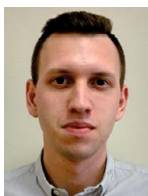


О разработке пожаробезопасных комплектных устройств низкоомного резистивного заземления нейтрали для организации селективного отключения однофазных повреждений в сетях 6 — 10 кВ

КОЧУРА Д. В., ТЕЛЕГИН А. В., БАСТРЫКИН С. А., ООО «Болид»
630015, г. Новосибирск, Электроводской пр., д. 1; nio_bolid@ngs.ru
ГУСАКОВ А. В., ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока»
620043, г. Екатеринбург, Черкасская ул., д. 25; ost@czff.ru



Д. В. Кочура



А. В. Телегин



С. А. Бастрыкин



А. В. Гусаков

Рассмотрены особенности разработки комплектного устройства для организации низкоомного резистивного заземления нейтрали на базе композиционных резисторов с низкой рабочей температурой и сухих пожаробезопасных трансформаторов. Особое внимание уделено выбору мощности нейтралеобразующего трансформатора: предложена методика выбора по стойкости трансформатора к токам короткого замыкания вместо выбора по перегрузочной способности трансформатора. Достигнуто существенное снижение массогабаритных показателей устройства.

Ключевые слова: низкоомное заземление нейтрали, нейтралеобразующий трансформатор, пожаробезопасность, литая изоляция, распределительные сети.

В настоящее время отечественные распределительные сети активно переводятся на режим селективного отключения всех однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) [1, 2]. Простой и надёжный способ реализации такого режима — внедрение низкоомного резистивного заземления нейтрали с организацией максимальной токовой защиты от ОЗЗ. В общем случае для этого требуется установить на секции шин нейтралеобразующее устройство и резистор.

На отходящих присоединениях защищаемой секции шин при этом устанавливаются трансформаторы тока нулевой последовательности и терминалы защит (если таковые отсутствуют). В особых случаях вместо терминалов в целях экономии средств можно использовать комплект из электро-механических реле (тока, времени, указательного). Существуют частные случаи, когда резистор подключается к выведенной нейтрали питающего трансформатора (характерно для сетей 20 и 35 кВ) или трансформатора собственных нужд, но их число на общем фоне незначительно.

Была поставлена задача разработать устройство комплектное для резистивного заземления нейтрали (КРЗН) на основе силовых резисторов производства ООО «Болид», нейтралеобразующих сухих трансформаторов и изме-

рительных трансформаторов тока производства ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». Цель данной разработки — повышение конкурентоспособности решений по организации низкоомного заземления нейтрали. Она достигается оптимизацией массогабаритных показателей, обеспечением низкой рабочей температуры и пожаробезопасности, снижением стоимости устройства, повышением удобства эксплуатации.

Выбор номинальных параметров устройства КРЗН, снижение массогабаритных показателей

Резистор

Ключевой техникой параметр устройства — номинальный ток резистора. Требования, согласно которым определяется ток резистора для конкретной сети, известны [3]: глубокое ограничение перенапряжений при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), перевод перемежающейся дуги в устойчивую фазу горения, обеспечение чувствительности релейной защиты (РЗ) от ОЗЗ. Номинальное время работы резистора определено стандартом [4] и составляет 10 с. Наиболее широко применяемый в отечественных сетях низкоомный резистор производства ООО «Болид» — РЗ-30-1110-10 (номи-

нальный ток — 192 А, номинальное время работы — 10 с).

Рассмотрим компоновку резистивной части устройства КРЗН на примере резистора номинальным сопротивлением 30 Ом. Необходимо, чтобы активная часть резистора, состоящая из композиционного материала ЭКОМ¹, обеспечивала в адиабатическом режиме переход электрической энергии, выделяющейся в резисторе при протекании тока ОЗЗ в течение номинального времени, в тепловую.

В резисторе сопротивлением 30 Ом при приложении наибольшего рабочего напряжения в течение 10 с выделится энергия 16 МДж. Такую энергоёмкость обеспечивает резистор, содержащий не менее 23 резистивных элементов. По условию прочности электрической изоляции каждая параллельная цепь резистора должна состоять не менее чем из семи элементов.

Таким образом, для резистора с номинальным сопротивлением 30 Ом при соблюдении условий необходимой энергоёмкости и электрической прочности изоляции принимаем три параллельные цепи по десять последовательно соединённых резистивных элементов. В этом случае сопротивление одного элемента составляет 9 Ом, что достигается подбором соответствующей пропорции компонентов материала ЭКОМ.

Трансформатор

Далее возникает вопрос о мощности трансформатора, позволяющей обеспечить безаварийную работу резистора при известном токе и времени его протекания. В настоящее время мощность нейтралеобразующего трансформатора для подключения низкоомного резистора выбирается по его перегрузочной способности, приведённой в [4], которая составляет 10 мин при 100 %-ной перегрузке по току для масляных трансформаторов и 5 мин при 60 %-ной перегрузке для сухих трансформаторов.

Методика выбора мощности трансформатора по токовой перегрузке даёт необоснованно завышенную мощность нейтралеобразующего трансформатора. Она оправдана для сетей, в которых длительность существования ОЗЗ исчисляется минутами и часами (сети с компенсацией ёмкостного тока, высокоомным или комбинированным заземлением нейтрали). В сети же с низкоомным заземлением нейтрали режим ОЗЗ для трансформатора по своей сути ближе не к длительной перегрузке по току, а к кратковременному протеканию тока короткого замыкания (КЗ).

В связи с изложенным ранее расчёт мощности нейтралеобразующего транс-

¹ <http://pnpbolid.com/ru/products/ecom>

форматора выполнен исходя из стойкости силовых трансформаторов при КЗ в соответствии с [5]. Стойкость трансформатора к токам КЗ подразумевает термическую и динамическую стойкость обмоток. Ток ОЗЗ при низкоомном заземлении нейтрали меньше тока КЗ, а номинальная продолжительность существования такого режима выше предельного времени протекания тока КЗ. В этом случае в соответствии с [6] предельную продолжительность протекания тока определяют по формуле

$$t_{\text{пред}} = t_{\text{к макс}} \frac{I_{\text{к макс}}^2}{I^2}, \quad (1)$$

где $t_{\text{к макс}}$ — максимальная допустимая продолжительность КЗ при протекании максимального установившегося тока КЗ, равная 4 с; $I_{\text{к макс}}$ — максимальный установившийся ток КЗ, А; $I < I_{\text{к макс}}$ — фактический ток (в данном случае ток ОЗЗ).

При этом наибольший установившийся ток КЗ в двухобмоточных трансформаторах составляет

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}(Z_{\text{T}} + Z_{\text{с}})}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение ответвления трансформатора, кВ; Z_{T} — фазное сопротивление КЗ, отнесённое к рассматриваемой обмотке трансформатора, Ом; $Z_{\text{с}}$ — фазное сопротивление КЗ сети, Ом.

Сопротивление КЗ сети не учитывается для трансформаторов мощностью менее 3,15 МВ · А, если оно составляет не более 5 % сопротивления КЗ трансформатора, определяемого по формуле

$$Z_{\text{T}} = \frac{u_{\text{к}} U_{\text{ном}}^2}{100 S_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где $u_{\text{к}}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %; $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность трансформатора, МВ · А.

Рассмотрим расчёт мощности нейтралеобразующего трансформатора для подключения в сеть 10 кВ резистора сопротивлением 30 Ом. Ток замыкания на землю в сети с низкоомным заземлением нейтрали практически полностью определяется током резистора, как правило, составляющим 95 – 98 % полного тока замыкания на землю. Примем допущение, что ток ОЗЗ в месте повреждения равен активному току резистора.

На рис. 1 показана характерная схема подключения низкоомного резистора в сети 10 кВ. При ОЗЗ ток протекает по всем трём фазам обмотки высокого напряжения (ВН) нейтралеобразующего трансформатора 1, соединённой в звезду. Следует отметить, что в зависимости от сопротивления в нейтрали ток распределяется в фазах обмотки ВН нейтралеобразующего

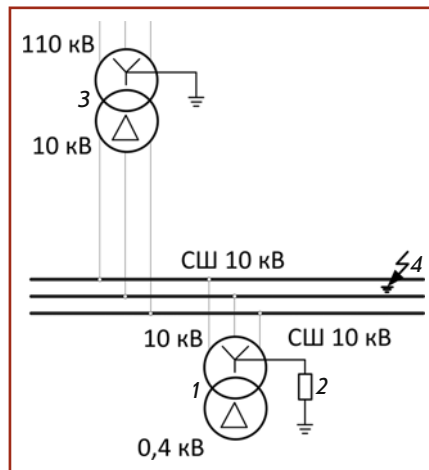


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема подключения низкоомного резистора в сеть 10 кВ

трансформатора не в равных долях. Однако для значений, соответствующих типовым сопротивлениям низкоомных резисторов, токи в фазах равны с точностью до миллиампер, составляют треть тока резистора 2 и совпадают с ним по фазе. Ток перераспределяется в треугольнике низкого напряжения (НН) питающего трансформатора 3, в месте замыкания 4 протекает полный ток резистора.

Это подтверждается моделированием приведённой схемы, проведённым в программном комплексе МАЭС. Результаты моделирования представлены на рис. 2, где чёрная линия — ток резистора, равный току замыкания на землю в месте повреждения; синяя — ток в фазах обмотки ВН нейтралеобразующего трансформатора; красная — ток в фазе А (фаза с ОЗЗ) обмотки НН питающего трансформатора; зелё-

ная — ток в фазах В и С обмотки НН питающего трансформатора.

Итак, путём преобразования формул (1 – 3) получаем расчётную мощность

$$S_{\text{расч}} = \frac{u_{\text{к}}}{100} U_{\text{ном}} \times \times \sqrt{3} I \sqrt{\frac{t_{\text{пред}}}{t_{\text{к макс}}}} = 105 \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad (4)$$

где $I = 64 \text{ А}$ — ток в фазах обмотки ВН нейтралеобразующего трансформатора, равный трети тока резистора; $t = 10 \text{ с}$ — номинальное время работы резистора; $u_{\text{к}} = 6 \%$ — напряжение КЗ трансформаторов типа ТЛС мощностью свыше 100 кВ · А.

Ближайшая большая типовая мощность трансформатора ТЛС составляет 160 кВ · А.

Номинальный ток устройства КРЗН с учётом сопротивления трансформатора

Поскольку трансформатор обладает собственным сопротивлением, активный ток замыкания на землю будет им ограничен. Ток резистора в этом случае определяется выражением

$$I_{\text{КРЗН}} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{Z_{\text{N}}} = 164 \text{ А}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{N}} = \sqrt{(R_{\text{T}} + 3R_{\text{R}})^2 + X_{\text{T}}^2}$ — полное сопротивление при ОЗЗ.

Ограничение тока резистора приводит к снижению чувствительности РЗ от ОЗЗ. Поэтому при расчёте уставок необходимо использовать значения тока $I_{\text{КРЗН}}$ в целом. При разработке устройства КРЗН принято, что нейтралеобразующий трансформатор не должен ограничивать ток резистора более, чем на 15 %.

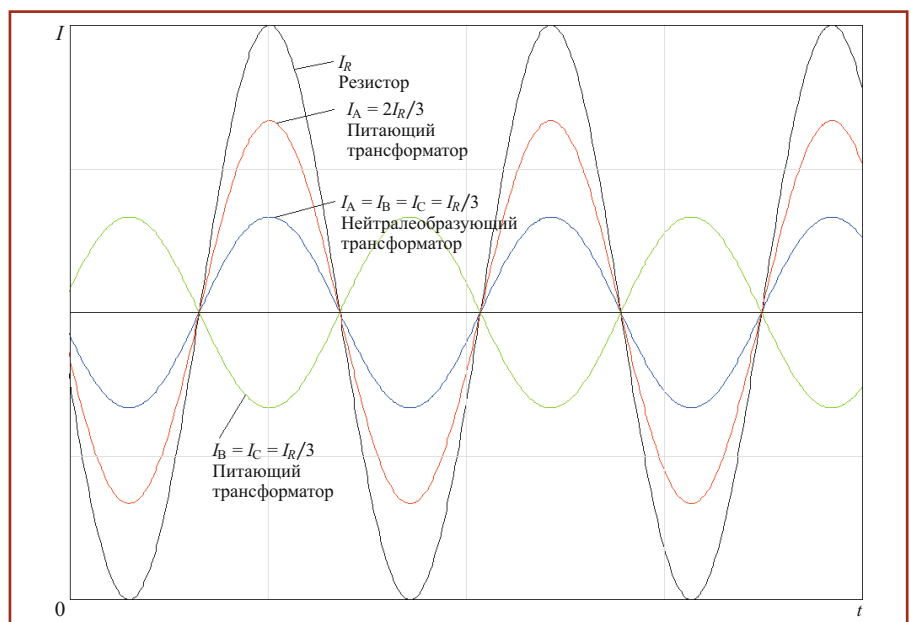


Рис. 2. Расчётные осциллограммы токов, полученные в результате моделирования в программном комплексе МАЭС

Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	Номинальный ток $I_{ном}$, А	Номинальное сопротивление резистора $R_{рез}$, Ом	Номинальная мощность трансформатора S_T , кВ · А
$6/\sqrt{3}$	208	15	160
	152	20	63
	106	30	63
	76	40	40
	62	50	40
	32	100	25
$10/\sqrt{3}$	250	20	250
	164	30	160
	129	40	160
	98	50	100
	54	100	63

Для сравнения при расчёте мощности сухого нейтралеобразующего трансформатора для подключения резистора сопротивлением 30 Ом, исходя из перегрузочной способности трансформатора по току, получим расчётную мощность 692 кВ · А и ближайшую большую номинальную — 1000 кВ · А. Очевидно, что при использовании предложенной методики достигается существенное снижение габаритных размеров устройства КРЗН и его стоимости. Линейка устройств КРЗН с указанием мощности применяемых нейтралеобразующих трансформаторов и учётом ограничения тока резистора сопротивлением трансформатора приведена в таблице.

Обеспечение низкой рабочей температуры и пожаробезопасности

Трансформатор

Рассчитаем нагревание обмоток трансформатора ТЛС-160/10 согласно [6]. Формула для расчёта, основанная на адиабатических условиях и справедливая для времени не более 10 с, имеет следующий вид:

$$\Theta_1 = \Theta_0 + \frac{2(\Theta_0 + 225)}{45 \cdot 700 - 1} = 53 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (6)$$

где числовые параметры соответствуют свойствам материала обмотки (удельная теплоёмкость, плотность, удельное сопротивление).

Поскольку устройство КРЗН до возникновения в сети ОЗЗ находится на холостом ходу, за начальную температуру Θ_0 принимаем температуру окружающей среды 40 °С (нагреванием обмоток за счёт тока холостого хода пренебрегаем). Плотность тока J , протекающего при ОЗЗ в фазах обмотки ВН трансформатора ТЛС-160/10 составляет 10,4 А/мм², время его протекания $t = 10$ с.

Однако в соответствии [5] ток КЗ максимально допустимого значения в течение предельно допустимого времени (для ТЛС-160/10 это 101 А и 4 с соответственно или эквивалентные по тепловому воздействию 64 А и 10 с) может привести к нагреву трансформатора с алюминиевыми обмотками до 200 °С.

Данные свидетельствуют, что рассчитанная температура гораздо ниже предельно допустимой. Очевидно, что максимальный нагрев в [5] определён для наихудшего случая — протекания тока КЗ по обмоткам трансформатора, предварительно нагретым токами нагрузки или перегрузки (по [5] для обмоток, соприкасающихся с изоляцией класса нагревостойкости F, при эксплуатации среднее превышение температуры может составлять 100 °С).

Таким образом, если в формуле (6) принять начальную температуру 140 °С, получим конечную температуру после токового воздействия — 158 °С, что близко к предельному значению. С этим же связан тот факт, что при испытаниях трансформаторов малой мощности на стойкость к токам КЗ температуру не замеряют приборами, но проверяют руками (рука «держит» — значит температура не выше 50 – 60 °С). Итак, для трансформатора, выбранного по приведённой методике, вследствие особенности режима его эксплуатации имеется значительный запас по термической стойкости. При этом обеспечиваются низкие рабочие температуры трансформатора, при которых ресурс изоляции составляет 25 лет.

Пожаробезопасность нейтралеобразующего трансформатора обеспечивается отказом от масляной изоляции в пользу сухой литой изоляции. Заводом-изготовителем проведены испытания используемых компаундов на воспламеняемость, по их итогам трансформаторы ТЛС отнесены к классу воспламеняемости FH (ПГ) I [7]. Такой же компаунд используется в качестве изоляции измерительного трансформатора тока ТОЛ-10, применяемого в устройстве КРЗН.

Резистор
Рассчитаем нагревание резистора при протекании тока ОЗЗ

$$\Theta_1 = \Theta_0 + \frac{16010}{c_{рез} m_{рез}} = 114 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где $\Theta_0 = 40$ °С — начальная температура резистора; 16010 кДж — энергия,

выделяемая при протекании тока ОЗЗ; $c_{рез}$ — теплоёмкость материала ЭКОМ, из которого изготовлена активная часть резистора, кДж/(кг · К); $m_{рез}$ — масса активной части резистора, кг.

Пожаробезопасность резистора обеспечивается применением невоспламеняемых материалов (активная часть) и низкими рабочими температурами. Стеклотекстолит, используемый для изготовления клеммных коробов резистора и внешних изоляционных конструкций, имеет температуру воспламенения 500 °С согласно [8]. Воспламенение стеклотекстолита при расчётных рабочих температурах резистора и нейтралеобразующего трансформатора исключено.

Кроме того, расчётная рабочая температура резистора в отличие от аналогов, производимых из металла, такова, что расчётный ресурс изоляции устройств, расположенных в общем корпусе устройства КРЗН, составляет 25 лет.

Защита от внешних воздействий

Все компоненты устройства КРЗН устанавливаются в корпус, выполняющий защитную и несущую функцию. Корпус выполнен из оцинкованной стали с полимерным покрытием и обеспечивает защиту от внешних воздействий на уровне IP 23. Возможно изготовление устройства как с кабельным, так и с шинным вводом в различных конфигурациях. Общий вид устройства КРЗН (30 Ом, 10 кВ) показан на рис. 3.

Выводы

1. Разработана линейка новых пожаробезопасных комплектных устройств для организации низкоомного резистивного заземления нейтрали на основе силовых резисторов производства ООО «Болид», сухих нейтралеобразующих трансформаторов и измерительных трансформаторов тока производства ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока», расположенных в общем корпусе.

2. Новое устройство имеет низкую рабочую температуру (температура резистора — не выше 160 °С, температура трансформатора — не выше 60 °С), при которой обеспечивается нормативный ресурс литой изоляции элементов, находящихся в общем корпусе.

3. В разработанном устройстве для обеспечения пожаробезопасности исключено применение масляной изоляции, что также повышает удобство эксплуатации, лишая необходимости содержать масляное хозяйство.

4. Приведена методика выбора сухого нейтралеобразующего трансформатора для организации низкоомного резистивного заземления нейтрали на основании стойкости к токам КЗ с учётом особенностей режима эксплуа-

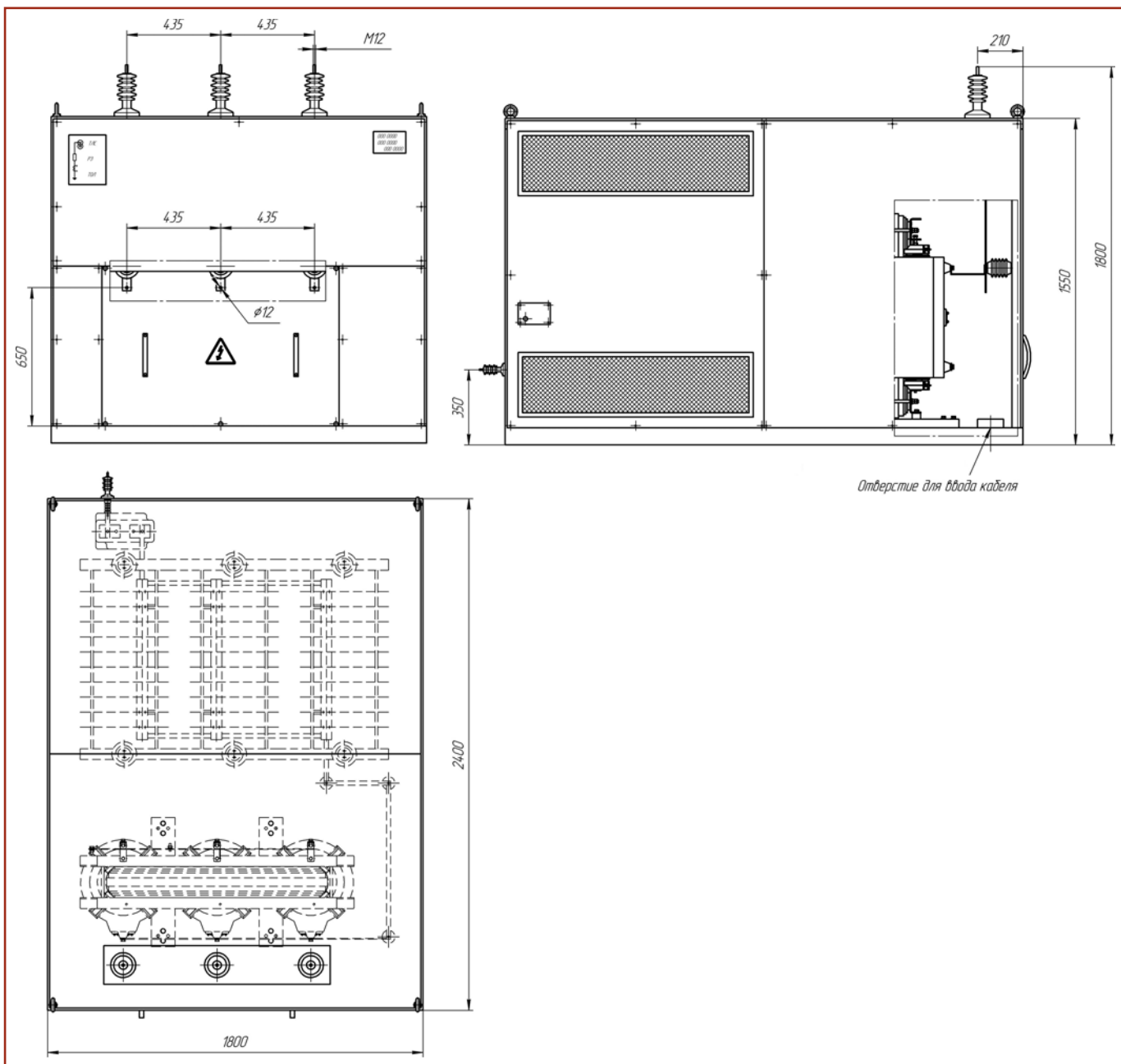


Рис. 3. Общий вид устройства КРЗН (30 Ом, 10 кВ) с габаритными размерами

тации устройства. Применение данной методики позволило значительно снизить массогабаритные показатели устройства КРЗН.

5. Представленная методика при условии согласования с производителем трансформаторов может быть использована и для выбора масляных нейтралеобразующих трансформаторов, применяемых для организации нейтральной точки при внедрении низкого омного резистивного заземления нейтрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширковец А. И., Хадыев И. Г., Кудряшов Д. С. О переводе сетей 6 – 10 кВ горных и металлургических предприятий на режим эксплуатации с резистивно-заземлённой нейтралью // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 1.
2. Востросаблина В. А. Резисторное заземление нейтрали в сетях среднего напряжения: «за» и «против» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 4(25). С. 76 – 79.
3. Shirkovets A. Features of Arcing at Single-Phase Damages of Power Cable Insulation in Networks with Resistance in Neutral // International Conference on Power Systems Transients, Cavtat, Croatia, June 15 – 18, 2015.
4. IEEE Std 32–1972. Standard Requirements, Terminology and Test Procedure for Neutral Grounding Devices.
5. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые, общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007.
6. ГОСТ Р 55188–2012. Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям. — М.: Стандартинформ, 2014.
7. ГОСТ 28779–90. Материалы электроизоляционные твёрдые. Методы определения воспламеняемости под воздействием источника зажигания. — М.: Изд-во стандартов, 1991.
8. ГОСТ 12652–74. Стеклотекстолит электротехнический листовой. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1974.