

УДК 621 316.99
Шифр специальности ВАК 2.4.2, 2.4.1.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРА В НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 20 кВ МЕГАПОЛИСА НА ПАРАМЕТРЫ СРАБАТЫВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЗА

Рассматривается влияние характеристик резистора в сети 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали на параметры срабатывания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Определены параметры термической стойкости резисторов с учетом температурного коэффициента сопротивления активной части резистора и минимальное значение длительно допустимого тока при эксплуатации резисторов заземления нейтрали в электрической сети напряжением 20 кВ мегаполиса.



Шкаф КРУ 20 кВ

Фото: пресс-службы АО «ОЭК»

АВТОРЫ:
М.Ю. Львов, д. т. н.,
LvovMY@uneco.ru
А.А. Челазнов, д. т. н., ст. н. с
А.С. Долгов
В.В. Цуканов,
АО «ОЭК», Москва, Россия
В.Ф. Лачугин, д. т. н.,
НИУ «МЭИ», Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#электрическая сеть 20 кВ;
#резистор заземления нейтрали;
#максимальная токовая защита;
#токовая защита нулевой последовательности; #ступени селективности; #термическая стойкость

↓ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Львов М.Ю., Челазнов А.А., Долгов А.С., Цуканов В.В., Лачугин В.Ф. Влияние характеристик резистора в нейтрали электрической сети 20 кВ мегаполиса на параметры срабатывания устройств РЗА // Энергия единой сети. 2026. № 1 (80). С. 44–48.

©©

С 2000 г. в Москве развивается электрическая сеть напряжением 20 кВ, построенная по принципу низкоомного резистивного заземления нейтрали, при которой устройства релейной защиты обеспечивают отключение поврежденных линий при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) [1].

Заземление нейтрали сети 20 кВ выполнено с использованием резистора сопротивлением $R_N = 12 \text{ Ом}$, обеспечивающего при ОЗЗ активный ток 1000 А [2]. Применена схема, в которой резистор включается в нейтраль обмотки силового трансформатора со схемой соединения «звезда с нулевой точкой – звезда с нулевой точкой» (рис. 1).

При вводе новых подстанций 110–220/20 кВ применялись резисторы разных производителей с отличающимися параметрами, к основным из которых относятся: значение номинального длительно допустимого тока, допустимое время протекания расчетного тока 1000 А (время термической стойкости), температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

В таблице 1 приведены примеры основных параметров резисторов, эксплуатируемых в электрической сети 20 кВ г. Москвы.

Как известно, в настоящее время в России отсутствует ГОСТ с техническими требованиями на резисторы заземления нейтрали для электрических сетей среднего класса напряжения. Также в действующей нормативно-технической документации (НТД) отсутствуют требования к параметрам резисторов для низкоомного заземления нейтрали в сетях напряжением 20 кВ [3, 4]. Производители резисторов изготавливают их по своим техническим условиям (ТУ). Отметим, что в действующей НТД нет требований к термической стойкости резисторов заземления нейтрали и к значениям ТКС.

Низкоомный резистор заземления нейтрали подключается в нейтральную точку обмотки силового трансформатора 20/(110)220 кВ и является одним из основных элементов электрической сети 20 кВ. Надежность работы резистора непосредственно влияет на надежность работы сети.

Присоединения секций шин 20 кВ защищены с помощью максимальных токовых защит (МТЗ) и токовых

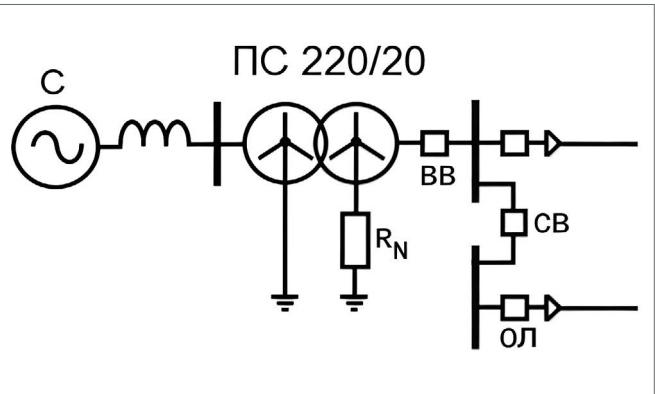


Рис. 1. Подключение резистора к нейтрали сети 20 кВ

защит нулевой последовательности (ТЗНП). Селективность их действия обеспечивается ступенчатым выбором параметров срабатывания по току и по времени. Длительность протекания тока нулевой последовательности через резистор в нейтрали питающего трансформатора подстанции не должна превышать время термической стойкости резистора. С учетом коэффициента запаса для сети 20 кВ длительность работы ТЗНП составляет 1,9 с [5].

При заданной допустимой продолжительности протекания аварийного тока через подключенный к нейтрали резистор $t_{\text{ТЗНП Р}} = 1,9 \text{ с}$ время срабатывания ТЗНП выключателя ввода (ВВ), секционного выключателя (СВ) и выключателя отходящей кабельной линии (КЛ), с учетом шага селективности $\Delta t_{\text{ТЗНП}} = 0,3 \text{ с}$, составляет:

- ТЗНП ВВ: $t_{\text{ТЗНП ВВ}} = 1,6 \text{ с}$,
- ТЗНП СВ: $t_{\text{ТЗНП СВ}} = 1,3 \text{ с}$,
- ТЗНП КЛ: $t_{\text{ТЗНП КЛ}} = 1,0 \text{ с}$.

Время работы МТЗ питающей подстанции определяется количеством последовательно включенных комплектов защиты (N_k), величиной ступени селективности (Δt_c) и уставкой первой ступени защиты на подстанции

Таблица 1. Основные параметры установленных резисторов

	Тип резистора	Производитель	Материал резистивного элемента	Номинальный длительно допустимый ток, А	Допустимое время протекания тока 1000 А, с	ТКС, 1/°С
1	Р30С3-20/20-У2	Россия	Нихромовая проволока	40	2,5	0,0002
2	FMA012KD000006	Франция	Нержавеющая сталь	100	2,5	0,0012
3	FMA012KD000008-01	Франция	Нержавеющая сталь	50	5,0	0,0012
4	NER-12-12000-20	Чехия	Нержавеющая сталь	40	2,5	0,00072
5	Р3-12-72000-20	Россия	Композиционный материал	56	10,4	- 0,000762*
6	JOVYATLAS 24NGR3.130	Германия	Нержавеющая сталь	40	2,5	0,00072
7	NER-12-12000-20	Чехия	Нержавеющая сталь	40	5,0	0,00072
8	РЗН-12-20-1	Россия	Нержавеющая сталь	40	10,0	0,00105

*Композиционный материал имеет отрицательный ТКС

потребителей ($t_{1, \text{MTЗ}}$). Уставки МТЗ на всех присоединениях превышают соответствующие значения уставок ТЗНП, поскольку МТЗ защищает шины и сеть за трансформатором потребителей, а ТЗНП отсекается треугольником трансформатора потребителей.

Значения уставок МТЗ и ТЗНП, определенные для $N_k = 5$, шага селективности $\Delta t_c = 0,3$ с и $t_{1, \text{MTЗ}} = 0,1$ с показаны на рис. 2.

При заданном значении $\Delta t_c = 0,3$ с ТЗНП охватывается два участка КЛ 20 кВ: от шин питающей подстанции (ПС) до шин распределительного пункта (РП) и от шин РП до шин подстанции потребителей (ТП).

Принятый алгоритм выбора параметров срабатывания защит приводит к тому, что в электрической сети 20 кВ на головном присоединении две ступенчатые токовые защиты (МТЗ и ТЗНП) действуют на отключение выключателя с разной выдержкой времени ($t_{\text{MTЗ КЛ}} = 1,6$ с и $t_{\text{ТЗНП КЛ}} = 1,0$ с) (рис. 2).

Когда запускается ТЗНП, имеющая меньшую выдержку времени по сравнению с нижестоящей МТЗ, возникает риск неселективной работы ТЗНП — она отключает присоединение при удаленном междуфазном коротком замыкании (КЗ), тогда как это отключение должно обеспечиваться нижестоящей МТЗ.

Для исключения подобного риска применяется перекрестная блокировка ТЗНП при пуске МТЗ.

В сети с низкоомным заземлением нейтрали близость параметров срабатывания по времени и по току обеих защит неоднократно становилась причиной неправильной работы ТЗНП.

На рис. 3 приведен пример неселективного действия МТЗ и ТЗНП в сети 20 кВ. Для нее указаны параметры сра-

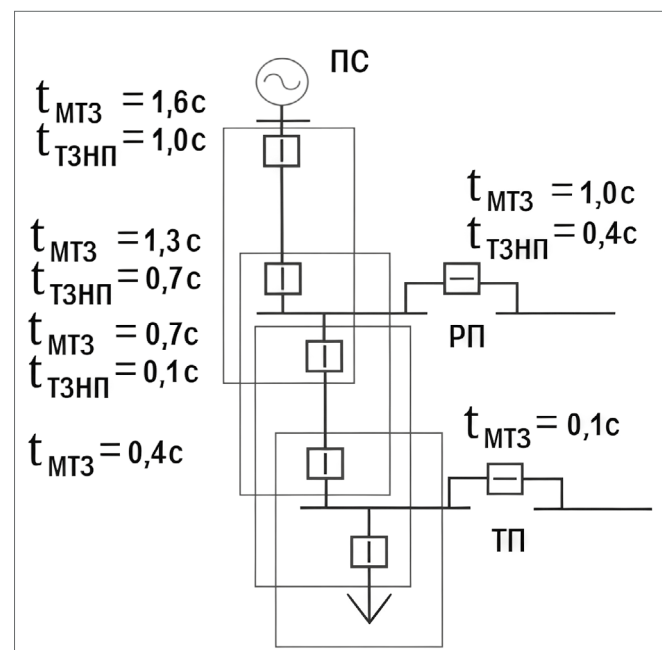


Рис. 2. Система ступенчатых защит электрической сети мегаполиса

батывания защит, определяющие последовательность событий при ОЗЗ на КЛ, отходящей от комплектного распределительного устройства (КРУ) подстанции 220/20 кВ.

В приведенном примере возникновение ОЗЗ привело к одновременному пуску МТЗ и ТЗНП с токами срабатывания $I_{\text{MTЗ КЛ}} = 880$ А и $I_{\text{ТЗНП КЛ}} = 300$ А. При пуске МТЗ работа ТЗНП, питающей КЛ, была заблокирована. Ток срабатывания МТЗ, установленной на секционном выключателе (МТЗ СВ), составил 2500 А, что исключило ее активацию. Поэтому МТЗ СВ не заблокировала ТЗНП СВ, в результате чего отключение поврежденной секции произошло от ТЗНП СВ (время срабатывания 1,3 с), а не от МТЗ КЛ. Неселективная работа защиты в данном случае была вызвана меньшим временем срабатывания ТЗНП по сравнению с уставкой МТЗ.

Помимо выведения блокировки защиты, избежать этого можно с помощью увеличения времени срабатывания ТЗНП, что требует повышения термической стойкости резисторов нейтрали.

Следует отметить, что расчет параметров срабатывания защит для всех подстанций 220/20 кВ г. Москвы выполняется по единой методике, ориентированной на минимальные значения времени термической стойкости эксплуатируемых резисторов, без учета различий их термических характеристик.

При подключении объектов к питающим центрам через подстанцию потребителей с собственными защитами не всегда удается обеспечить настройку ТЗНП питающих кабельных линий по времени срабатывания. Выдержки времени защиты на шинах потребителей (реальный пример МТЗ — 1,2 с, ТЗНП — 0,75 с), задаваемые условиями работы их сетей ограничивают количество ступеней селективности и обуславливают необходимость уменьшения их длительности. Это в ряде случаев приводит к неселективной работе ТЗНП при повреждениях на секциях шин в РП или ПС.

Значительные единичные мощности силовых трансформаторов и автотрансформаторов на питающих центрах, а также большая разветвленность электрической

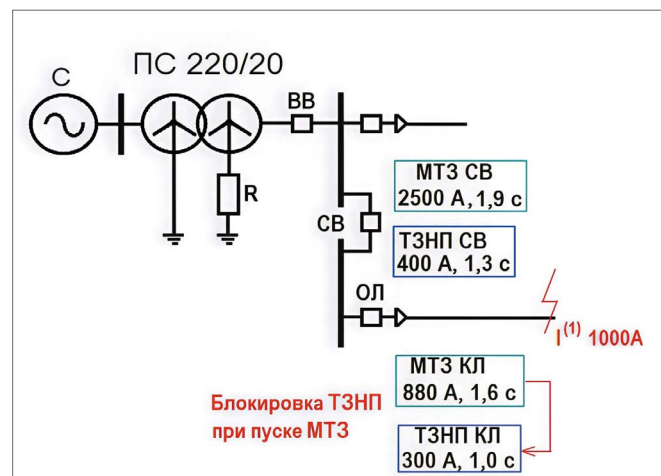


Рис. 3. Пример неселективного действия МТЗ и ТЗНП в сети 20 кВ

сети мегаполиса требуют новых решений для обеспечения селективности отключения поврежденного участка. Добавление новых присоединений приводит к росту ступеней защит и необходимости увеличения времени отключения. В этой ситуации к нейтрали нужно подключить резисторы с достаточно большим допустимым временем протекания максимального тока, позволяющим увеличить уставку ТЗНП защиты резистора. При этом требуется анализ минимального значения времени его термической стойкости.

При эксплуатации резистора нагрев его активной части в аварийном режиме может привести к повреждению и разрушению, в том числе с возникновением опасности возгорания.

Увеличение сопротивления резистивного элемента при протекании тока короткого замыкания приводит к уменьшению величины активного тока, что, в свою очередь, может привести к недопустимому уменьшению чувствительности ТЗНП, и, соответственно, к снижению надежности работы сети.

Конечное значение сопротивления резистивного материала при его нагреве, согласно стандарту IEEE Std C57.32–2015 [6], определяется в виде:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (1)$$

где R_0 — начальное значение сопротивления резистивного элемента;

R — конечное значение сопротивления резистивного элемента;

ΔT — изменение температуры;

α — ТКС.

Рост температуры нагрева резистора зависит от ряда факторов и в соответствии с [3, 7] определяется зависимостью:

$$\Delta T = -\frac{I^2 R_0}{\mu + \alpha I^2 R_0} \left[1 - \exp\left(\frac{\mu + \alpha I^2 R_0}{c} t\right) \right], \quad (2)$$

где I — значение тока замыкания на землю при ОЗЗ (принимается расчетное значение тока ОЗЗ, равное 1000 А);

C — значение полной теплоемкости резистивного элемента резистора;

μ — коэффициент теплоотдачи.

Проведение расчетов для определения значений ΔT в соответствии с (2) и определение конечного значения сопротивления резистора (1) должно проводиться отдельно для каждой выдержки времени срабатывания установленных защит, а именно: значение t при расчетах по формуле (2) принимается согласно установленному времени срабатывания указанных защит.

Результатом теплового расчета является сравнение полученных значений конечного сопротивления резистора, рассчитанного для каждой длительности установленных защит, с допустимым значением сопротивления резистора.

Для этого рассчитывается изменение сопротивления резистора в соответствии с формулой (1) по параметрам срабатывания ТЗНП отходящих кабельных линий $R_{\text{КЛ}}$, секционного выключателя $R_{\text{СВ}}$ и выключателя ввода $R_{\text{ВВ}}$ в кратковременном аварийном режиме.

Максимально допустимое значение сопротивления резистора $R_{\text{доп}}$, при котором обеспечивается нормированная чувствительность ТЗНП, определяется как [7]:

$$R_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{сраб.озз}}} - 0,1, \quad (3)$$

где $I_{\text{сраб.озз}}$ — минимальный ток срабатывания ТЗНП, А;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение резистора, В;

0,1 — сопротивление остальной части резистивного заземления нейтрали (кабель ввода для подключения резистора к нейтрали силового трансформатора/автотрансформатора, кабель вывода для соединения резистора с заземляющим проводником, контактные соединения шин, проводов, кабелей, заземляющего проводника), Ом.

Значение рассчитанных сопротивлений резистора $R_{\text{КЛ}}$, $R_{\text{СВ}}$ и $R_{\text{ВВ}}$ должны быть меньше $R_{\text{доп}}$.

Результаты исследований и выполненные расчеты для резисторов заземления нейтрали в электрической сети 20 кВ позволили определить требования к минимальному времени термической стойкости с учетом значений ТКС материала, применяемого при изготовлении резистивного элемента:

- Если резистивный элемент из нержавеющей стали, то ТКС должен быть не более 0,000263 1/°С, а время термической стойкости — не менее 5 с.

- Если резистивный элемент из композитного материала, то ТКС должен быть не менее –0,000762 1/°С, а время термической стойкости — не менее 7,9 с.

При несимметричных режимах в распределительной сети 20 кВ может возникнуть недопустимый длительный нагрев активной части резистивного элемента. Защита от несимметричных режимов (ЗНР) используется только на питающих центрах и выбирается по условию отстройки от длительно допустимого тока резистора.

Наиболее близкой к тепловой характеристике резистора является нормально инверсная времятоковая характеристика (рис. 4).

Для этой характеристики требования к расчету уставки по времени задаются выражением:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1} \cdot k, \quad (4)$$

где t — время отключения (определяется в зависимости от значения входящего тока), с;

k — уставка коэффициента умножения времени (0,05 ÷ 1,1) с шагом 0,01;

I — ток повреждения, А;

I_p — ток срабатывания, А.

Положение характеристики задается значением тока срабатывания I_p и коэффициентом k , определяющим степень отстройки характеристик. Селективность срабатывания выключателей КЛ, секционного ввода и резистора (КЛ, СВ, ВВ, РЕЗ, рис. 4) обеспечивается величиной $k = 1,0, 0,9, 0,8, 0,7$ соответственно.

Ток срабатывания I_p задает положение левой границы характеристик и определяется допустимым значением тока несимметрии по каналу нулевой последовательности. В настоящее время ток срабатывания ЗНР резистора в электрической сети мегаполиса составляет $I_{\text{ЗНР}} = 36$ А.

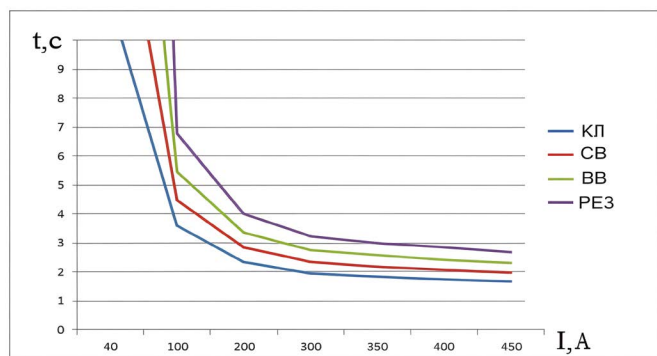


Рис. 4. Нормально инверсная времятоковая характеристика

Допустимое значение длительно протекающего тока для большинства резисторов сети мегаполиса равно $I_{\text{дл}} = 40$ А. Такое значение $I_{\text{дл}}$ накладывает ограничения на допустимое значение тока несимметрии в сети 20 кВ, что в ряде случаев может приводить к неселективному отключению присоединений.

ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» устанавливает допустимые уровни несимметрии напряжений в трехфазных системах. Согласно этому стандарту, коэффициент несимметрии напряжений нулевой последовательности не должен превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в 1 неделю и 4 % — в течение 100 % времени интервала в 1 неделю. Следовательно, для электрической сети 20 кВ значение напряжения нулевой последовательности U_0 при 4 % будет составлять:

$$U_0 = 4\% / 100\% \cdot 20000 / \sqrt{3} = 461,9 \text{ В.} \quad (5)$$

При таком напряжении ток нулевой последовательности I_0 (ток несимметрии) равен:

$$I_0 = 461,9 \text{ В} / 12 \text{ Ом} = 38,5 \text{ А.} \quad (6)$$

Следовательно, согласно ГОСТ 32144–2013, номинальный длительно допустимый ток должен быть не менее данного значения, а продолжительность протекания тока не должна иметь ограничения по времени. Анализ опыта эксплуатации электрической сети 20 кВ мегаполиса показывает, что несимметрия по напряжению может возникать у крупных потребителей с переменной нагрузкой. В распределительной сети были зафиксированы токи несимметрии на уровне 46 А, при этом продолжительность несимметричного режима составляла от нескольких секунд до нескольких минут.

Таким образом, резисторам заземления нейтрали, применяемым в электрической сети 20 кВ мегаполиса, целесообразно иметь значение номинального длительно допустимого тока не менее 50 А. Это позволяет фактически отстроиться от токов несимметрии в сети и повысить надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение сопротивления резистивного элемента резистора при его нагреве (при протекании тока короткого замыкания) приводит к уменьшению протекаемого через резистор активного тока. Это может привести к недопустимому уменьшению чувствительности ТЗНП при ОЗЗ и, соответственно, к снижению надежности эксплуатации электрической сети.
2. Увеличение числа селективных зон ТЗНП, необходимое для развития сети 20 кВ, может быть достигнуто с помощью увеличения времени срабатывания ТЗНП резистора и уменьшения длительности ступени селективности защит по времени срабатывания (до 0,2 с).
3. Минимальное значение длительно допустимого тока резистора должно позволять обеспечивать селективность действия устройств РЗА при протекании токов несимметрии с допустимыми значениями.
4. Результаты исследований и накопленный опыт позволяют определить минимальные требования к термической стойкости и номинальному длительно допустимому току резисторов заземления нейтрали для электрической сети Москвы.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лабузова А.В., Жигрова Ю.С. Развитие электрических сетей напряжением 20 кВ в г. Москве. // Электрические станции. 2017. №5. С. 14–18.
2. Львов М.Ю., Челаэзов А.А., Долгов А.С., Зотов С.С. Технологическое проектирование электрических сетей напряжением 20 кВ мегаполиса // Энергия единой сети. 2024. №3–4 (74). С.18–29.
3. Львов М.Ю., Гущина Я.С., Серебрянников Е.Е. Физические аспекты нагрева и тепловой расчет резисторов заземления нейтрали электрической сети 20 кВ // Энергия единой сети. 2025. №4 (91). С.58–63.
4. Львов М.Ю. Стандартизация требований для электрической сети напряжением 20 кВ мегаполиса // Электроэнергия. Передача и распределение. 2025. №4 (91). С.58–63.
5. Лачугин В.Ф., Долгов А.С., Челаэзов А.А., Львов М.Ю. Оценка эффективности функционирования токовых устройств релейной защиты сети 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали // Электрические станции. 2025. № 10. С. 44–49.
6. IEEE Std C57.32–2015 IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices [Требования, терминология и процедура испытаний устройств заземления нейтрали]. IEEE – Институт инженеров по электротехнике и электронике. Дата публикации 15 апреля 2016 г.
7. Стандарт организации «Резисторы заземления нейтрали электрической сети 20 кВ. Организация эксплуатации, контроля и оценки технического состояния. Технические требования». СТО 76561356–29–01 2024, утвержден приказом АО «ОЭК» № 1398 от 22.11.2024.