAL ELECTRIC NETWORK

Pavel O. Gukov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Calculation of a 0.38 kV electrical network belongs to the category of the most difficult tasks for determining the parameters of network modes. Rural electric networks of 0.38 kV are a set of lines of single-end feed. When drawing up replacement schemes for such lines, it is necessary to take into account the branching pattern and the single-phase sections, which include two-phase and single-phase branches. Another distinctive feature of the networks under consideration is the asymmetry of normal modes due to different phase loads. Therefore, the calculation cannot be limited to considering only one phase and use the calculated expressions for symmetric modes. The author shows the application of mesh-current method and node-potential method for calculating the phase – neutral conductor circuit, as the main element of the 0.38 kV configuration of line. In the loop replacement circuit, double earthings were introduced in accordance with the requirements of the Regulations for Electrical Installation (National Electrical Code). The presence of double earthings is taken into account by the introduction of circuits including sections of the neutral conductor and double earthing conductors. The loops of the head section of the line include the resistances of the transformer, reduced to low voltage side, and the resistance of the earthing device of the neutral of the transformer. When drawing up the nodal equations, the neutral of the low voltage winding of the transformer is taken as a node with zero potential. For the example of a single-phase circuit considered in the work, the results obtained by the two methods completely coincide. The proposed design models can be used to determine the parameters of single-phase branches, to calculate the currents of single-phase short circuits and modes of sections with any number of phases. To calculate full-phase modes, it is necessary to add equations for the other two phases to the corresponding systems.

KEYWORDS: 0.38 kV power line, asymmetrical mode, phase – neutral conductor circuit, mesh-current method and node-potential method, short-circuit current.

Введение
Расчёт электрической сети проводится с целью определения основных режимных параметров – мощностей и напряжений в узлах. По ним определяются перетоки мощности в ветвях и потери мощности в элементах сетей. Для нормальных режимов высоковольтных сетей используются методики, расчётные выражения в которых учи-

тывают симметрию фазных напряжений и токов [5]. В этом случае схемы замещения составляются для одной фазы. Расчёт сводится к определению потерь мощности и падений напряжения на участках сети по известным выражениям [2, 10].

Наиболее сложный случай представляет сельская сеть 0,38 кВ. Схемы таких сетей имеют разветвлённую структуру с наличием однофазных и двухфазных ответвлений. Кроме того, режим сельской распределительной сети 0,38 кВ в большинстве случаев является несимметричным из-за однофазных потребителей, неравномерно распределённых по фазам [1, 6]. Перечисленные выше факторы приводят к тому, что схема замещения сети 0,38 кВ должна содержать информацию по всем фазам с учётом неполнофазных участков. Это усложняет задачу расчёта такой сети, в частности, из-за невозможности использования методик расчёта нормальных режимов высоковольтных сетей. В настоящее время известны несколько подходов к расчёту сетей 0,38 кВ, основанных, например, на методе симметричных составляющих или методе фазных координат.

Конфигурацию четырехпроводной линии 0,38 кВ можно рассматривать как совокупность цепей фаза – нулевой провод. Представляет интерес расчёт одной такой петли как участка с однофазным ответвлением или в рамках задачи расчётов токов однофазных коротких замыканий.

Методика расчёта

Рассмотрим схему однофазной цепи линии 0,38 кВ с обозначенными номерами потребителей (рис. 1). В соответствии с требованиями ПУЭ [8] в схему включены повторные заземления нулевого провода.

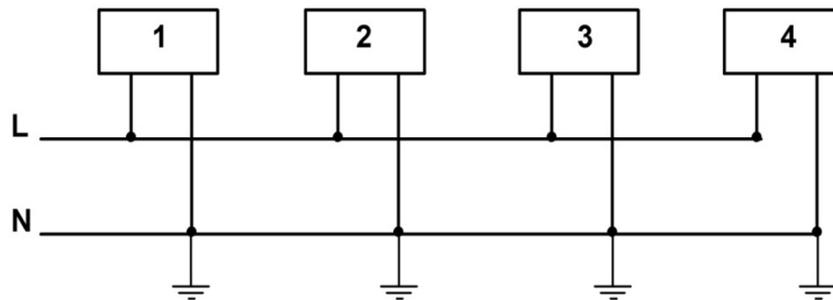


Рис. 1. Схема цепи фаза (L) – нулевой провод (N) линии 0,38 кВ

Покажем, как данную цепь можно рассчитать с помощью метода контурных токов [4, 9]. Для этого составим схему замещения, как показано на рисунке 2.

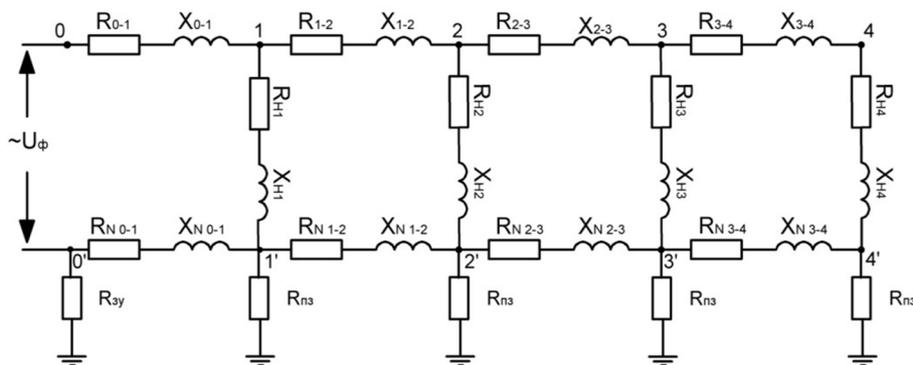


Рис. 2. Схема замещения цепи фаза – нулевой провод:

R_{i-i+1} , X_{i-i+1} и $R_{N i-i+1}$, $X_{N i-i+1}$ – соответственно активные и реактивные сопротивления участков фазного и нейтрального (N) проводов; $R_{пз}$, $R_{зз}$ – сопротивления повторного заземлителя и заземляющего устройства подстанции 10/0,4 кВ; R_{Hi} , X_{Hi} – сопротивления нагрузки i -го потребителя

По схеме замещения получена схема для расчёта, показанная на рисунке 3. В контур с током I_{11} включено сопротивление трансформатора $Z_{тр} = R_{тр} + jX_{тр}$, приведённое к низкой стороне. Величины $R_{тр}$ и $X_{тр}$ в числе других технических характеристик,

как правило, предоставляются заводом-изготовителем. При отсутствии данных можно использовать известные соотношения [3]:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U^2}{S_{\text{н}}^2}; X_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{к}} \% U^2}{100 S_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{к}}$, $u_{\text{к}}\%$ – соответственно потери и напряжение короткого замыкания, $S_{\text{н}}$ и U – соответственно номинальные мощность и напряжение трансформатора 10/0,4 кВ.

Выбраны направления контурных токов. Для составления системы уравнений определим собственные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{\text{H1}} + Z_{\text{тр}} + Z_{0-1} + Z_{\text{N0-1}}; \\ Z_{22} &= Z_{\text{N1-2}} + Z_{1-2} + Z_{\text{H2}} + Z_{\text{H1}}; \\ Z_{33} &= Z_{\text{N2-3}} + Z_{2-3} + Z_{\text{H3}} + Z_{\text{H2}}; \\ Z_{44} &= Z_{\text{N3-4}} + Z_{3-4} + Z_{\text{H4}} + Z_{\text{H3}}; \\ Z_{55} &= 2R_{\text{пз}} + Z_{\text{N3-4}}; \\ Z_{66} &= 2R_{\text{пз}} + Z_{\text{N2-3}}; \\ Z_{77} &= 2R_{\text{пз}} + Z_{\text{N1-2}}; \\ Z_{88} &= R_{\text{пз}} + Z_{\text{N0-1}} + R_{\text{зв}}. \end{aligned}$$

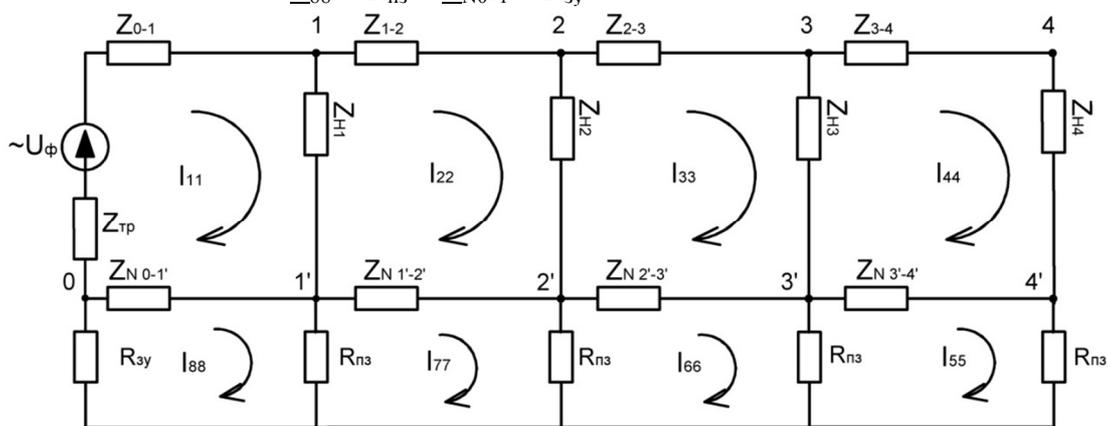


Рис. 3. Схема для расчёта методом контурных токов

В соответствии с конфигурацией схемы и выбранными направлениями составляем систему:

$$\begin{cases} I_{11}Z_{11} - I_{22}Z_{\text{H1}} - I_{88}Z_{\text{N0-1}} = U_{\phi}; \\ -I_{11}Z_{\text{H1}} + I_{22}Z_{22} - I_{33}Z_{\text{H2}} - I_{77}Z_{\text{N1-2}} = 0; \\ -I_{22}Z_{\text{H2}} + I_{33}Z_{33} - I_{44}Z_{\text{H3}} - I_{66}Z_{\text{N2-3}} = 0; \\ -I_{33}Z_{\text{H3}} + I_{44}Z_{44} - I_{55}Z_{\text{N3-4}} = 0; \\ -I_{44}Z_{\text{N3-4}} + I_{55}Z_{55} - I_{66}R_{\text{пз}} = 0; \\ -I_{33}Z_{\text{N2-3}} - I_{55}R_{\text{пз}} + I_{66}Z_{66} - I_{77}R_{\text{пз}} = 0; \\ -I_{22}Z_{\text{N1-2}} - I_{66}R_{\text{пз}} + I_{77}Z_{77} - I_{88}R_{\text{пз}} = 0; \\ -I_{11}Z_{\text{N0-1}} - I_{77}R_{\text{пз}} + I_{88}Z_{88} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для решения системы (2) составим матрицу сопротивлений Z и столбец свободных членов S :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & -Z_{\text{H1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\text{N0-1}} \\ -Z_{\text{H1}} & Z_{22} & -Z_{\text{H2}} & 0 & 0 & 0 & -Z_{\text{N1-2}} & 0 \\ 0 & -Z_{\text{H2}} & Z_{33} & -Z_{\text{H3}} & 0 & -Z_{\text{N2-3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z_{\text{H3}} & Z_{44} & -Z_{\text{N3-4}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{\text{N3-4}} & Z_{55} & -R_{\text{пз}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z_{\text{N2-3}} & 0 & -R_{\text{пз}} & Z_{66} & -R_{\text{пз}} & 0 \\ 0 & -Z_{\text{N1-2}} & 0 & 0 & 0 & -R_{\text{пз}} & Z_{77} & -R_{\text{пз}} \\ -Z_{\text{N0-1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{\text{пз}} & Z_{88} \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} U_{\phi} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Для определения контурных токов необходимо решить матричное уравнение

$$I = Z^{-1} \cdot S, \quad (3)$$

где I – столбец контурных токов.

Теперь рассчитаем эту же петлю методом узловых потенциалов. Для этого составим схему, как показано на рисунке 4.

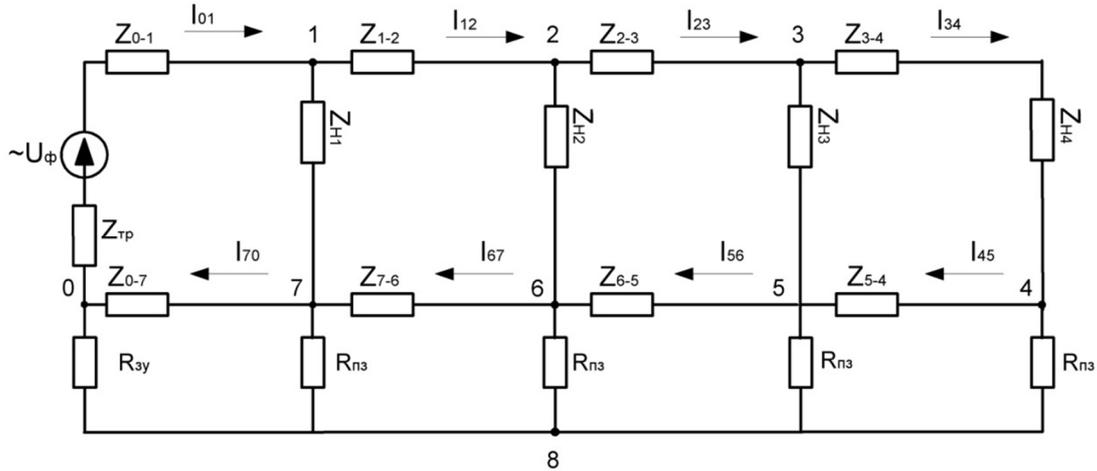


Рис. 4. Схема для расчёта методом узловых потенциалов

Потенциал нулевой точки обмотки низшего напряжения трансформатора принимаем равным нулю: $\varphi_0 = 0$. Для записи узловых уравнений используем собственные проводимости узлов:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1/(Z_{0-1} + Z_{тр}) + 1/Z_{1-2} + 1/Z_{H1}; \\ Y_2 &= 1/Z_{1-2} + 1/Z_{2-3} + 1/Z_{H2}; \\ Y_3 &= 1/Z_{2-3} + 1/(Z_{3-4} + Z_{H4}) + 1/Z_{H3}; \\ Y_4 &= 1/Z_{5-4} + 1/R_{пз} + 1/(Z_{H4} + Z_{3-4}); \\ Y_5 &= 1/Z_{6-5} + 1/R_{пз} + 1/Z_{5-4} + 1/Z_{H3}; \\ Y_6 &= 1/Z_{7-6} + 1/R_{пз} + 1/Z_{6-5} + 1/Z_{H2}; \\ Y_7 &= 1/Z_{0-7} + 1/R_{пз} + 1/Z_{7-6} + 1/Z_{H1}; \\ Y_8 &= 1/R_{зy} + 4/R_{пз}. \end{aligned}$$

Взаимные проводимости представляют собой величины, обратные сопротивлениям ветвей, соединяющих соответствующие узлы:

$$\begin{aligned} Y_{0-1} &= 1/(Z_{0-1} + Z_{тр}); \\ Y_{1-2} &= 1/Z_{1-2}; \\ Y_{1-7} &= 1/Z_{H1}; \\ Y_{2-3} &= 1/Z_{2-3}; \\ Y_{2-6} &= 1/Z_{H2}; \\ Y_{3-4} &= 1/(Z_{3-4} + Z_{H4}); \\ Y_{3-5} &= 1/Z_{H3}; \\ Y_{5-4} &= 1/Z_{5-4}; \\ Y_{4-8} &= 1/Z_{пз}; \\ Y_{6-5} &= 1/Z_{6-5}; \\ Y_{5-8} &= 1/Z_{пз}; \\ Y_{7-6} &= 1/Z_{7-6}; \\ Y_{6-8} &= 1/Z_{пз}; \\ Y_{7-8} &= 1/Z_{пз}; \\ Y_{0-7} &= 1/Z_{0-7}. \end{aligned}$$

Тогда система узловых уравнений для рассматриваемой цепи (рис. 3) имеет вид:

$$\begin{cases} \varphi_1 \underline{Y}_1 - \varphi_2 \underline{Y}_{1-2} - \varphi_7 \underline{Y}_{1-7} = U_\phi \underline{Y}_{0-1}; \\ -\varphi_1 \underline{Y}_{1-2} + \varphi_2 \underline{Y}_2 - \varphi_3 \underline{Y}_{2-3} - \varphi_6 \underline{Y}_{2-6} = 0; \\ -\varphi_2 \underline{Y}_{2-3} + \varphi_3 \underline{Y}_3 - \varphi_4 \underline{Y}_{3-4} - \varphi_5 \underline{Y}_{3-5} = 0; \\ -\varphi_3 \underline{Y}_{3-4} + \varphi_4 \underline{Y}_4 - \varphi_5 \underline{Y}_{5-4} - \varphi_8 \underline{Y}_{4-8} = 0; \\ -\varphi_3 \underline{Y}_{3-5} - \varphi_4 \underline{Y}_{5-4} + \varphi_5 \underline{Y}_5 - \varphi_6 \underline{Y}_{6-5} - \varphi_8 \underline{Y}_{5-8} = 0; \\ -\varphi_2 \underline{Y}_{2-6} - \varphi_5 \underline{Y}_{6-5} + \varphi_6 \underline{Y}_6 - \varphi_7 \underline{Y}_{7-6} - \varphi_8 \underline{Y}_{6-8} = 0; \\ -\varphi_1 \underline{Y}_{1-7} - \varphi_6 \underline{Y}_{7-6} + \varphi_7 \underline{Y}_7 - \varphi_8 \underline{Y}_{7-8} = 0; \\ -\varphi_4 \underline{Y}_{4-8} - \varphi_5 \underline{Y}_{5-8} - \varphi_6 \underline{Y}_{6-8} - \varphi_7 \underline{Y}_{7-8} + \varphi_8 \underline{Y}_8 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы (4) проводится аналогично методу контурных токов путём составления соответствующего матричного уравнения.

Токи на участках рассчитываются по закону Ома:

$$\underline{I}_{01} = (\varphi_0 - \varphi_1 + U_\phi) \underline{Y}_{0-1};$$

$$\underline{I}_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) \underline{Y}_{1-2};$$

$$\underline{I}_{23} = (\varphi_2 - \varphi_3) \underline{Y}_{2-3};$$

$$\underline{I}_{34} = (\varphi_3 - \varphi_4) \underline{Y}_{3-4};$$

$$\underline{I}_{45} = (\varphi_4 - \varphi_5) \underline{Y}_{5-4};$$

$$\underline{I}_{56} = (\varphi_5 - \varphi_6) \underline{Y}_{6-5};$$

$$\underline{I}_{67} = (\varphi_6 - \varphi_7) \underline{Y}_{7-6};$$

$$\underline{I}_{70} = (\varphi_7 - \varphi_0) \underline{Y}_{0-7}.$$

Результаты расчётов

Рассчитаем с помощью системы (2) токи в цепи фаза – нулевой провод. Линия выполнена самонесущим проводом с сечением фазы и нулевого провода соответственно 35 мм² и 50 мм². В таблице 1 приведены результаты расчётов сопротивлений участков.

Таблица 1. Сопротивления участков цепи

Участок	0–1	1–2	2–3	3–4	0–1'	1'–2'	2'–3'	3'–4'
Длина, км	0,15	0,21	0,18	0,11	0,15	0,21	0,18	0,11
Г ₀ , Ом/км	0,868	0,868	0,868	0,868	0,720	0,720	0,720	0,720
х ₀ , Ом/км	0,104	0,104	0,104	0,104	0,073	0,073	0,073	0,073
R, Ом	0,130	0,182	0,156	0,095	0,108	0,151	0,130	0,079
X, Ом	0,016	0,022	0,019	0,011	0,011	0,015	0,013	0,008

Параметры схем замещения нагрузок потребителей рассчитаем с помощью следующих выражений [7]:

$$R_n = U^2 \cdot \cos\varphi / S_{\text{наг}}, \quad (5)$$

$$X_n = U^2 \cdot \sin\varphi / S_{\text{наг}}. \quad (6)$$

В таблице 2 приведены исходная информация о нагрузках и результаты расчётов.

Таблица 2. Результаты расчётов параметров схем замещения нагрузок

Номер потребителя	S _н , кВА	cosφ	sinφ	R _н , Ом	X _н , Ом
1	12	0,91	0,41	3,670	1,654
2	8,5	0,93	0,37	5,296	2,107
3	15,2	0,89	0,46	2,834	1,465
4	6,3	0,83	0,56	6,377	4,302

Другими необходимыми параметрами для расчётов являются следующие:

- U_φ = 220 В;

- R_{зу} = 4 Ом;

- R_{пз} = 30 Ом;

- S_н = 100 кВА;

- Z_{тр} = 0,036 + j0,066 Ом.

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Результаты расчётов контурных токов с приведёнными выше исходными данными представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчётов контурных токов для цепи фаза – нулевой провод

\underline{I}_{11}, A	\underline{I}_{22}, A	\underline{I}_{33}, A	\underline{I}_{44}, A
123,119 – j50,135	81,703 – j32,08	55,991 – j23,707	15,644 – j8,065
\underline{I}_{55}, A	\underline{I}_{66}, A	\underline{I}_{77}, A	\underline{I}_{88}, A
0,843 – j0,254	1,645 – j0,491	2,202 – j0,65	2,342 – j0,692

Токи на участках цепи:

$$\underline{I}_{0-1} = \underline{I}_{11}; \underline{I}_{1-2} = \underline{I}_{22}; \underline{I}_{2-3} = \underline{I}_{33}; \underline{I}_{3-4} = \underline{I}_{44};$$

$$\underline{I}_{N3-4} = \underline{I}_{44} - \underline{I}_{55}; \underline{I}_{N2-3} = \underline{I}_{33} - \underline{I}_{66}; \underline{I}_{N1-2} = \underline{I}_{22} - \underline{I}_{77}; \underline{I}_{N0-1} = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{88}.$$

Комплексы \underline{I} и действующие значения I токов на участках приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4. Результаты расчётов токов на участках фазного провода

Номер участка	0–1	1–2	2–3	3–4
\underline{I}, A	123,119 – j50,135	81,703 – j32,08	55,991 – j23,707	15,644 – j8,065
I, A	132,936	87,775	60,803	17,60

Таблица 5. Результаты расчётов токов на участках нулевого провода

Номер участка	0–1'	1'–2'	2'–3	3'–4'
\underline{I}, A	120,777 – j49,444	79,501 – j31,429	54,346 – j23,216	14,801 – j7,811
I, A	130,506	85,488	59,097	16,735

Рассматриваемая цепь фаза – нулевой провод с теми же исходными данными была рассчитана методом узловых потенциалов [4]. В таблице 6 представлены результаты расчётов комплексов и действующих значений токов с использованием системы (4).

Таблица 6. Результаты расчёта токов на участках цепи фаза – нулевой провод методом узловых потенциалов

Участок	\underline{I}, A	I, A
0–1	123,119 – j50,135	132,936
1–2	81,703 – j32,08	87,775
2–3	55,991 – j23,707	60,803
3–4	15,644 – j8,065	17,60
4–5	14,801 – j7,811	16,735
5–6	54,346 – j23,216	59,097
6–7	79,501 – j31,429	85,488
7–0	120,777 – j49,444	130,506

Из сравнения данных таблиц 4, 5 и 6 следует полное совпадение результатов расчётов токов двумя методами.

Модель цепи фаза – нулевой провод в методе контурных токов удобна для расчётов токов однофазных коротких замыканий (КЗ). Необходимо просто приравнять нулю сопротивление соответствующей нагрузки. В таблице 7 приведены результаты расчётов для различных точек КЗ. Показаны токи на участках фазного провода в зависимости от места КЗ.

Таблица 7. Результаты расчётов токов однофазных КЗ

Точка КЗ	I_{01}, A	I_{12}, A	I_{23}, A	I_{34}, A
Узел 1, $Z_{H1} = 0$	762,949	0,551	0,447	0,141
Узел 2, $Z_{H2} = 0$	371,264	344,140	0,236	0,083
Узел 3, $Z_{H3} = 0$	271,053	236,989	226,064	0,023
Узел 4, $Z_{H4} = 0$	239,164	202,828	188,413	179,261

Для повышения точности расчётов токов КЗ можно учесть, если это необходимо, сопротивление дуги в месте КЗ и внести в схему сопротивление трансформатора при однофазном КЗ.

Выводы

1. Предложенные модели для расчёта режима цепи фаза – нулевой провод с использованием метода контурных токов и метода узловых потенциалов позволяют учесть в схеме замещения все особенности конфигурации однофазных ответвлений, в том числе и повторные заземления, а представление нагрузки в виде сопротивлений – зависимость потребляемой мощности от напряжения в нагрузочном узле.

2. Модель с использованием метода контурных токов упрощает расчёт токов однофазных коротких замыканий путём приравнивания к нулю сопротивления в точке КЗ.

3. С помощью рассмотренной модели цепи фаза – нулевой провод можно получить схемы для двухфазных и полнофазных участков линий 0,38 кВ. Например, при использовании метода контурных токов необходимо в схему добавить контуры для других фаз, а в систему уравнений (2) – уравнения, соответствующие дополнительным контурам.

Библиографический список

1. Будзко И.А. Электроснабжение сельского хозяйства : учебник / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукмаков. – Москва : Колос, 2000. – 534 с.
2. Веников В.А. Электрические системы. Электрические сети : учебник / В.А. Веников, В.А. Строев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1998. – 256 с.
3. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – 2-е изд. – Ростов на Дону : Феникс, 2008. – 716 с.
4. Гуков П.О. Теоретические основы электротехники: примеры решения типовых задач : учеб. пособие / П.О. Гуков, В.В. Картавцев, С.Н. Пиляев. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет, 2004. – 170 с.
5. Картавцев В.В. Метод расчёта режима распределительной электрической сети / В.В. Картавцев, П.О. Гуков, Ю.М. Помогаев // Научное обозрение. – 2016. – № 10. – С. 98–104.
6. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства : учебник / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов. – Москва : КолосС, 2008. – 654 с.
7. Лыкин А.И. Электрические системы и сети : учеб. пособие / А.И. Лыкин. – Москва : Логос, 2008. – 253 с.
8. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий : официальные тексты по состоянию на 01.03.2007 г. ; ред. А.М. Меламед. – Москва : ЭНАС, 2019. – 669 с.
9. Hambley A.R. Electrical Engineering. Principles and Applications : For undergraduate introductory or survey courses in electrical engineering. 5th edition / A.R. Hambley. – Prentice Hall, 2010. – 912 p.
10. Power System Fundamentals / P. Ponce, A. Molina, O. Mata, et al. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. – 447 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Принадлежность к организации

Павел Олегович Гуков – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: guskow.pav@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 12.10.2020

Дата принятия к печати 28.11.2020

AUTHOR CREDENTIALS

Affiliations

Pavel O. Gukov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: guskow.pav@yandex.ru.

Received October 12, 2020

Accepted after revision November 28, 2020