

# Применение нейтралеобразующих фильтров ФМ30 для резонансного и резистивного заземления нейтрали

БЫКОВА А. М.; bykovaam@gmail.com  
 ЖУЙКОВ А. В.; antonzhuykov23@gmail.com  
 КОНСТАНТИНОВА А. Ю.; VoronkovaAY@mpei.ru  
 КУБАТКИН М. А.; mkubatkin@yandex.ru  
 МАТВЕЕВ Д. А.; daniil.matveev@gmail.com  
 НИУ «Московский энергетический институт»  
 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14  
 НИКУЛОВ И. И.; nikulov@ramenergy.ru  
 ОАО «Раменский электротехнический завод «Энергия»  
 140105, Московская обл., г. Раменское, ул. Левашова, 21

Заземляющие фильтры нулевой последовательности обеспечивают оптимальное технико-экономическое решение для образования нейтральной точки в электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ. В настоящее время в России отсутствуют стандартизованные общие технические условия на эти устройства, что осложняет их выбор, особенно для сетей с низкоомным резистивным заземлением нейтрали. Отражены вопросы технических требований и выбора фильтров, наименее освещённые в литературе. Проведена оценка электродинамической и термической стойкости фильтров ФМ30 производства ОАО «РЭТЗ Энергия». Определены предельно допустимые десятисекундные токи фильтров ФМ30. Предложена последовательность выбора фильтров для применения совместно с низкоомными резисторами.

**Ключевые слова:** фильтр заземляющий нулевой последовательности, нейтраллер, режимы заземления нейтрали, резонансное заземление нейтрали, низкоомное резистивное заземление нейтрали

Для подключения к электрической сети дугогасящих реакторов (ДГР) или резисторов, определяющих режим заземления нейтрали, необходимо физическое наличие нейтральной точки. В качестве такой точки можно использовать нейтральный вывод трёхфазной обмотки силового трансформатора, соединённой по схеме «звезда с выведенной нулевой точкой» ( $Y_n$ ). Как правило, обмотки напряжением 6 – 35 кВ силовых трансформаторов имеют схему соединения «треугольник» ( $\Delta$ ), поэтому приходится использовать специальные нейтралеобразующие устройства (нейтраллеры). Такие устройства в нормальном режиме работы сети должны иметь большое сопротивление и минимальные потери в схеме прямой последовательности, а при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) — малое сопротивление в схеме нулевой последовательности.

Одним из вариантов таких устройств является силовой трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y_n/\Delta$ . Нейтральный вывод первичной обмотки используется для подключения ДГР или резистора, а вторичная обмотка, соединённая по схеме «треугольник», образует короткое замыкание (КЗ) для токов нулевой последовательности, обеспечивая для них малое сопротивление.

Однако существует более экономичное техническое решение, основанное на применении устройств с трёхфазной обмоткой, соединённой по схеме «зиг-

заг с выведенной нулевой точкой», называемых фильтрами нулевой последовательности. Такие фильтры производства Раменского электротехнического завода «Энергия» имеют условное обозначение ФМ30 (фильтр

масляный заземляющий нулевой последовательности). Активная часть фильтра содержит трёхстержневую магнитную систему и трёхфазную обмотку, состоящую из шести секций (полуобмоток) с одинаковым числом витков. Электрическая схема обмотки фильтра показана на рис. 1, а. Каждая фаза выполнена из двух последовательно соединённых секций, включённых встречно, при этом секции одной фазы расположены на разных стержнях трёхфазной магнитной системы устройства.

В случае приложения к ФМ30 напряжения нулевой последовательности полуобмотки стержней создают противофазные магнитные потоки, как при КЗ двухобмоточного трансформатора. В таком режиме сопротивление фильтра оказывается весьма малым и характеризуется напряжением КЗ  $u_k$ , которое вводится так же, как для силовых трансформаторов, и составляет 3 – 6 %.

Векторные диаграммы магнитных потоков и напряжений фильтра при трёхфазном напряжении прямой последовательности показаны на рис. 1, б. Из векторной диаграммы рис. 1, в видно, что фазные напряжения образуются не скалярной, а векторной суммой напряжений полуобмоток, отличающихся по фазе на  $60^\circ$ . Вследствие этого при заданных индукции и фазном напряжении обмотка, имеющая схему соединения «зигзаг», будет иметь больше витков, чем обмотка, соединённая по схеме «звезда» (на 15,5 %, по точной оценке [1]). Но при этом полностью отпадает

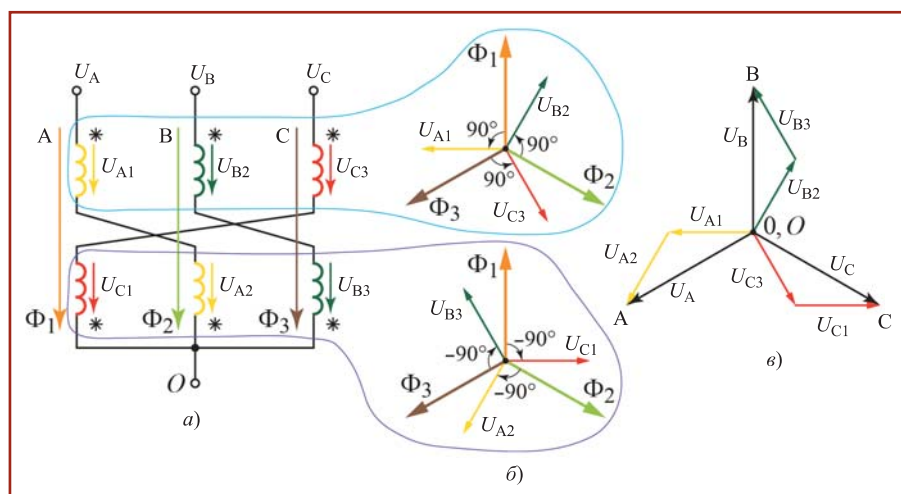


Рис. 1. Магнитные потоки, создаваемые стержнями, и напряжения полуобмоток нейтраллера ФМ30 по прямой последовательности:

а — электрическая схема обмотки ФМ30 с напряжениями и магнитными потоками прямой последовательности; б — векторные диаграммы магнитных потоков в стержнях и напряжения полуобмоток; в — векторная диаграмма напряжений на выводах ФМ30; А, В и С — линейные выводы трёхфазной обмотки ФМ30; О — нейтральный вывод трёхфазной обмотки ФМ30;  $U_A, U_B, U_C$  — напряжения фаз А, В и С обмотки ФМ30;  $U_{A1}, U_{A2}$  — напряжения полуобмоток фазы А, расположенных соответственно на 1-м и 2-м стержнях магнитопровода;  $U_{B2}, U_{B3}$  — напряжения полуобмоток фазы В, расположенных соответственно на 2-м и 3-м стержнях магнитопровода;  $U_{C3}, U_{C1}$  — напряжения полуобмоток фазы С, расположенных соответственно на 3-м и 1-м стержнях магнитопровода;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  — магнитные потоки в 1-м, 2-м и 3-м стержнях магнитопровода. \* — обозначение электрических начал полуобмоток

необходимость во вторичной обмотке, соединённой в «треугольник», и устройство оказывается более экономичным. При дополнительном увеличении числа витков обмотки удаётся уменьшить рабочую индукцию в магнитопроводе, снижая тем самым ток намагничивания и потери холостого хода.

Изначально, фильтры ФМ30 проектировались для использования совместно с ДГР. Поэтому, в частности, помимо номинального тока для них нормируется кратковременный шестичасовой ток, при котором фильтры могут работать в режиме ОЗЗ. Однако их можно применять и для резистивного низкоомного заземления нейтрали [2], но вопрос нормирования длительности и величины токов, характерных для этого режима, не получил должного освещения. Настоящая статья ставит одной из задач уточнение критериев выбора фильтров для применения совместно с низкоомным резистором.

### Электродинамическая стойкость фильтров ФМ30 к воздействию токов короткого замыкания

Поскольку в РФ отсутствуют стандартизованные общие технические условия на нейтралеобразующие фильтры, то при разработке технических требований приходится ориентироваться на международный стандарт [3] и ГОСТ на силовые трансформаторы [4, 5].

В соответствии с [4] силовой трансформатор должен выдерживать внешние КЗ при эксплуатации на любом ответвлении обмотки при любых сочетаниях сторон питания, соответствующих режимам работы трансформатора, указанным в нормативных документах. Для фильтра ФМ30 выбрать режим с наибольшим установившимся током КЗ в соответствии с [4] нельзя, поскольку у него отсутствует вторичная обмотка в отличие от силового трансформатора.

Фильтры ФМ30 должны выдерживать воздействия ударных токов как при работе с резистором, так и с ДГР. Однако наибольшие токи будут протекать по обмоткам в случае КЗ на нейтральном выводе фильтра во время ОЗЗ в сети, т. е. при одновременном заземлении одной из фаз сети и нейтрального вывода ФМ30. Этот случай и должен определять электродинамическую стойкость фильтров ФМ30 к воздействию ударных токов КЗ.

В соответствии с [5] при расчёте наибольшего установившегося тока КЗ  $I_k$  для силовых трансформаторов мощностью менее 3,15 МВА сопротивление КЗ сети, как правило, не учитывают, если оно составляет не более 5 % от сопротивления КЗ трансформатора. Это условие выполняется для всей линейки фильтров ФМ30. Поэтому расчётный

фазный ток  $I_k$  определяется только собственным сопротивлением КЗ фильтра:

$$I_k = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \frac{U_k}{U_{ном}}} \frac{I_{ном}}{I_{6ч}} = 100 \frac{I_{ном}}{3U_k}, \quad (1)$$

где  $S_{ном}$ ,  $U_{ном}$ ,  $I_{ном}$  — номинальные мощность, напряжение и ток фильтра;  $I_{6ч}$  — максимально допустимый для фильтра ток шестичасовой длительности.

Отметим, что для фильтров ФМ30 номинальная мощность  $S_{ном} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} I_{6ч}$  определяется через ток шестичасовой длительности, а напряжение  $U_k$  — через номинальный, поэтому в формуле (1) присутствует корректирующий множитель  $\frac{I_{ном}}{I_{6ч}}$ .

Ударный ток КЗ составляет:

$$I_{уд} = I_k K_{уд} \sqrt{2}, \quad (2)$$

где  $K_{уд}$  — ударный коэффициент, определяемый в соответствии с [5] по формуле

$$K_{уд} = 1 + e^{-\left(\frac{\varphi + \pi}{2}\right) \frac{R_k}{X_k}} \sin \varphi, \quad (3)$$

где  $R_k$ ,  $X_k$  — активная и реактивная составляющие сопротивления КЗ фильтра,  $\varphi = \arctg \frac{X_k}{R_k}$ .

Отметим важное обстоятельство, не нашедшее отражения в нормативных документах. И установившийся ток  $I_k$ , и ударный коэффициент  $K_{уд}$  зависят от активной составляющей сопротивления КЗ фильтра  $R_k$ , на которую существенное влияние оказывает температура обмотки. У мощных силовых трансформаторов  $R_k$ , как правило, значительно меньше  $X_k$ , и влияние температуры практически не сказывается на значении  $I_{уд}$ , поэтому оно не учтено в нормативных документах. Однако для трансформаторов малой мощности такое влияние может быть значительным.

Зависимость от температуры ударных токов КЗ распределительных трансформаторов малой мощности рассмотрена в недавней публикации [6]. Данная зависимость оказывается существенной и для фильтров ФМ30.

В табл. 1 приведены значения токов  $I_k$  и  $I_{уд}$ , рассчитанные по формулам (1–3) для фильтров ФМ30 6 и 10 кВ при температурах  $-50$  и  $75$  °С. Нижнее значение температуры выбрано как минимально возможное для климатического исполнения УХЛ1 с учётом нагрева, обусловленного потерями в магнитопроводе ФМ30 в режиме холостого хода. Верхнее значение соответствует расчётной температуре, к которой в соответствии с [4] приводится напряжение  $U_k$  трансформаторов с системой охлаждения М.

Разница значений  $\delta$  в табл. 1 определена относительно токов, рассчитанных при температуре  $75$  °С. Видно, что для фильтров минимальной мощности 40 кВА ударные токи при температуре  $-50$  °С более чем на 40 % превышают значения, определённые при температуре  $75$  °С. По нашему мнению, конструкции как фильтров нулевой последовательности, так и распределительных трансформаторов малой мощности, должны обеспечивать стойкость к воздействию ударных токов КЗ при низких температурах, и это должно найти отражение в нормативных документах. Выпускаемые в настоящее время фильтры ФМ30 имеют усиленную конструкцию торцевой изоляции обмоток, рассчитанную в соответствии с [7, 8] и обеспечивающую электродинамическую стойкость при КЗ во всём температурном диапазоне климатического исполнения УХЛ1.

### Термическая стойкость и ресурс фильтров ФМ30 при заземлении нейтрали через ДГР

Требования по нагреву для фильтров нулевой последовательности отличаются от таковых для силовых трансформаторов.

Таблица 1

Наибольшие фазные токи КЗ фильтров ФМ30 6 и 10 кВ

Параметры фильтра ФМ30		Наибольший установившийся ток КЗ, А			Ударный коэффициент $K_{уд}\sqrt{2}$			Наибольший ударный ток КЗ, А		
$S_{ном}$ , кВА	$U_{ном}$ , кВ	$-50$ °С	$75$ °С	$\delta$ , %	$-50$ °С	$75$ °С	$\delta$ , %	$-50$ °С	$75$ °С	$\delta$ , %
40	6,6	148	116	27,6	1,64	1,48	10,8	243	172	41,3
	11	84	65	29,2	1,64	1,48	10,8	138	96	43,8
80	6,6	209	193	8,3	2,01	1,73	16,2	420	334	25,7
	11	123	114	7,9	1,95	1,71	14,0	240	195	23,1
200	6,6	352	327	7,6	2,02	1,74	16,1	711	569	25,0
	11	211	198	6,6	2,05	1,77	15,8	433	350	23,7
310	6,6	635	602	5,5	2,10	1,82	15,4	1334	1096	21,7
	11	373	348	7,2	2,03	1,76	15,3	757	612	23,7
500	6,6	683	670	1,9	2,35	2,10	11,9	1605	1407	14,1
	11	379	371	2,2	2,31	2,06	12,1	875	764	14,5
875	6,6	1974	1928	2,4	2,31	2,05	12,7	4560	3952	15,4
	11	992	977	1,5	2,40	2,16	11,1	2381	2110	12,8
1600	11	1861	1847	0,8	2,50	2,31	8,2	4653	4267	9,0

торов. Это связано с режимом их работы — обмотки фильтров обтекаются рабочими токами только во время ОЗЗ, в нормальном режиме работы сети по ним протекает малый ток холостого хода и источником тепла фактически является только магнитопровод.

Ресурс пропитанной маслом целлюлозной изоляции сильно зависит от температуры. При повышенной температуре бумага и картон деградируют — снижается степень полимеризации молекул целлюлозы, что в итоге приводит к потере механической прочности. Если изоляция трансформатора будет работать при постоянной температуре 98 °С, то её срок службы оценивается в 25 лет. Увеличение этой температуры примерно на 6 °С приводит к сокращению срока службы в два раза. Оценка старения изоляции проводится для наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора, обычно расположенной в верхней части обмотки. Относительная скорость износа изоляции в соответствии с [9] определяется как

$$V = 2^{\frac{\Theta_{\text{ННТ}} - \Theta_{\text{ННТ ном}}}{6}}, \quad (4)$$

где  $\Theta_{\text{ННТ}}$  — температура ННТ;  $\Theta_{\text{ННТ ном}}$  — номинальная температура ННТ.

Относительный износ изоляции в течение определённого периода времени  $t$  можно определить по формуле [9]:

$$L(t) = \frac{1}{t} \int_0^t V dt. \quad (5)$$

Если температура ННТ постоянна и равна  $\Theta_{\text{ННТ ном}}$ , то выражение (5) равно единице и трансформатор сработает свой ресурс за полный срок службы.

Для силовых трансформаторов с системой охлаждения М ГОСТ Р 52719–2007 [4] устанавливает для режима номинальной нагрузки превышение средней температуры обмоток над температурой охлаждающей среды на уровне 65 °С. Это значение выбрано следующим образом. Для силовых трансформаторов принято, что превышение температуры ННТ над средней температурой обмотки составляет 13 °С. Тогда превышение температуры ННТ над температурой окружающей среды составит 78 °С, и для температуры окружающей среды 20 °С температура ННТ будет равна номинальной  $\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{ННТ ном}} = 98$  °С.

Относительно недавно сетевые компании установили требование к сроку службы оборудования — 30 лет. При этом через 25 лет относительный износ изоляции должен быть равен 25/30. Относительная скорость износа также должна быть равна 25/30. Тогда из

формулы (4) можно определить новую номинальную температуру ННТ:

$$\begin{aligned} \frac{25}{30} &= 2^{\frac{\Theta_{\text{ННТ}} - 98}{6}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \log_2\left(\frac{25}{30}\right) &= \frac{\Theta_{\text{ННТ}} - 98}{6} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Theta_{\text{ННТ}} &= 98 + 6 \log_2\left(\frac{25}{30}\right) = 96 \text{ °С}. \end{aligned}$$

Отметим, что корректирование требований по нагреву для силовых трансформаторов было выполнено не во всех нормативных документах.

Помимо ресурсных ограничений для фильтров ФМ30 существуют ограничения по предельным температурам в различных элементах конструкции. Определяющей является температура ННТ, которая ни в одном из рабочих режимов фильтра не должна превышать 140 °С [9]. При превышении этой температуры включается более быстрый пиролизный механизм разрушения целлюлозных волокон. Для оборудования климатического исполнения УХЛ1 верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха составляет 40 °С. Поэтому предельно допустимое превышение температуры ННТ над температурой окружающего воздуха — 100 °С. Для повышенных значений температур ННТ их превышение над средней температурой обмотки для силовых трансформаторов принимают равным 15 °С, поэтому предельно допустимое значение превышения средней температуры обмотки ограничено значением 85 °С. Именно такое значение регламентировано в общих технических условиях на дугогасящие реакторы [10]. Фильтры ФМ30 тоже рассчитаны по этому условию.

Ресурс изоляции фильтров ФМ30 в первую очередь определяется режимами их работы. Для фильтров, работающих с ДГР, нормированная длительность ОЗЗ составляет 6 ч. Также нормируется наработка на отказ, установленное значение которой для фильтров, как и для ДГР, составляет 25 000 ч

за нормированный срок службы 30 лет. Этому значению соответствует среднее время паузы между ОЗЗ 57 ч.

На рис. 2 приведён график изменения температуры ННТ для фильтров ФМ30 за время одного цикла ОЗЗ, рассчитанный по методике [9]. Относительный износ изоляции, определённый по (4) и (5) с использованием данной температурной зависимости, оказывается равным 0,53, что соответствует сроку службы фильтра 56 лет. Имеющийся запас ресурса обеспечивает возможность эксплуатации фильтров при замыканиях длительностью более 6 ч.

### Термическая стойкость и ресурс фильтров ФМ30 при низкоомном резистивном заземлении нейтрали

В случае заземления нейтрали через низкоомный резистор ОЗЗ не может существовать длительно, по сути, являясь КЗ. Производители резисторов устанавливают их номинальное время работы равным 10 с [2] на основании положений американского стандарта [11]. Для силовых трансформаторов после КЗ средняя температура медных обмоток не должна превышать 250 °С [5]. Однако для фильтров ФМ30 определяющей предельно допустимые токи является температура ННТ, которая не должна превышать 140 °С. При работе фильтра совместно с резистором нагрев обмоток происходит быстро и появляется возможность резкого выхода влаги из бумаги в масло в виде эмульсии [12]. Это происходит, если скорость выхода влаги превышает скорость её растворения в масле. Вода в эмульгированном состоянии снижает электрическую прочность изоляции, а так как фильтр постоянно находится под воздействием напряжения, то её пробой становится возможным.

Кроме того, для фильтров ФМ30 нужно учесть положение ГОСТ 15150–69 [13] о том, что для изделий категории размещения 1, подверга-

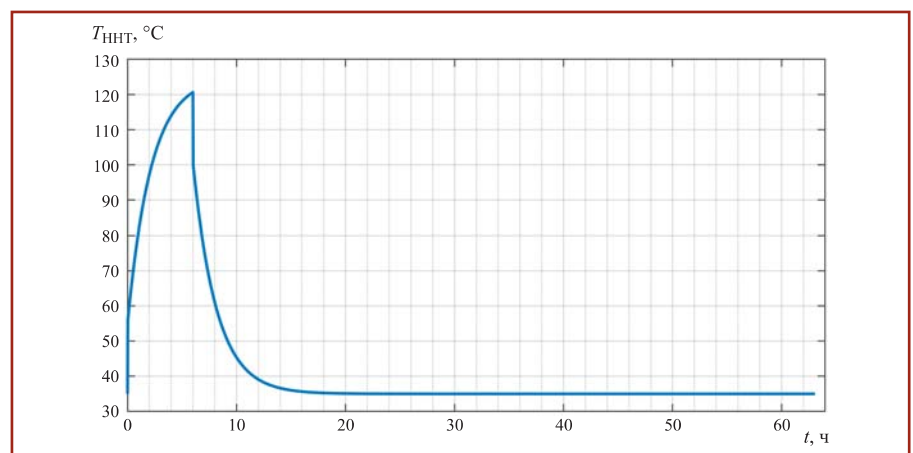


Рис. 2. График изменения температуры ННТ фильтров ФМ30 за время одного цикла ОЗЗ при температуре окружающего воздуха 20 °С



Таблица 2

Предельно допустимые десятисекундные токи фильтров ФМ30 при температуре окружающего воздуха 55 °С

$S_{\text{ном}}, \text{кВА}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$I_{10\text{с}}, \text{А}$
40	6,6	87,5
	11	48,3
80	6,6	243
	11	133
200	6,6	389
	11	272
310	6,6	714
	11	355
500	6,6	922
	11	489
875	6,6	1274
	11	644

Таблица 3

Расчётные токи КЗ при включении резистора РЗ-30-1110-10 через фильтр ФМ30

Тип фильтра	$I_3, \text{А}$	$\delta_I, \%$	$I_{10\text{с}}, \text{А}$
ФМ30 80/11	128	33	133
ФМ30 200/11	159	17	272
ФМ30 310/11	175	9	355
ФМ30 500/11	182	5	489

емых нагреву солнцем, необходимо увеличить верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха на 15 °С. В табл. 2 приведены рассчитанные для температуры окружающего воздуха 55 °С допустимые десятисекундные токи  $I_{10\text{с}}$ . Расчёт динамики нагрева частей фильтра проводили по методике [9]; значения температур, необходимые для применения [9], определяли в соответствии с методикой [14].

Так как при низкоомном заземлении нейтрали длительность однофазного КЗ мала, износ изоляции под воздействием повышенных температур оказывается очень небольшой, и фильтры способны выдерживать воздействия значительно большего числа КЗ, чем встречается на практике (более одного КЗ в сутки в течение 30 лет).

#### Выбор фильтра для сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали

Выбор фильтра для применения совместно с низкоомным резистором должен осуществляться по току при однофазном КЗ, который не должен превышать допустимое значение  $I_{10\text{с}}$ . Однако следует учитывать, что фильтр ограничивает ток через резистор, и значение тока однофазного КЗ в сети  $I_3$  оказывается меньше номинального тока резистора  $I_{\text{ном}}$ . Сильное ограничение тока фильтром ухудшает условия селективной работы релейной защиты

и является нежелательным. Определим процентное снижение номинального тока резистора:

$$\delta_I = 100 \left( 1 - \frac{I_3}{I_{\text{ном}}} \right). \quad (6)$$

Ток однофазного КЗ определяется следующим выражением:

$$I_3 = \frac{U_{\text{ф}}}{\sqrt{(R + R_{\text{к}})^2 + X_{\text{к}}^2}}, \quad (7)$$

где  $U_{\text{ф}}$  — номинальное фазное напряжение сети;  $R$  — номинальное сопротивление резистора.

С учётом того, что номинальный ток резистора  $I_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R}$ , получим

$$\delta_I = 100 \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{(R + R_{\text{к}})^2 + X_{\text{к}}^2}} \right). \quad (8)$$

Сопротивление КЗ фильтра  $Z_{\text{к}}$  удобно определять исходя из его паспортных значений по формулам:

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{ном}}}; R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{ном}}^2}; X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}.$$

С помощью (8) можно определить для каждого фильтра ФМ30 процентное снижение тока для любого резистора с номинальным сопротивлением  $R$ .

В качестве примера в табл. 3 приведены рассчитанные значения  $\delta_I$  для низкоомного резистора для сетей 10 кВ РЗ-30-1110-10 производства ООО «Болд», имеющего номинальное сопротивление 30 Ом и номинальный ток 192 А. Для сравнения в таблице представлены предельно допустимые десятисекундные токи фильтров. Видно, что все фильтры удовлетворяют условию термической стойкости, поэтому выбор фильтра в этом примере определяется допустимым значением  $\delta_I$ .

#### Выводы

1. Конструкции как фильтров нулевой последовательности, так и распределительных трансформаторов малой мощности, должны обеспечивать стойкость к воздействию ударных токов короткого замыкания при низких температурах, что должно быть отражено в нормативных документах.

2. Фильтры ФМ30 производства ОАО «РЭТЗ Энергия» удовлетворяют требованиям электродинамической и термической стойкости.

3. Определены предельно допустимые десятисекундные токи фильтров ФМ30 номинальной мощностью 40 – 875 кВА при температуре окружающего воздуха 55 °С.

4. Предложен подход к выбору фильтров для применения в электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ

с низкоомным заземлением нейтрали, позволяющий учитывать их влияние на ток однофазного короткого замыкания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.
2. О разработке комплектов устройств низкоомного резистивного заземления нейтрали для организации селективного отключения однофазных повреждений в сетях 6 – 10 кВ / Д. В. Кочура, А. В. Телегин, С. А. Бастрыкин, А. В. Гусаков // Энергетик. 2016. № 9. С. 9 – 12.
3. IEC 60076-6:2007. Power transformers — Part 6: Reactors.
4. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007.
5. ГОСТ Р 55188–2012 (МЭК 60076-5:2006). Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям. — М.: Стандартинформ, 2014.
6. Ларин В. С., Горшунов В. Ю. Особенности испытаний распределительных трансформаторов на стойкость при коротких замыканиях // Электротехника. 2018. № 10. С. 75 – 81.
7. РД 16.431–88. Трансформаторы силовые. Расчет электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании.
8. Лурье А. И., Левицкая Е. И. Электродинамическая стойкость трансформаторов I – II габаритов со слоевыми цилиндрическими обмотками // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях; под ред. А. И. Лурье. — М.: Знак, 2005. 520 с. — С. 177 – 185.
9. ГОСТ 14209–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. — М.: Стандартинформ, 2009.
10. СТО 34.01-3.2-008–2017. Реакторы заземляющие дугогасящие 6 – 35 кВ. Общие технические требования // ПАО «Россети», 2017.
11. IEEE Std 32–1972. IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1972.
12. CIGRE Technical Brochure № 393. Thermal Performance of Transformers. CIGRE, 2009.
13. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М.: Стандартинформ, 2010.
14. РД 16.452–88. Трансформаторы силовые масляные с системами охлаждения М и Д. Тепловой расчет обмоток.