

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3.053.21

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-74-82



Изменение режима работы системы электроснабжения сети 6 кВ при переходе от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной

Надежда Петровна Кондратьева✉, *д-р техн. наук, профессор*¹

aep_isha@mail.ru✉

Андрей Алексеевич Шишов, *аспирант*¹

otverta@mail.ru

Владимир Федорович Сторчевой, *д-р техн. наук, профессор*²

v.storchevoy@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Роман Геннадьевич Большин, *канд. техн. наук, доцент*²

Bolshin@rgau-msha.ru;

Николай Егорович Кабдин, *канд. техн. наук, доцент*²

energo-nek@rgau-msha.ru

Андрей Александрович Цедяков, *старший преподаватель*²

andrey.tsedyakov@mail.ru

Лариса Вячеславовна Занфирова, *канд. пед. наук, доцент*²

lara.zlv@yandex.ru

¹ Ижевская государственная сельскохозяйственная академия; 426069, Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Существующая система электрической сети 6 кВ тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края» с изолированной нейтралью не обеспечивает её надежную работу. Короткие однофазные замыкания в сети приводят к возникновению феррорезонансных явлений, множественным коротким замыканиям и выходу из строя участков ЛЭП и электрооборудования сети, вплоть до полной остановки производства тепличного комплекса. С целью устранения феррорезонансных процессов, перенапряжений в электрической сети и повышения надежности системы электроснабжения тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края» проведен анализ эффективности работы системы электроснабжения сети 6 кВ при её переходе от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной. Проведенные расчеты ёмкостных токов секций электрической сети комплекса показали превышение их допустимых значений, в связи с чем принято решение о модернизации системы заземления нейтрали электрической сети тепличного комплекса путем перехода на заземление нейтрали через низкоомный резистор, используемый в серийно выпускаемых шкафах трансформаторов заземления нейтрали с резисторами 100 Ом для сетей 6 кВ. Изменение режима работы системы электроснабжения высоковольтной сети тепличного комплекса при переходе от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной позволило обеспечить надежную работу электрической сети комплекса без перерывов электроснабжения и отключения её потребителей – теплиц комплекса. Модернизация сети позволила увеличить величину тока в месте однофазного короткого замыкания на землю и немедленно селективно отключать поврежденные линии сети, тем самым исключая повторные короткие замыкания в ЛЭП и повреждения электрооборудования по причине феррорезонансных явлений. При этом также уменьшается вероятность появления перемежающихся коротких замыканий, перенапряжения в сети и поражения электрическим током персонала и посторонних лиц.

Ключевые слова: сети с изолированной нейтралью, заземление нейтрали, однофазное замыкание на землю, воздушные линии, изоляции, системы электроснабжения, сети 6 кВ, «Овощи Краснодарского края», от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной

Формат цитирования: Кондратьева Н.П., Шишов А.А., Сторчевой В.Ф., Большин Р.Г., Кабдин Н.Е., Цедяков А.А., Занфирова Л.В. Изменение режима работы системы электроснабжения сети 6 кВ при переходе от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 2. С. 74-82. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-74-82>.

Кондратьева Н.П., Шишов А.А., Сторчевой В.Ф., Большин Р.Г., Кабдин Н.Е., Цедяков А.А., Занфирова Л.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Changing the operating mode of the 6 kV power supply system when switching from the isolated to the resistive-grounded neutral

Nadezhda P. Kondrateva[✉], DSc (Eng), Professor¹
aep_isha@mail.ru[✉]

Andrey A. Shishov, postgraduate student¹
otverta@mail.ru

Vladimir F. Storchevoy[✉], DSc (Eng), Professor
v.storchevoy@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>

Roman G. Bolshin, CSc (Eng), Associate Professor²
Bolshin@rgau-msha.ru

Nikolay E. Kabdin, CSc (Eng), Associate Professor²
energy-nek@rgau-msha.ru

Andrey A. Tsedyakov, Senior Lecturer²
andrey.tsedyakov@mail.ru

Larisa V. Zanfirova, CSc (Ed), Associate Professor²
lara.zlv@yandex.ru

¹ Izhevsk State Agricultural Academy; 11, Studencheskaya Str., Izhevsk, 426069, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The existing system of the electric network 6 kV used in the greenhouse facilities “Ovoshchi Krasnodarskogo kraya” with the insulated neutral does not ensure its reliable operation. Short single-phase short circuits in the network lead to ferroresonance, multiple short circuits and failure of power line sections and electrical equipment of the network up to the complete halting of greenhouse production. To eliminate ferroresonance processes and overvoltages in the electrical network and increase the reliability of the electrical supply system of the greenhouse facilities “Ovoshchi Krasnodarskogo kraya”, the authors have analyzed the efficiency of an electrical supply system of 6kV network at its transition from the isolated neutral to the resistive-earthed neutral. They have determined the values of the capacitive currents of the electric network sections of the greenhouse facilities to show the excess of their allowable values. Based on the results obtained, they have stated the need for the modernization of the neutral grounding system of the electric network of the greenhouse facilities by transition to the neutral grounding through the low resistors used in commercially available transformer neutral grounding cabinets with the resistors 100 ohm for the 6 kV networks. The change in operating mode of the high-voltage network of the greenhouse enterprise from the isolated neutral to the resistive-grounded neutral ensured its reliable operation without interruptions of power supply and disconnection of its consumers. The network modernization has increased the current at the point of a single-phase short circuit to ground and provided the possibility of an immediate shut down of the damaged lines, thereby avoiding repeated short circuits in power lines and damage of electric equipment caused by ferroresonance. It has also reduced the probability of intermittent short-circuits, overvoltage in the network and electric shock to personnel and bystanders.

Keywords: isolated neutral networks, neutral grounding, single phase-to-ground fault, overhead lines, isolation, power supply systems, 6 kV network, “Ovoshchi Krasnodarskogo kraya”, transition from the isolated to the resistive-grounded neutral

For citation: Kondrateva N.P., Shishov A.A., Storchevoy V.F., Bolshin R.G., Kabdin N.E., Tsedyakov A.A., Zanfirova L.V. Changing the operating mode of the 6 kV power supply system when switching from the isolated to the resistive-grounded neutral. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(2):74-82. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-74-82>

Введение. В нашей стране в большинстве сетей среднего напряжения 6-35 кВ используется режим изолированной нейтрали. Если сила тока однофазного короткого замыкания на землю в сетях с железобетонными или металлическими опорами не превышает 10 А, то отключение не производится, а осуществляется сигнализация о замыкании на землю. Поиск места однофазного короткого замыкания на землю и ремонт

поврежденного участка ЛЭП, как правило, проводятся в течение не более 2 ч¹, в исключительных случаях – до 6 ч².

В соответствии с данными эксплуатации в электрических сетях среднего напряжения первопричинами нарушений электроснабжения потребителей (более 70% от общего числа повреждений) являются однофазные короткие замыкания на землю, сопровождающиеся

¹ Лецинская Т.Б., Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства: Учебник. М.: БИБКМ, ТРАНСЛОГ, 2015. 656 с.

² Инструкция. СОУ-Н МПЕ 40.1.20.563:2004. Ликвидация аварий и технологических нарушений режима на энергопредприятиях и в энергообъединениях. Государственное предприятие ДонОРГРЕС, 2005. 60 с.

аварийными отключениями линий электропередачи и значительным экономическим ущербом [1-3].

Одной из основных проблем при эксплуатации разветвленных сетей среднего напряжения 6-35 кВ являются однофазные короткие замыкания на землю, вызываемые перемежающейся дугой – возникающим током при снижении сопротивления изоляции электроустановок. При прохождении синусоидального напряжения через ноль дуга погасает и вновь возникает при нарастании напряжения. Перемежающиеся короткие замыкания приводят к перезарядке емкостей фаз и повышению напряжения в сети до значительных перенапряжений.

Изменение (повышение) напряжения в сети, состоящей из активных элементов, емкостей фаз и индуктивностей (обмоток трансформаторов с ферромагнитными сердечниками), может привести к возникновению феррорезонансных явлений, сопровождающихся перенапряжениями в сети, а также к её многоместным повреждениям – повторным коротким замыканиям на участках сети с ослабленной изоляцией [4].

Обнаружение мест повреждений изоляции затруднено в связи с нестабильными свойствами изоляции электроустановок сети, изменяющихся в зависимости от условий окружающей среды и материала изоляции.

Режим изолированной нейтрали в сетях среднего напряжения характеризуется большой вероятностью возникновения перемежающейся дуги, повышением напряжения и перенапряжением в сети, вероятностью возникновения явления феррорезонанса при повышении напряжения сети, приводящего к перенапряжениям в сети.

Феррорезонанс приводит к возникновению многоместных повреждений изоляции (одновременное повреждение

изоляции на нескольких участках сети) при перенапряжениях включая повреждения обмоток трансформаторов напряжения – как силовых, так и измерительных; усложняет обнаружение места временного ослабления изоляции электроустановок сети и мест короткого замыкания (места замыкания в сети); приводит к нестабильной работе релейных защит при однофазных замыканиях и опасности электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети.

Во многих странах мира не используется режим изолированной нейтрали в сетях среднего напряжения 6-35 кВ, а применяется режим заземления нейтрали через низкоомный или высокоомный резистор (чаще), или через дугогасящий реактор с отключением поврежденной линии или селективной сигнализацией о коротком замыкании в сети⁴.

В России с 2003 г. в соответствии с п. 1.2.16 ПУЭ⁵ разрешена работа сети 6-35 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор, или резистор. В научно-технических документах нет рекомендаций о применении того или иного режима заземления в сетях среднего напряжения.

Цель исследований: оценка результатов модернизации системы заземления нейтрали электрической сети 6 кВ тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края» путем перехода от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной.

Материал и методы. Основным источником электроснабжения тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края» является газотурбинная электростанция (ГТЭС) с 4 газотурбинными электрогенераторами (ГТЭ) общей установленной мощностью 24 МВт, напряжением 6 кВ, предназначенная для электроснабжения потребителей – теплиц комплекса (рис. 1).

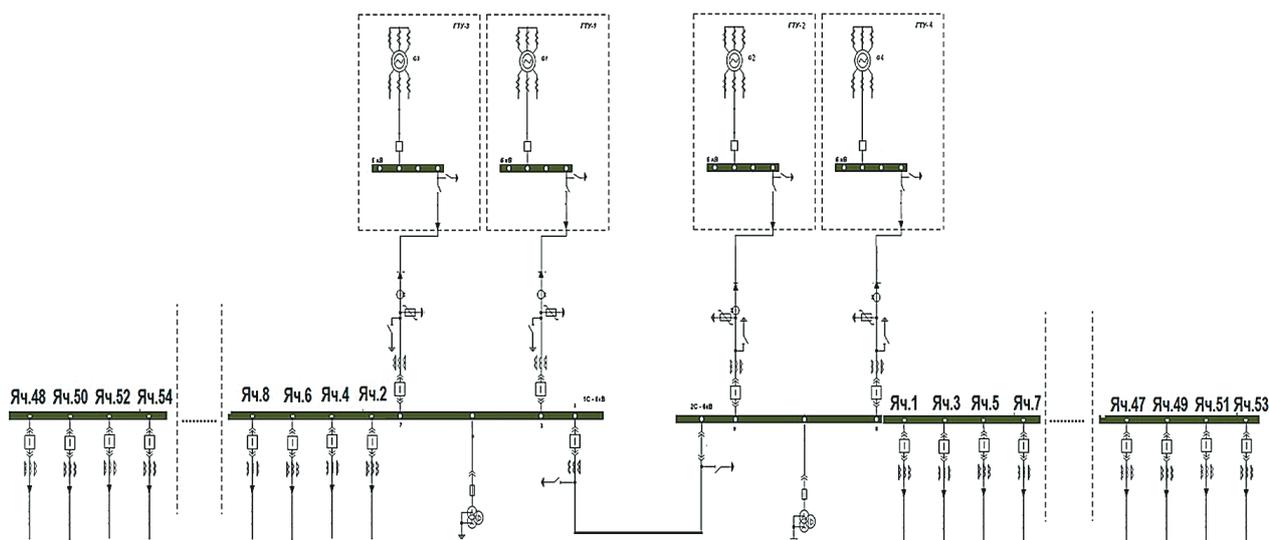


Рис. 1. Однолинейная схема электрической сети тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края»
 Fig. 1. Single-line diagram of the electric network of the greenhouse facilities “Ovoshchi Krasnodarskogo kraya”

³ Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей: монография. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.
⁴ СТО 34.01-2.2-033-2017 ПАО «Россети». Линейное коммутационное оборудование 6-35 кВ – секционированные пункты (реклоузеры). Т. 1.2. Секционированные пункты (реклоузеры). М., 2017. 22 с.
⁵ Правила устройства электроустановок. [Электронный ресурс]. URL: <http://pue7.ru/pue7/sod.php> (дата обращения: 19.06. 2022).

В данной сети для приема и распределения электроэнергии потребителям предусмотрено двухсекционное закрытое распределительное устройство ЗРУ 6 кВ, состоящее из 54 шкафов-ячеек. Одна секция шин ЗРУ получает электроэнергию по кабельным линиям первого и второго ГТЭ ГТЭС, вторая секция – по кабельным линиям третьего и четвертого ГТЭ ГТЭС (табл. 1).

Потребители комплекса получают электроэнергию от 21 силового трансформатора 6/0,4 кВ (20 трансформаторов используются для электроснабжения теплиц, и один – для собственных нужд комплекса), подключенного к соответствующим шинам ЗРУ через вакуумные выключатели кабельными или кабельно-воздушными линиями (табл. 1). Воздушные линии электропередачи электрической сети комплекса выполнены на металлических опорах. Силовой трансформатор собственных нужд подключен к первой секции шин ЗРУ кабельно-воздушной линией.

Первая категория надежности электроснабжения теплиц комплекса обеспечивается за счет следующих мероприятий:

- питания каждого из 20 силовых трансформаторов блоков теплиц комплекса от 1-й и 2-й секций шин ЗРУ по двум линиям электропередачи примерно равной длины: 16 трансформаторов – по 32 кабельным линиям; 4 трансформатора – по 8 кабельно-воздушным линиям электропередачи (табл. 1);

- объединения 1-й и 2-й секций шин ЗРУ через секционный выключатель (СВ) системы автоматического включения резерва (АВР) при аварийных ситуациях в системе электроснабжения;

- возможности питания 1-й и 2-й секций шин ЗРУ от резервных дизельных электростанций (ДЭС) (на схеме рисунка они 1 не показаны).

Защита электрической сети от ненормальных режимов работы обеспечивается с помощью компактного микропроцессорного терминала серии «ТОР 200-16К». Система заземления нейтрали – тип IT (нейтраль источника изолирована, а открытые проводящие части заземлены). Защита от токов однофазного короткого замыкания на землю не предусмотрена, осуществлялась неселективная сигнализация о замыкании на землю. Дополнительно к релейной защите в отсеках выключателей установлены датчики дуговой защиты, реагирующие на повышение давления в ячейках ЗРУ 6 кВ при появлении электрической дуги.

Результаты и их обсуждение. За 2018-2019 гг. в электрической сети 6 кВ тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края» зарегистрировано 19 случаев однофазного замыкания на землю, 4 из которых привели к множественным коротким замыканиям в сети тепличного комплекса, полной остановке производства и ремонту поврежденных участков ЛЭП с продолжительностью 6-9 ч.

Для оценки работы электрической сети тепличного комплекса (рис. 1) и выбора защиты от однофазных

замыканий на землю (ОЗЗ) проведем расчет ёмкостных токов сети. При замыкании фазы на землю в сети с изолированной нейтралью в точке короткого замыкания через место повреждения будет проходить суммарный ток, определяемый емкостями неповрежденных фаз всей остальной сети (ёмкость поврежденной фазы в создании этого тока не участвует, так как она зашунтирована в месте замыкания на землю) [5, 6]. Ток поврежденной фазы возвращается в сеть через ёмкости неповрежденных фаз.

Исходные данные для расчета ёмкостных токов электрической сети 6 кВ приняты на основании рабочей документации проекта системы электроснабжения тепличного комплекса для кабельных и воздушных линий сети, электрогенераторов ГТЭС и силовых трансформаторов 6/0,4 кВ тепличного комплекса (табл. 1).

Ёмкостные токи i -элементов электрической сети I_{ci} рассматриваемого объекта определены в соответствии с типовой инструкцией по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ⁶ [6]:

– кабельной линии

$$I_{ci,кл} = I_{i,кл} \cdot 3U_{\phi} \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_{i,кл}; \quad (1)$$

– воздушной линии (по эмпирической формуле)

$$I_{ci,вл} = \frac{U_{л} \cdot I_{i,вл}}{350}, \quad (2)$$

где U_{ϕ} , $U_{л}$ – соответственно фазное, линейное напряжение сети, В; f – частота сети, Гц; $I_{i,кл}$, $I_{i,вл}$ – соответственно длина i -кабельной, i -воздушной линий, км; $C_{i,кл}$ – ёмкость одной фазы i -кабельной линии относительно земли, Ф/км.

Длина кабельных и воздушных линий принята в соответствии с рабочим проектом системы электроснабжения тепличного комплекса (рис. 1), а ёмкости фазы КЛ – в соответствии с техническими характеристиками кабеля завода-изготовителя.

При расчете тока замыкания на землю ёмкостной ток электрогенераторов ГТЭС и силовых трансформаторов КТП 6/0,4 кВ на стороне 6 кВ не учитывается ввиду того, что при рабочей частоте 50 Гц созданные емкостями сопротивления в обмотках весьма велики, соответственно создаваемые ёмкостные токи пренебрежительно малы.

Длины i -кабельных вводов от электрогенераторов ГТЭС и i -кабельных или i -кабельно-воздушных линий силовых трансформаторов КТП 6/0,4 кВ определены в соответствии с рабочим проектом системы электроснабжения тепличного комплекса и внесены в таблицу 1. Определение ёмкостных токов кабельных линий комплекса I_{ci} проведено по выражению (1). Определение ёмкостных токов кабельно-воздушных линий комплекса I_{ci} проведено суммированием результатов расчета, соответственно полученным по выражениям (1) и (2). Результаты расчетов ёмкостных токов сведены в таблицу 1.

⁶ РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87). Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ.

Таблица 1

Расчётные значения ёмкостных токов, $I_{сг}$

Table 1

Calculated values of capacitive currents, $I_{сг}$

№ ячейки ЗРУ <i>Switchgear cell No.</i>	Номера линии и трансформатора <i>No. of the line and transformer</i>	Длина КЛ, км <i>Length of CL, km</i>	Длина ВЛ, км <i>Length of AL, km</i>	$I_{сг}$, А
1	Линия 1-1тр	0,045	–	0,050
2	Линия 22-1тр	0,045	–	0,050
3	Линия 2-2 тр	0,265	–	0,263
4	Линия 23-2 тр	0,265	–	0,263
5	Линия 3-3 тр	0,680	–	0,676
6	Линия 24-3 тр	0,680	–	0,676
7	Линия 4-4 тр	0,200	19,68	0,577
8	Линия 25-4 тр	0,200	19,70	0,578
9	Линия 5-5 тр	0,785	–	0,780
10	Линия 26-5 тр	0,785	–	0,780
11	Линия 6-6 тр	0,400	–	0,439
12	Линия 27-6 тр	0,400	–	0,439
13	Линия 7-7 тр	0,930	–	0,924
14	Линия 28-7тр	0,930	–	0,924
15	Линия 8-8тр	1,085	–	1,190
16	Линия 29-8тр	1,085	–	1,190
17	Линия 9-9тр	1,160	–	1,391
18	Линия 30-9тр	1,190	–	1,427
19	Линия 10-10тр	1,055	–	1,048
20	Линия 31-1тр	1,055	–	1,048
21	Линия 11-11тр	0,700	–	0,696
22	Линия 32-11тр	0,700	–	0,696
23	Линия 12-12тр	0,350	20,10	0,778
24	Линия 33-12тр	0,350	20,13	0,779
25	Линия 13-13тр	0,955	–	0,949
26	Линия 34-13тр	0,955	–	0,949
27	Ввод 1, Линия 42-1 ГТЭ	0,120	–	0,315
28	Ввод 2, Линия 43-2 ГТЭ	0,150	–	0,351
29	Ввод 3, Линия 44-3 ГТЭ	0,170	–	0,375
30	Ввод 4, Линия 45-4 ГТЭ	0,195	–	0,405
38	Линия 14-14 тр	0,560	–	0,556
40	Линия 35-14 тр	0,560	–	0,556
41	Линия 15-15 тр	0,390	–	0,388
43	Линия 36-15 тр	0,390	–	0,388
44	Линия 16-16 тр	0,170	17,050	0,496
45	Линия 37-16 тр	0,170	17,100	0,499
46	Линия 17-17 тр	1,350	2,400	1,660
47	Линия 38-17 тр	1,350	2,400	1,660
48	Линия 18-18 тр	0,900	1,093	1,120
49	Линия 19-19 тр	0,780	–	0,775
50	Линия 39-19 тр	0,780	–	0,775
51	Линия 20-20 тр	0,810	–	0,971
52	Линия 40-20 тр	0,810	–	0,971
53	Линия 21-21 тр	1,850	–	2,219
54	Линия 41-21 тр	1,850	–	2,219

В соответствии с результатами расчётов ёмкостных токов линий электрической сети комплекса суммарный расчетный ток замыкания на землю (при отключенном секционном выключателе 6 кВ) составит:

– в I-й секции шин ЗРУ 6 кВ:

$$I_{\Sigma c \text{ I c. ш.}} = I_{\Sigma c. л \text{ I c. ш.}} + I_{\Sigma c. ген \text{ I c. ш.}} = \sum_{i=1}^{21} I_{ci} + \sum_{i=42}^{43} I_{ci} = 17,944 + 0,666 = 18,61 \text{ (A)}; \quad (3)$$

– во 2-й секции шин ЗРУ 6 кВ:

$$I_{\Sigma c \text{ II c. ш.}} = I_{\Sigma c. л \text{ II c. ш.}} + I_{\Sigma c. ген \text{ II c. ш.}} = \sum_{i=22}^{41} I_{ci} + \sum_{i=44}^{45} I_{ci} = 16,866 + 0,784 = 17,65 \text{ (A)}, \quad (4)$$

где $I_{\Sigma c. л \text{ I c. ш.}}$, $I_{\Sigma c. л \text{ II c. ш.}}$ – соответственно суммарные расчетные токи замыкания на землю 1-й и 2-й секций шин ЗРУ 6 кВ линий электрической сети комплекса; $I_{\Sigma c. ген \text{ I c. ш.}}$, $I_{\Sigma c. ген \text{ II c. ш.}}$ – соответственно суммарные расчетные токи замыкания на землю 1-й и 2-й секций шин ЗРУ 6 кВ линий электрогенераторов ГТЭС.

Определим суммарный расчетный ток замыкания на землю 1-й и 2-й секций шин ЗРУ 6 кВ при включенном секционном выключателе по выражению:

$$I_{\Sigma c} = I_{\Sigma c \text{ I c. ш.}} + I_{\Sigma c \text{ II c. ш.}} = 18,61 + 17,65 = 36,26 \text{ (A)}. \quad (5)$$

Результаты расчетов длины кабельных, воздушных линий и суммарных токов замыкания на землю секций шин ЗРУ 6 кВ по выражениям (3)-(5) сведены в таблицу 2.

По ПУЭ работа сети в режиме с изолированной нейтралью, имеющей металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, допускается в тех случаях, когда суммарный ёмкостной ток $I_{\Sigma c}$ сети 6 кВ не превышает 10 А. В соответствии с проведенными расчетами ёмкостные токи секций ЗРУ превышают допустимый ток, равный 10 А, как при включенном, так и при выключенном секционном выключателе. Минимальный ток – $I_{\Sigma c} = 17,65 > 10 \text{ А}$ (табл. 2), следовательно, работа высоковольтной сети тепличного комплекса в режиме изолированной нейтрали является недопустимой^{7,8} [7].

Высокоомное резистивное заземление нейтрали применять нецелесообразно ввиду того, что данная система актуальна только в тех случаях, когда значения ёмкостных токов высокие, а сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме однофазного замыкания на землю до обнаружения места ОЗЗ. При этом ток в нейтрали должен составлять менее 10 А для исключения появления опасных дуговых перенапряжений и снижения электробезопасности, быть достаточным для определения поврежденного присоединения и работы системы селективной сигнализации об однофазном коротком замыкании на землю.

При заземлении нейтрали через низкоомный резистор в случаях ОЗЗ поврежденное присоединение отключается, и возможность возникновения феррорезонансных явлений в сети исключается. В связи с этим снижается вероятность пробоя изоляции на неповрежденных присоединениях и соответственно общее число ОЗЗ, что повышает надежность работы электрической сети.

Поскольку суммарный ток в электрической сети тепличного комплекса при однофазном коротком замыкании на землю превышает 10 А, то для предотвращения феррорезонансных явлений применимы низкоомный резистор с трансформатором заземления нейтрали (ТЗН) и система селективной защиты от однофазных коротких замыканий на землю [7].

Для заземления нейтрали сети тепличного комплекса принимаем резистор сопротивлением $R_N = 100 \text{ Ом}$, используемый в серийно выпускаемых шкафах ТЗН с резисторами 100 Ом для сетей 6 кВ. Изготовление ТЗН с иными характеристиками является нетиповым, что влияет на увеличение стоимости оборудования для заземления нейтрали и сроки его изготовления.

Определим величину ёмкостных токов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с резистивно-заземлённой нейтралью, то есть с резистором ТЗН сопротивлением $R_N = 100 \text{ Ом}$ (рис. 2).

Расчетные значения суммарных ёмкостных токов, $I_{\Sigma c}$

Таблица 2

Table 2

Design values of total capacitive currents, $I_{\Sigma c}$

Режим – однофазное замыкание на землю <i>Mode – single-phase earth fault</i>	Общая длина КЛ, км <i>Total length of CLs, km</i>	Общая длина ВЛ, км <i>Total length of OHL, km</i>	$I_{\Sigma c}$, А
I секция шин (СВ отключен) <i>Bus-bar section I (Bus section breaker off)</i>	15,42	60,323	18,61
II секция шин (СВ отключен) <i>Bus-bar section II (Bus section breaker switched off)</i>	14,55	59,330	17,65
Общая работа шин (СВ включен) <i>Total bus-bar operation (Bus section breaker switched on)</i>	29,57	119,653	36,26

⁷ Правила устройства электроустановок. [Электронный ресурс]. URL: <http://pue7.ru/pue7/sod.php> (дата обращения: 19.06.2022).

⁸ РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87). Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ.

Ток поврежденной фазы возвращается в сеть через ёмкости неповрежденных фаз, как и в режиме изолированной нейтрали. Поскольку резистор R подключен между нулевой точкой обмотки ВН (высокого напряжения) специального трансформатора заземления нейтрали ТЗН со схемой соединения обмоток Y/Δ и контуром заземления, в данной цепи в режиме однофазного замыкания на землю через резистор создается активный ток, превышающий емкостной, что позволяет селективно и быстро отключать поврежденный участок сети.

Величину активного тока, проходящего через резистор ТЗН сопротивлением $R_N = 100$ Ом, определим по выражению⁹:

$$I_R = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot R_N} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 34,68 \text{ А.} \quad (6)$$

При однофазном замыкании на землю ток однофазного замыкания на землю I_3 будет складываться из двух составляющих: тока однофазного замыкания на землю (табл. 1); тока I_R , протекающего через резистор R. В общем виде принцип формирования токов ОЗЗ представлен на рисунке 2.

Расчетный ток замыкания на землю в режиме резистивно-заземленной нейтрали (табл. 3) при включенном секционном выключателе 6 кВ представлен как

$$I_3 = \sqrt{(I_{\Sigma c})^2 + (I_R)^2} = \sqrt{36,26^2 + 34,68^2} = 50,17 \text{ (А)}, \quad (7)$$

где $I_{\Sigma c}$ – суммарный емкостной ток сети 6 кВ, А; I_R – ток заземляющего резистора, протекающий на поврежденном присоединении, А.

Расчетный ток замыкания на землю (при отключенном секционном выключателе 6 кВ) на I секции шин ЗРУ 6 кВ составит

$$I_3 = \sqrt{18,61^2 + 34,68^2} = 39,36 \text{ (А);}$$

на II секции –

$$I_3 = \sqrt{17,65^2 + 34,68^2} = 38,91 \text{ (А).}$$

Ток замыкания на землю с резистором $R_N = 100$ Ом в нейтрали увеличивается и обеспечивает надежную работу системы селективной защиты электрической сети от однофазных коротких замыканий на землю. Расчетная мощность трансформатора заземления нейтрали с резистором R_N определяется по формуле^{9,10}:

$$S \geq \frac{U_{ВН}^2}{(3 \cdot R_N)} = \frac{6000^2}{(3 \cdot 100)} = 120 \text{ кВА.} \quad (8)$$

Принимаем ближайшую большую мощность трансформатора заземления АО «Московский завод Электрощит», которое серийно выпускает шкаф заземления нейтрали (ШЗН) серии К-118УЗ. В нем установлены трансформатор типа ТСНЗ-160/6 мощностью 160 кВА. Резистор $R_N = 100$ Ом, примененный в схеме низкоомного резистивного заземления нейтрали, является нетермостойким, поэтому на случай редких, но возможных отказов защиты или выключателя присоединения с однофазного замыкания на землю на трансформаторе заземления нейтрали предусматривается защита нулевой последовательности, которая отключает ТЗН, переводя сеть в режим с изолированной нейтралью [8].

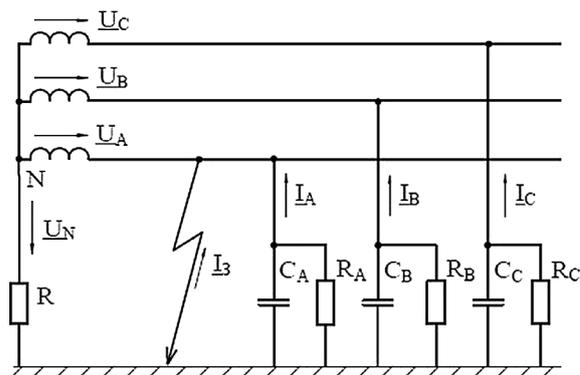


Рис. 2. Электрическая сеть с резистивным заземлением нейтрали
Fig. 2. Electrical network with resistive neutral grounding

Значение суммарных ёмкостных токов в режиме резистивно-заземленной нейтрали

Таблица 3

Table 3

The value of the total currents in the resistive-grounded neutral

Режим – однофазное замыкание на землю <i>Mode – single-phase earth fault</i>	Общая длина КЛ, км <i>Total length of CLs, km</i>	Общая длина ВЛ, км <i>Total length of OHL, km</i>	I_3 , А
I секция шин (СВ отключен) <i>I bus-bar section (Bus section breaker off)</i>	15,42	60,323	39,36
II секция шин (СВ отключен) <i>II bus-bar section (Bus section breaker switched off)</i>	14,55	59,330	38,91
Общая работа шин (СВ включен) <i>Total bus-bar operation (Bus section breaker switched on)</i>	29,57	119,653	50,17

⁹ Релейная защита распределительных сетей 6-10 кВ. Расчёт уставок: Методические указания. СПб., 2017. 74 с.

¹⁰ Рыжкова Е.Н., Раубаль Е.В. Режимы нейтрали систем электроснабжения: Учебное пособие. М.: МЭИ, 2015. 47 с.

Для обеспечения мероприятий при переходе от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной согласно предложенным техническим решениям предусмотрены следующие изменения:

- проведён монтаж двух комплектных шкафов ШЗН серии К-118УЗ в помещении ЗРУ 6 кВ с размещением в них трансформаторов заземления нейтрали, низкоомных резисторов и трансформаторов тока в нейтрали;

- шкафы заземления нейтрали ШЗН серии К-118УЗ установлены по одному на секцию, отдельно у стены (на случай возгорания в связи с нетермостойкостью резистора);

- подключены шкафы трансформаторов заземления нейтрали (ТЗН) к резервным ячейкам 6 кВ отходящих линий ЗРУ 6 кВ;

- в системе предусмотрена работа только одного ТЗН на общую секцию шин с организацией взаимной блокировки включения в ячейках ЗРУ 6 кВ, так как работа двух ТЗН на общую секцию шин 6 кВ является недопустимой.

С целью уравнивания потенциалов дополнительного оборудования в помещении ЗРУ 6 кВ все строительные и производственные конструкции, металлические корпуса оборудования, броня и экраны кабелей присоединены к главной шине заземления (ГЗШ) ЗРУ 6 кВ.

Список использованных источников

1. Кондратьева Н.П., Шишов А.А., Болшин Р.Г. Программа для определения неисправности воздушной линии в распределительных сетях 6/10 кВ: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2022611229 от 21.01.2022. Заяв. № 2022610178 от 11.01.2022. EDN: UKAINU.

2. Симаков Ю.П., Валькевич А.Н. Выбор режима нейтрали и ограничение перенапряжений в электрических сетях 6-35 кВ энергосистемы Кыргызстана // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2012. Т. 12, № 10. С. 30-32. EDN: SIUXYB.

3. Добрягина О.А., Кутумов Ю.Д., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. Влияние высших гармоник на переходные процессы при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 2. С. 30-40. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.2.030-040>

4. Овсянникова Е.А., Дубов В.В., Сосенков И.А. Современные электроизоляционные материалы // Инновационные подходы к развитию науки и производства регионов: взгляд молодых ученых: Материалы 48-й НПК студентов и молодых ученых. Тверь, 2020. С. 224-226. EDN: FEWWNY.

5. Ovchukova S., Kondrateva N., Shishov A. Digital technologies for the implementation of intelligent diagnostics of the isolation of power supply systems with isolated neutral in the operating mode // Advances of machine learning in clean energy and the transportation industry. 2021. С. 49-56.

6. Кондратьева Н.П., Ваштиев В.К., Радикова А.В., Шишов А.А. Повышение надежности эксплуатации электрооборудования и сетей 6-10 кВ при использовании цифровых технологий // Актуальные вопросы энергетики АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 100-летию плана ГОЭРЛО. 2021. С. 42-45. EDN: ZRHMME.

7. Ходунов С.М., Кондратьева Н.П., Шишов А.А. Система мониторинга изоляции распределительных установок в рабочем

За время эксплуатации с 2020 по 2023 гг. было зарегистрировано 14 отключений ЛЭП сети тепличного комплекса, связанных с однофазными замыканиями на землю, без отключения её потребителей – теплиц комплекса. Следовательно, изменение режима работы системы электроснабжения высоковольтной сети тепличного комплекса при переходе от изолированной нейтрали к резистивно-заземленной повысило надежность её работы.

Выводы

Модернизация системы электроснабжения тепличного комплекса «Овощи Краснодарского края» путем перехода на заземление нейтрали через низкоомный резистор сопротивлением 100 Ом привела к беспереывной работе электрической сети комплекса, повышению ее надежности за счет немедленного селективного отключения ЛЭП сети и уменьшения вероятности поражения электрическим током персонала и посторонних лиц при однофазных замыканиях на землю, а также отсутствия дугового перенапряжения в сети, исключения повторного замыкания в ЛЭП и повреждения электрооборудования сети ввиду феррорезонансных процессов.

References

1. Kondratieva N.P., Shishov A.A., Bolshin R.G. Program for determining an overhead line malfunction in 6/10 kV distribution networks: Certificate of state registration of the computer program RU2022611229, No. 2022610178, 2022 (In Rus.)

2. Simakov Yu.P., Valkevich A.N. Neutral mode selection and overvoltage limitation in the 6-35 kV electric networks of the Kyrgyz power system. *Vestnik KRSU*. 2012;12(10):30-32. (In Rus.)

3. Dobryagina O.A., Kutumov Yu.D., Shadrikova T.Yu., Shuin V.A. Influence of higher harmonics on transients during arcing earth faults in the 6-10 kv cable networks with the insulated neutral. *Vestnik IGEU*. 2020;2:30-40. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.2.030-040> (In Rus.)

4. Ovsyannikova E.A., Dubov V.V., Sosonov I.A. Modern electrical insulation materials. *Innovatsionnye podkhody k razvitiyu nauki i proizvodstva regionov: vzglyad molodykh uchennykh: Materialy 48-y NPK studentov i molodykh uchennykh*. Tver, 2020:224-226. (In Rus.)

5. Ovchukova S., Kondrateva N., Shishov A. Digital technologies for the implementation of intelligent diagnostics of the isolation of power supply systems with isolated neutral in the operating mode. In: *Advances of machine learning in clean energy and the transportation industry*. 2021. P. 49-56.

6. Kondratieva N.P., Vashtiev V.K., Radikova A.V., Shishov A.A. Improving the reliability of operation of electrical equipment and the 6-10 kV networks with the use of digital technologies. *Aktualnye voprosy energetiki APK: Materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu plana GOERLO*. 2021:42-45. (In Rus.)

7. Khodunov S.M., Kondratieva N.P., Shishov A.A. System of monitoring the operation of distribution installations in the operating mode. *Razvitie proizvodstva i rol agroinzhenernoy nauki v sovremennoy mire: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2021:301-304. (In Rus.)

режиме // Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 301-304. EDN: GYKXJX.

8. Цедяков А.А. Анализ датчиков тока для релейных защит и режимов замыканий на землю сельских распределительных сетей 6-10 кВ // Доклады ТСХА. 2021. Вып. 293. Ч. III. С. 39-42. EDN: RRYPKM.

Вклад авторов

Н.П. Кондратьева – концептуализация, методология, проведение исследования, руководство исследованием, создание черновика рукописи, администрирование проекта

А.А. Шишов – проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация данных

В.Ф. Сторчевой – концептуализация, методология, проведение исследования, руководство исследованием, создание черновика рукописи, администрирование проекта

Р.Г. Большин – проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи

Н.Е. Кабдин – верификация данных, создание черновика рукописи

А.А. Цедяков – формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование

Л.В. Занфирова – создание рукописи и ее редактирование

Н.П. Кондратьева, А.А. Шишов, В.Ф. Сторчевой, Р.Г. Большин, Н.Е. Кабдин, А.А. Цедяков, Л.В. Занфирова имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.06.2022; поступила после рецензирования и доработки 14.02.2023; принята к публикации 15.02.2023

8. Tsedyakov A.A. Analysis of current sensors for relay protection and ground connection modes of rural distribution networks of 6-10 kV. *Doklady TSKHA*. 2021;293(III):39-42. (In Rus.)

Contribution

N.P. Kondrateva – conceptualisation, methodology, conducting research and investigation, research management, manuscript draft writing, project administration

A.A. Shishov – conducting research and investigation, manuscript draft writing, data visualization

V.F. Storchevoy – conceptualization, methodology, conducting research and investigation, research supervision, manuscript draft curation, project administration

R.G. Bolshin – research management, data management, manuscript draft writing

N.E. Kabdin – data verification, manuscript draft writing

A.A. Tsedyakov – formal analysis, manuscript writing and editing

L.V. Zanfirova – manuscript writing and editing

N.P. Kondrateva, A.A. Shishov, V.F. Storchevoy, R.G. Bolshin, N.E. Kabdin, A.A. Tsedyakov, L.V. Zanfirova have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Received 09.06.2022; revised 14.02.2023; accepted 15.02.2023