

УДК 621.311

**УЧЕТ ПОВТОРНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НУЛЕВОГО  
ПРОВОДА ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЖИМОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,38 кВ**

**М. И. ФУРСАНОВ, А. А. ЗОЛОТОЙ, В. В. МАКАРЕВИЧ**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Расчеты и анализ режимов электрических сетей 0,38 кВ в условиях эксплуатации и при проектировании энергосистем выполняются в настоящее время по упрощенной методике, основные аналитические соотношения которой приведены ниже [1]:

1. Полные (комплексные) токи нагрузок  $\underline{I}_{kj}$  определяются по формуле (1):

$$\underline{I}_{kj} = \frac{P_{kj} + j \cdot Q_{kj}}{\underline{U}_k}, \quad (1)$$

где  $\underline{U}_k$  – фазное напряжение на шинах низшей стороны трансформатора 6–20/0,38 кВ;  $P_{kj}$ ,  $Q_{kj}$  – активные и реактивные мощности нагрузок;  $k = A, B, C$ .

2. Токи на участках распределительной линии (РЛ)  $\underline{I}_{ki}$ :

$$\underline{I}_{ki} = \sum_{j=1}^n \underline{I}_{kj}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество нагрузочных узлов.

Ток в нулевом проводе  $\underline{I}_{Ni}$  равен сумме токов фаз:

$$\underline{I}_{Ni} = \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{Bi} + \underline{I}_{Ci}. \quad (3)$$

3. Фазные падения напряжения  $\underline{\Delta U}_{ki}$  [2, формула (5.64)]:

$$\underline{\Delta U}_{ki} = \underline{I}_{ki} \cdot \underline{Z}_i + \underline{I}_{oi} (\underline{Z}_{oi} - \underline{Z}_i), \quad (4)$$

где  $\underline{I}_{ki}$  – фазный ток  $i$ -го участка, равный сумме симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательности;  $\underline{Z}_i$  – полное сопротивление прямой и обратной последовательности участка;  $\underline{I}_{oi}$ ,  $\underline{Z}_{oi}$  – ток и полное сопротивление нулевой последовательности:

$$\underline{Z}_o = \underline{Z}_k + 3 \cdot \underline{Z}_N; \quad (5)$$

$$\underline{I}_N = 3 \cdot \underline{I}_o, \quad (6)$$

где  $\underline{Z}_k$  – полное сопротивление фазного провода;  $\underline{Z}_N$  – полное сопротивление нулевого провода;  $\underline{I}_N$  – ток в нулевом проводе.

4. Величина  $\underline{\Delta U}_{ki}$  в фазных координатах равна:

$$\underline{\Delta U}_{ki} = \underline{I}_{ki} \cdot \underline{Z}_{ki} + \underline{I}_{Ni} \cdot \underline{Z}_{Ni}. \quad (7)$$

5. Напряжения в узлах сети находятся в виде разности между напряжением предыдущего узла  $\underline{U}_{kj-1}$  и падением напряжения на участке  $\underline{\Delta U}_{ki}$ :

$$\underline{U}_{kj} = \underline{U}_{kj-1} - \underline{\Delta U}_{ki}, \quad k = A, B, C. \quad (8)$$

6. Потери активной мощности на участках распределительной линии:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{ki} &= I_{ki}^2 \cdot R_{ki}, \quad k = A, B, C; \\ \Delta P_{Ni} &= I_{Ni}^2 \cdot R_{Ni}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\Delta P_{ki}$  – потери активной мощности на  $i$ -м участке фазы;  $\Delta P_{Ni}$  – потери активной мощности на  $i$ -м участке нулевого провода.

Суммарные потери активной мощности в сети в именованных единицах:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^m (\Delta P_{Ai} + \Delta P_{Bi} + \Delta P_{Ci} + \Delta P_{Ni}), \quad (10)$$

в процентах

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P} 100 \%, \quad (11)$$

где  $m$  – количество ветвей схемы сети;  $P$  – суммарная активная мощность РЛ.

На практике приведенная методика [1] применяется в еще более упрощенном виде и не учитывает влияния повторных заземлений нулевого провода (ПЗН), которые согласно [3, п. 1.7.63] устанавливаются на концах воздушных линий (ВЛ), ответвлениях от ВЛ более 200 м и на вводах от ВЛ к электроустановкам, подлежащих занулению. По условиям защиты от грозовых перенапряжений могут осуществляться и более частые заземления [3, п. 2.4.26].

Оценим количественно влияние учета повторного заземления на режим воздушной линии 0,38 кВ, однолинейная схема которой представлена на рис. 1.

Буквами «А», «В» и «С» на рис. 1 указаны фазы участков РЛ, длины участков даны в километрах. Знаком « $\perp$ » отмечены узлы сети, в которых выполнено повторное заземление нулевого провода. В узлах 3, 5 и 7 заземление выполнено согласно [2, п. 1.7.63], так как узел 5 – конец ВЛ, узел 7 – ответвление от ВЛ длиной 217 м, в узле 3 находится электроприемник, подлежащий занулению.

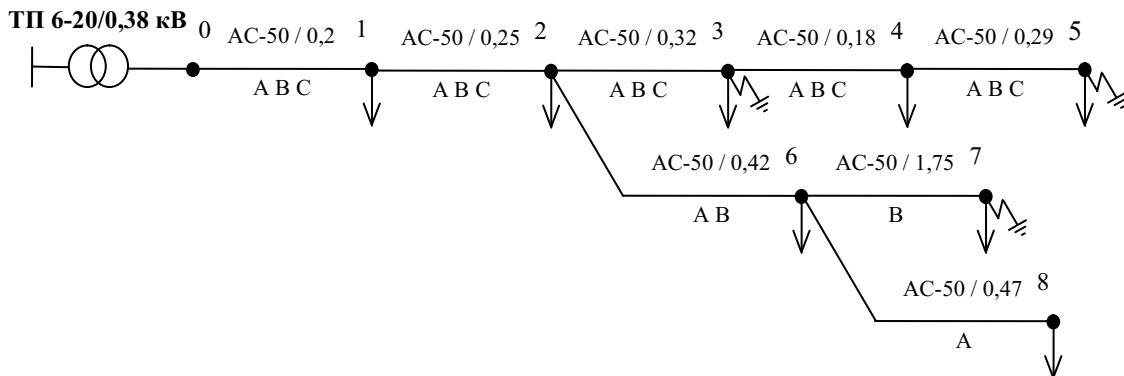


Рис. 1. Схема распределительной линии 0,38 кВ

Расчетная схема замещения данной РЛ представлена на рис. 2.

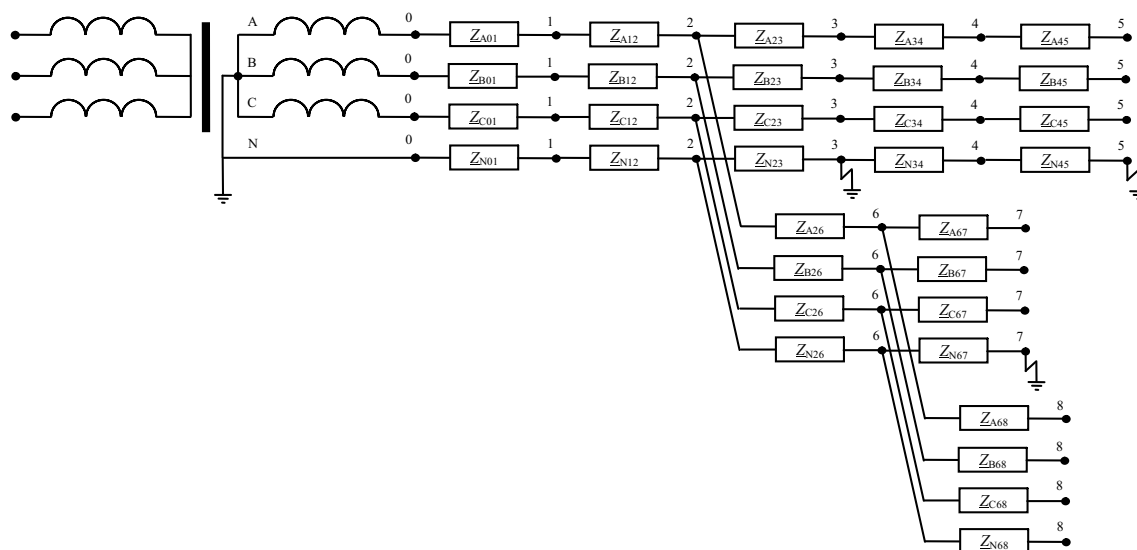


Рис. 2. Схема замещения распределительной линии 0,38 кВ

Топологические данные о схеме (рис. 2) и значения полных сопротивлений участков  $Z_i$  приведены в табл. 1 – буква «Ф» означает фазный провод, «N» – нулевой, режимные данные о нагрузках в узлах РЛ пересчитаны в полные токи (пункт 1 алгоритма) и сведены в табл. 2.

Напряжения на шинах низкого напряжения трансформаторной подстанции (ТП) приняты симметричными: фазы напряжений сдвинуты на  $120^\circ$ , а их модули равны 231 В.

Таблица 1

Исходные данные по распределительной линии 0,38 кВ

Номер начала	Номер конца	Тип провода	Марка проводника	Длина ветви, км	Полное сопротивление ветви, Ом
0	1	Ф	АС-50	0,2	$0,12 + j0,08$
		N	АС-35	0,2	$0,15 + j0,08$
1	2	Ф	АС-50	0,25	$0,15 + j0,1$
		N	АС-35	0,25	$0,19 + j0,1$
2	3	Ф	АС-50	0,32	$0,19 + j0,12$
		N	АС-35	0,32	$0,25 + j0,13$
3	4	Ф	АС-50	0,18	$0,11 + j0,07$
		N	АС-35	0,18	$0,14 + j0,07$
4	5	Ф	АС-50	0,29	$0,17 + j0,11$
		N	АС-35	0,29	$0,22 + j0,12$
2	6	Ф	АС-50	0,42	$0,25 + j0,16$
		N	АС-35	0,42	$0,32 + j0,17$
6	7	Ф	АС-50	1,75	$1,04 + j0,67$
		N	АС-35	1,75	$1,35 + j0,71$
6	8	Ф	АС-50	0,47	$0,28 + j0,18$
		N	АС-35	0,47	$0,36 + j0,19$

Режимные данные о нагрузках сети 0,38 кВ

Номер узла	Ток нагрузки, А		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	$2,8e^{-j31,79}$	$5,4e^{j88,21}$	$8,6e^{-j151,79}$
2	$3,8e^{-j31,79}$	$4,4e^{j88,21}$	$9,4e^{-j151,79}$
3	$2,4e^{-j31,79}$	0	$16,7e^{-j151,79}$
4	0	$2,4e^{j88,21}$	$5,2e^{-j151,79}$
5	0	$8,4e^{j88,21}$	$10e^{-j151,79}$
6	$3,2e^{-j31,79}$	$4,4e^{j88,21}$	0
7	0	$10e^{j88,21}$	0
8	$20e^{-j31,79}$	0	0

Токи в проводах на участках распределительной линии находятся по формуле (2). Например, для участка 0–1:

$$\underline{I}_{A01} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A3} + \underline{I}_{A6} + \underline{I}_{A8} = 32,20e^{-j31,79} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{B01} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B3} + \underline{I}_{B4} + \underline{I}_{B6} + \underline{I}_{B7} = 35,00e^{j88,21} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{C01} = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C3} + \underline{I}_{C4} + \underline{I}_{C5} = 49,90e^{-j151,79} \text{ А}.$$

Ток в нулевом проводе – выражение (3):  $\underline{I}_{N01} = \underline{I}_{A01} + \underline{I}_{B01} + \underline{I}_{C01} = 16,48e^{-j160,25} \text{ А}.$

Падения напряжения – выражение (7):

$$\underline{\Delta U}_{A01} = \underline{I}_{A01} \cdot \underline{Z}_{A01} + \underline{I}_{N01} \cdot \underline{Z}_{N01} = 3,29e^{-j38,09} \text{ В};$$

$$\underline{\Delta U}_{B01} = \underline{I}_{B01} \cdot \underline{Z}_{B01} + \underline{I}_{N01} \cdot \underline{Z}_{N01} = 4,97e^{j154,80} \text{ В};$$

$$\underline{\Delta U}_{C01} = \underline{I}_{C01} \cdot \underline{Z}_{C01} + \underline{I}_{N01} \cdot \underline{Z}_{N01} = 9,85e^{-j122,94} \text{ В};$$

$$\underline{\Delta U}_{N01} = \underline{I}_{N01} \cdot \underline{Z}_{N01} = 2,87e^{-j132,72} \text{ В}.$$

Напряжение в узле 1 – выражение (8):

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A0} - \underline{\Delta U}_{A01} = 228,42e^{j0,51} \text{ В}, \quad \underline{U}_{B1} = \underline{U}_{B0} - \underline{\Delta U}_{B01} = 226,94e^{j119,29} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{C1} = \underline{U}_{C0} - \underline{\Delta U}_{C01} = 221,17e^{-j119,87} \text{ В}, \quad \underline{U}_{N1} = \underline{U}_{N0} + \underline{\Delta U}_{N01} = 2,87e^{-j132,72} \text{ В}.$$

Потери активной мощности в проводах – выражение (10):

$$\Delta P_{A01} = I_{A01}^2 \cdot R_{A01} = 124,42 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{B01} = I_{B01}^2 \cdot R_{B01} = 147,00 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{C01} = I_{C01}^2 \cdot R_{C01} = 298,80 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{N01} = I_{N01}^2 \cdot R_{N01} = 40,74 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери активной мощности в схеме:

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_N = 2461,05 \text{ кВт}.$$

Расчеты для других участков проводятся аналогично, а их результаты сведены в табл. 3. Электрические сети 0,38 кВ традиционно имеют разомкнутую древовидную топологию и из-за несимметричных режимов работы, помимо фазных проводов, снабжаются дополнительным нулевым проводом, в котором замыкаются токи нулевой последовательности. Нулевой провод соединяет заземленные нейтрали обмоток низкого напряжения питающих трансформаторов в ТП 6-20/0,38 кВ с нейтралью трехфазных и обратными проводами однофазных потребителей. Конструктивно прокладка нулевых проводов линий в воздушном, кабельном или ином исполнении осуществляется совместно с фазными проводами. Поэтому если рассматривать сеть нулевого провода отдельно от сети фазных проводов, то при ее заземлении только в нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора ТП 6-20/0,38 кВ, сеть нулевого провода будет иметь разомкнутую древовидную топологию, как и фазная сеть. В этом случае для определения токов, напряжений и потерь мощности в сети нулевого провода может быть использован хорошо разработанный математический аппарат расчета разомкнутых электрических сетей [1], [4].

Учет повторного заземления, устанавливаемого в сети нулевого провода согласно ПУЭ [3], приводит к появлению в схеме замещения дополнительных ветвей, связывающих нулевой провод с землей (рис. 3). При наличии обязательного заземления нулевого провода в нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора ТП 6-20/0,38 кВ, появляющиеся ветви дополнительного заземления создают в схеме контуры, связанные с землей, и топология сети нулевого провода становится замкнутой. Учитывая низкий уровень достоверности режимной информации о потребителях и невысокое напряжение сети сложностью природы растекания токов нулевой последовательности в земле с достаточной для практических расчетов точностью можно пренебречь, а землю считать узлом схемы замещения сети, соединенным с нулевым проводом ветвями, имитирующими заземляющие устройства. С учетом принятых допущений схема замещения сети нулевого провода для распределительной линии 0,38 кВ (рис. 1) будет иметь вид, показанный на рис. 3. В этой схеме узел 9 имитирует землю, ветви 0–9, 7–9 и 5–9 – сопротивления растеканию заземляющих устройств.

Узел 0 в схеме замещения рис. 3 соответствует нейтрали питающего трансформатора ТП 6-20/0,38 кВ с нулевым потенциалом. Схема получает питание от источников тока в узлах подключения нагрузок. Величины токов источников в каждом узле определяются суммой фазных токов нагрузки. Учитывая замкнутую топологию схемы замещения для расчета режима сети нулевого провода с учетом повторных заземлений, требуется несколько иной математический аппарат по сравнению с описанным выше. Наиболее подходящим для решения подобных задач является метод узловых напряжений [4]. Задача существенно упрощается при представлении режимной информации об узлах сети в форме токовых инъекций. Система уравнений узловых напряжений в этом случае становится линейной и однозначно разрешимой относительно напряжений узловых точек схемы нулевого провода.

Таблица 3

Результаты расчета режима схемы распределительной линии  
без учета повторных заземлений нулевого провода (рис. 1)

Номер узла начала ветви	Номер узла конца ветви	Тип провода	Токи участков, А	Падение напряжения, В	Потери мощности, Вт	Напряжение узла конца ветви
0	1	A	$32,20e^{-j31,79}$	$3,29e^{-j38,09}$	124,42	$228,42 e^{j0,51}$
		B	$35,00e^{j88,21}$	$4,97e^{j1154,80}$	147,00	$226,94 e^{j119,29}$
		C	$49,90e^{-j151,79}$	$9,85e^{-j122,94}$	298,80	$221,17 e^{-j119,87}$
		N	$16,48e^{-j160,25}$	$2,87e^{-j132,72}$	40,74	$2,87 e^{-j132,72}$
1	2	A	$29,40e^{-j31,79}$	$4,21e^{-j28,52}$	127,93	$224,75e^{j1,03}$
		B	$29,60e^{j88,21}$	$4,79e^{j150,45}$	129,67	$222,86e^{j118,65}$
		C	$41,30e^{-j151,79}$	$9,84e^{-j120,56}$	211,33	$200,33e^{-j119,84}$
		N	$11,80e^{-j152,63}$	$2,57e^{-j125,09}$	26,91	$5,43e^{-j129,12}$
2	3	A	$2,40e^{-j31,79}$	$6,93e^{-j137,50}$	1,09	$229,99e^{j2,17}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$7,38e^{-j159,33}$	22,10	$221,95e^{j116,76}$
		C	$31,90e^{-j151,79}$	$14,28e^{-j129,74}$	192,78	$197,28e^{-j119,12}$
		N	$26,33e^{-j167,83}$	$7,34e^{-j140,30}$	171,42	$12,72e^{-j135,54}$
3	4	A	0	$2,13e^{j167,92}$	0	$232,08e^{j2,26}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$2,88e^{j165,34}$	12,43	$220,06e^{j116,20}$
		C	$15,20e^{-j151,79}$	$3,69e^{-j144,71}$	24,62	$193,96e^{-j118,65}$
		N	$13,55e^{j164,55}$	$2,13e^{-j167,92}$	25,53	$14,56e^{-j140,03}$
4	5	A	0	$2,35e^{j175,69}$	0	$234,43e^{j2,28}$
		B	$8,40e^{j88,21}$	$3,48e^{j158,18}$	12,11	$217,48e^{j115,59}$
		C	$10,00e^{-j151,79}$	$3,87e^{-j149,5}$	17,17	$190,64e^{-j118,06}$
		N	$9,30e^{j156,78}$	$2,35e^{-j175,69}$	19,40	$16,53e^{-j144,79}$
2	6	A	$23,20e^{-j31,79}$	$13,72e^{j18,02}$	133,83	$211,67e^{-j0,06}$
		B	$14,40e^{j88,21}$	$8,73e^{j62,86}$	51,56	$218,07e^{j120,55}$
		N	$20,29e^{j6,15}$	$7,43e^{j33,68}$	133,60	$2,75e^{-j2,01}$
6	7	B	$10,00e^{j88,21}$	$27,56e^{j118,11}$	103,60	$190,54e^{j120,90}$
		N	$10,00e^{j88,21}$	$15,26e^{j115,75}$	135,27	$14,18e^{j105,85}$
6	8	A	$20,00e^{-j31,79}$	$14,80e^{-j1,89}$	111,30	$196,88e^{-j0,08}$
		N	$20,00e^{-j31,79}$	$8,19e^{-j4,25}$	145,32	$10,95e^{-j3,69}$
Итого		A	—	—	498,56	—
		B	—	—	478,47	—
		C	—	—	785,81	—
		N	—	—	698,21	—

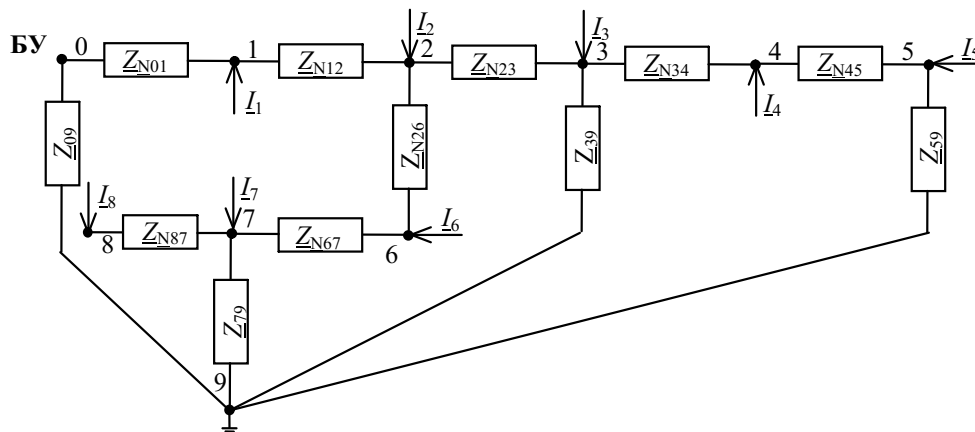


Рис. 3. Схема замещения сети нулевого провода

В качестве базисно-балансирующего узла удобно принять узел, соответствующий нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора в ТП 6-20/0,38 кВ и имеющий при симметричном напряжении нулевой потенциал.

Система уравнений узловых напряжений в матричной форме имеет вид [4]:

$$\underline{Y}_y \underline{U} = \underline{I}, \tag{12}$$

где  $\underline{Y}_y$  – комплексная матрица собственных и взаимных узловых проводимостей, в которой отсутствуют строка и столбец, соответствующие балансирующему узлу схемы;  $\underline{U}$  и  $\underline{I}$  – векторы-столбцы комплексных узловых напряжений и токов.

В системе уравнений (12) неизвестными являются узловые напряжения сети нулевого провода. Так как большинство недиагональных элементов матрицы  $\underline{Y}_y$  равны нулю, то для решения системы линейных уравнений целесообразно использовать точные методы, например, метод Гаусса с оптимальной стратегией упорядочения при исключении неизвестных [5].

Рассмотрим пример расчета режима нулевого провода распределительной линии 0,38 кВ (рис. 1) с учетом повторных заземлений в узлах 3, 5 и 7. Сопротивление заземляющего устройства, присоединенного к нейтрали трансформаторов для линейного напряжения 0,38 кВ, согласно [3, п. 1.7.62], должно быть не более 4 Ом, а сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений, согласно [3, п. 1.7.64], – не более 30 Ом, причем их общее сопротивление должно быть не более 10 Ом. В примере сопротивление заземляющего устройства принято равным 2 Ом, а сопротивления повторных заземлений – 10 Ом.

По данным табл. 3 вычислим комплексные токи инъекций нагрузок  $I_{N1} \dots I_{N8}$  (рис. 3) в сеть нулевого провода, из которых будет состоять вектор-столбец задающих токов  $\underline{I}$  в схеме замещения на рис. 3:

$$I_{N1} = I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = 5,33e^{-j157,39} \text{ А}, I_{N2} = I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} = 5,03e^{-j178,37} \text{ А};$$

$$I_{N3} = I_{A3} + I_{C3} = 15,64e^{-j144,15} \text{ А}, I_{N4} = I_{B4} + I_{C4} = 4,51e^{-j179,25} \text{ А};$$

$$I_{N5} = I_{B5} + I_{C5} = 9,30e^{j156,78} \text{ А}, I_{N6} = I_{A6} + I_{B6} = 3,94e^{j43,51} \text{ А};$$

$$I_{N7} = I_{B7} = 10,00e^{j88,21} \text{ А}, I_{N8} = I_{A8} = 20,00e^{-j31,79} \text{ А}.$$

Вычислим элементы матрицы  $\underline{Y}_y$ . Собственные проводимости узлов равны:

$$y_{11} = 1/z_{N01} + 1/z_{N12} = 9,15 - j4,77 \text{ См}; \quad y_{22} = 1/z_{N12} + 1/z_{N23} + 1/z_{N26} = 9,67 - j5,04 \text{ См};$$

$$y_{33} = 1/z_{N23} + 1/z_{N34} + 1/z_{N39} = 8,93 - j4,60 \text{ См}; \quad y_{44} = 1/z_{N34} + 1/z_{N45} = 9,16 - j4,77 \text{ См};$$

$$y_{55} = 1/z_{N45} + 1/z_{N59} = 3,61 - j1,83 \text{ См}; \quad y_{66} = 1/z_{N26} + 1/z_{N67} + 1/z_{N68} = 5,17 - j2,69 \text{ См};$$

$$y_{77} = 1/z_{N67} + 1/z_{N79} = 0,68 - j0,30 \text{ См}; \quad y_{88} = 1/z_{N68} = 2,16 - j1,13 \text{ См};$$

$$y_{99} = 1/z_{N09} + 1/z_{N39} + 1/z_{N59} + 1/z_{N79} = 0,80 + j0 \text{ См}.$$

Взаимные проводимости узлов:

$$y_{12} = -1/z_{N12} = -4,07 + j2,12 \text{ См}; \quad y_{23} = -1/z_{N23} = -3,18 + j1,66 \text{ См};$$

$$y_{26} = -1/z_{N26} = -2,42 + j1,26 \text{ См}; \quad y_{34} = -1/z_{N34} = -5,65 + j2,95 \text{ См};$$

$$y_{45} = -1/z_{N45} = -3,51 + j1,83 \text{ См}; \quad y_{67} = -1/z_{N67} = -0,58 + j0,30 \text{ См};$$

$$y_{68} = -1/z_{N68} = -2,16 + j1,13 \text{ См}; \quad y_{39} = y_{59} = y_{79} = -1/z_{N39} = -0,10 + j0 \text{ См}.$$

В результате решения системы линейных уравнений (2) определяем вектор-столбец комплексных напряжений в узлах нулевого провода относительно потенциала нейтрали 0,38 кВ питающего трансформатора в ТП 6-20/0,38 кВ, зная которые определим токи, падения напряжения и потери мощности в ветвях нулевого провода:

$$U_{N1} = 2,62e^{-j131,77} \text{ В}; \quad U_{N2} = 4,86e^{-j127,55} \text{ В}; \quad U_{N3} = 11,61e^{-j136,58} \text{ В};$$

$$U_{N4} = 13,30e^{-j141,67} \text{ В}; \quad U_{N5} = 15,04e^{-j147,23} \text{ В}; \quad U_{N6} = 3,41e^{-j2,51} \text{ В};$$

$$U_{N7} = 12,12e^{-j101,49} \text{ В}; \quad U_{N8} = 11,61e^{-j3,74} \text{ В}.$$

$$\Delta U_{N01} = U_{N1} = 2,62e^{-j131,77} \text{ В}; \quad \Delta U_{N12} = U_{N2} - U_{N1} = 2,26e^{-j122,67} \text{ В};$$

$$\Delta U_{N23} = U_{N3} - U_{N2} = 6,85e^{-j142,98} \text{ В}; \quad \Delta U_{N34} = U_{N4} - U_{N3} = 2,02e^{-j172,35} \text{ В};$$

$$\Delta U_{N45} = U_{N5} - U_{N4} = 2,22e^{j177,23} \text{ В}; \quad \Delta U_{N26} = U_{N6} - U_{N2} = 7,37e^{j30,18} \text{ В};$$

$$\Delta U_{N67} = U_{N7} - U_{N6} = 13,36e^{j115,84} \text{ В}; \quad \Delta U_{N68} = U_{N8} - U_{N6} = 8,19e^{-j4,25} \text{ В};$$

$$I_{N01} = \Delta U_{N01} \cdot 1/z_{N01} = 15,01e^{-j159,31} \text{ А}; \quad I_{N12} = \Delta U_{N12} \cdot y_{12} = 10,38e^{-j150,20} \text{ А};$$

$$I_{N23} = \Delta U_{N23} \cdot y_{23} = 24,55e^{-j170,52} \text{ А}; \quad I_{N34} = \Delta U_{N34} \cdot y_{34} = 12,85e^{j160,12} \text{ А};$$

$$I_{N45} = \Delta U_{N45} \cdot y_{45} = 8,78e^{j149,70} \text{ А}; \quad I_{N26} = \Delta U_{N26} \cdot y_{26} = 20,14e^{j2,65} \text{ А};$$

$$I_{N67} = \Delta U_{N67} \cdot y_{67} = 8,76e^{j88,30} \text{ А}; \quad I_{N68} = \Delta U_{N68} \cdot y_{68} = 20,00e^{-j31,79} \text{ А}.$$

После расчета режима нулевого провода распределительной линии 0,38 кВ определяются напряжения фазных проводов в узлах подключения нагрузки.



Таблица 4

Результаты расчета режима схемы распределительной линии с учетом повторных заземлений нулевого провода (рис. 1)

Номер узла начала ветви	Номер узла конца ветви	Тип провода	Токи ветвей, А	Падения напряжения, В	Потери мощности, Вт	Напряжение узла конца ветви
0	1	A	$32,20e^{-j31,79}$	$3,36e^{-j33,79}$	124,42	$228,21e^{j0,47}$
		B	$35,00e^{j88,21}$	$4,85e^{j152,06}$	147,00	$226,90e^{j119,35}$
		C	$49,90e^{-j151,79}$	$9,60e^{-j122,42}$	298,80	$221,41e^{-j119,90}$
		N	$15,01e^{-j159,31}$	$2,62e^{-j131,77}$	33,79	$2,62e^{-j131,77}$
1	2	A	$29,40e^{-j31,79}$	$4,35e^{-j24,59}$	127,93	$224,28e^{j0,94}$
		B	$29,60e^{j88,21}$	$4,67e^{j146,77}$	129,67	$222,76e^{j118,80}$
		C	$41,30e^{-j151,79}$	$9,53e^{-j119,84}$	211,33	$211,87e^{-j119,90}$
		N	$10,38e^{-j150,20}$	$2,26e^{-j122,67}$	20,84	$4,86e^{-j127,55}$
2	3	A	$2,40e^{-j31,79}$	$6,42e^{-j140,15}$	1,09	$229,31e^{j1,95}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$7,03e^{-j163,15}$	22,10	$221,42e^{j117,02}$
		C	$31,90e^{-j151,79}$	$13,73e^{-j130,67}$	192,78	$198,40e^{-j119,16}$
		N	$24,55e^{-j170,52}$	$6,85e^{-j142,98}$	149,06	$11,61e^{-j136,58}$
3	4	A	0	$2,02e^{-j172,35}$	0	$231,32e^{j2,00}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$2,85e^{j161,51}$	12,43	$219,39e^{j116,50}$
		C	$15,20e^{-j151,79}$	$3,52e^{-j146,30}$	24,62	$195,27e^{-j118,69}$
		N	$12,85e^{j160,12}$	$2,02e^{-j172,35}$	22,98	$13,30e^{-j141,67}$
4	5	A	0	$2,22e^{j177,23}$	0	$233,53e^{j1,95}$
		B	$8,40e^{j88,21}$	$3,48e^{j153,04}$	12,11	$216,60e^{j115,95}$
		C	$10,00e^{-j151,79}$	$3,62e^{-j152,34}$	17,17	$192,27e^{-j118,09}$
		N	$8,78e^{j149,70}$	$2,22e^{j177,23}$	17,27	$15,04e^{-j147,23}$
2	6	A	$23,20e^{-j31,79}$	$13,78e^{j16,15}$	133,83	$211,01e^{-j0,04}$
		B	$14,40e^{j88,21}$	$8,46e^{j60,42}$	51,56	$218,45e^{j120,69}$
		N	$20,14e^{j2,65}$	$7,37e^{j30,18}$	131,67	$3,41e^{-j2,51}$
6	7	B	$10,00e^{j88,21}$	$25,66e^{j118,34}$	103,60	$192,81e^{j121,00}$
		N	$8,76e^{j88,30}$	$13,36e^{j115,84}$	103,77	$12,12e^{j101,49}$
6	8	A	$20,00e^{-j31,79}$	$14,8e^{-j1,89}$	111,30	$196,22e^{j0,10}$
		N	$20,00e^{-j31,79}$	$8,19e^{-j4,25}$	145,32	$11,61e^{-j3,74}$
Итого		A	–	–	498,56	–
		B	–	–	478,47	–
		C	–	–	785,81	–
		N	–	–	624,71	–

На основе анализа данных табл. 3 и 4 можно сделать следующие выводы. При учете повторного заземления токи в нулевом проводе в большинстве случаев уменьшились. Их значения были равны: по ветвям схемы без учета повторного заземления 16,48, 11,80, 26,33, 13,55, 9,30, 20,29, 10,00 и 20,00 А, при учете повторного заземления – 15,01, 10,38, 24,55, 12,85, 8,78, 20,14, 8,76 и 20,00 А, что привело к снижению суммарных потерь активной мощности в нулевом проводе линии более чем на 10 %, с 698,21 до 624,71 кВт. Токораспределение в фазных проводах остается

без изменения. Снижается и выравнивается несимметрия фазных напряжений, например, в узле 5 модули напряжений фаз «А», «В» и «С» были соответственно 234,43 В, 217,48 В и 190,64 В, стали 233,53 В, 216,60 В и 192,27 В.

#### **Заключение**

1. Предложена методика учета повторного заземления нулевого провода при расчете режимов и потерь мощности в сетях 0,38 кВ с использованием метода узловых напряжений, позволяющая уточнять режимные параметры нулевого провода, в условиях эксплуатации и при проектировании.

2. Учет повторного заземления нулевого провода оказывает положительное влияние на параметры режима и потери мощности в сети 0,38 кВ, причем сила влияния прямо пропорциональна степени несимметрии токов нагрузки фаз и обратно пропорциональна сопротивлению заземляющих устройств и заземлителей.

#### **Литература**

1. Фурсанов, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск : УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 207 с. : ил.
2. Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 496 с. : ил.
3. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 648 с. : ил.
4. Идельчик, В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В. И. Идельчик ; под ред. В. А. Веникова. – Москва : Энергия, 1977. – 192 с. : ил.
5. Брамеллер, А. Слабозаполненные матрицы: анализ электроэнергетических систем / А. Брамеллер, Р. Аллан, Я. Хэмэм ; пер. с англ. – Москва : Энергия, 1979. – 192 с. : ил.

*Получено 31.08.2007 г.*