

ходного процесса обусловлены высокой ёмкостью силового фильтра. Для подавления эскалации перенапряжений целесообразно использовать резистивное заземление нейтрали сети. Однако в сетях 6 – 10 кВ распределительных подстанций явно выведенная нейтраль зачастую отсутствует. В этом случае рекомендуется подключение резисторов (к нейтралю специальных трансформаторов малой мощности со схемой соединения обмоток  $\text{Y}/\Delta$ , рис. 4, а) или фильтров нулевой последовательности (к питающим все присоединения шинам), например типа ФМЗО (рис. 4, б), обмотки которого соединены в зигзаг [4] (выпускаемых на Раменском электротехническом заводе «Энергия»).

На рис. 5 представлена осциллограмма напряжения на неповрежденной фазе с резистивным (через сопротивление 500 Ом) заземлением нейтрали. Форма кривой свидетельствует о незначительной эскалации напряжения, при которой максимальная кратность перенапряжений не превышает  $2,2U_{\text{ф}}$ . Результаты моделирования и натурных экспериментов весьма близки, а характер процессов в целом одинаков.

При аналитическом расчёте гармонического состава выявлено частичное совпадение результатов. Так, расчётное значение 27-й гармоники [5] соответствует выражению  $I'_{vm} = \frac{1}{v} \cos \alpha \cdot \cos [v \times \arccos(U_d)]$  (где  $v$  — номер гармоники,  $\alpha$  — угол управления,  $U_d$  — относительное значение выпрямленного напряжения). При этом  $I'_{27m} = 0,044$  отн.ед. Результаты моделирования показывают уровень  $I'_{27m} = 0,05$  отн.ед.

Однако ряд гармоник имеет отличные от аналитического расчёта значения, что может быть связано с их усилением за счёт резонанса на определённых частотах. Это явление приводит к увеличению содержания высших гармоник в токе ОЗЗ на более чем 20 % тока промышленной частоты, что обуславливает необходимость выбора номинального сопротивления заземляющего резистора с учётом гармонического состава питающего напряжения.

### Вывод

Исследование влияния ЧРП на перенапряжения при дуговых замыканиях позволило установить, что причина высоких кратностей перенапряжений состоит в самой схеме фильтрации ЧРП. Резистивное заземление нейтрали сети позволяет снизить кратность перенапряжений до допустимого безопасного уровня. При выборе номинального сопротивления заземляющего резистора необходимо учитывать гармонический состав тока ОЗЗ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширковец А. И. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ

// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. Спец. вып. № 1. С. 44 – 51.

2. Экспериментальное исследование эффективности дугогасящего реактора РУОМ при «металлических» и дуговых однофазных замыканиях на землю в сети 10 кВ / А. И. Ширковец, М. В. Ильиных, И. Н. Дмитриев и др. // Электро. 2009. № 3. С. 17 – 26.

3. Дьяконов В. П. Matlab 6. 5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения (Библио

отека профессионала). — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 800 с.

4. Емельянов Н. И., Ильиных М. В., Кудряшов Д. С. О способах подключения высокоомных защитных резисторов для заземления нейтрали сети и их безопасной эксплуатации // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. Спец. вып. № 1. С. 62 – 65.

5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.

## Резисторные ограничители тока КЗ в нейтралях трансформаторов и автотрансформаторов

НАУМКИН И. Е., канд. техн. наук, ВАСИЛЬЕВА А. Ю., САРИН Л. И., инженеры ООО «Болид»; [ienau@yandex.ru](mailto:ienau@yandex.ru)

ПОЛЯЧЕК М. М., инженер

Филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» — СибНИИЭ

ЗАЦАРИННЫЙ Н. Г., инженер, Набережно-Челнинская ТЭЦ

Представлена информация о разработке и внедрении на Набережно-Челнинской ТЭЦ (далее ТЭЦ) резисторных ограничителей тока КЗ в нейтралях трансформаторов 110 – 220 кВ. На данной ТЭЦ токи однофазных КЗ  $I^{(1)} = 46$  кА превышают токи трёхфазных  $I^{(3)} = 36$  кА. Проблема необходимости замены масляных выключателей 110 кВ на элегазовые с токами отключения 40 кА решена применением ограничителей тока. Для снижения токов однофазных КЗ используются резисторные токоограничивающие устройства (ТОУ) типа ТОУ-Н-110, подключаемые к нейтрали трансформаторов.

Ключевые слова: ограничение тока КЗ, нейтрали трансформаторов, резисторные токоограничивающие устройства, Набережно-Челнинская ТЭЦ.

**З**начительное число повреждений и отказов силового оборудования в электрических сетях 110 – 220 кВ связано с короткими замыканиями (КЗ) на землю. Эффективное средство ограничения несимметричных токов замыкания на землю — заземление нейтрали трансформаторов через активные сопротивления [1, 2]. Применение ТОУ позволяет оптимизировать технические требования к отключающей способности выключателей и повысить надёжность работы основного силового оборудования сети.

Эффективность ТОУ связана с использованием мощных резисторов из композиционного материала. Устройство ТОУ-Н-110 позволяет решить проблему ограничения переходных и установившихся токов КЗ в комплексе с вопросами повышения ресурса работы трансформаторов. Результаты расчётов установившихся токов однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ (рис. 1) при различных условиях заземления нейтрали трансформаторов ТЗ, Т4, Т6, Т7 и автотрансформаторов (АТ) АТ5, АТ8 приведены в табл. 1. Снижение токов КЗ в зависимости от сопротивления в нейтрали трансформаторов и АТ  $R_n$  показано на рис. 2.

Из табл. 1 следует, что включение резисторов  $R_n \geq 10$  Ом в нейтраль трансформаторов и АТ приводит к необходи-

мому снижению токов КЗ — менее 40 кА, что позволяет использовать выключатели с номинальным током отключения  $I_{\text{н.ном}}$ , равном 40 кА. При изменении сопротивления  $R_n$  от 10 до 40 Ом снижение токов КЗ происходит в диапазоне  $14 \div 23$  %. В табл. 1 приведены также действующие значения токов в нейтралях трансформаторов и АТ, а на рис. 3 показаны соответствующие графики.

Заземление нейтрали через активные сопротивления приводит к снижению токов через нейтрали трансформаторов ТЗ, Т4, Т6, Т7 на  $45 \div 83$  %, АТ5 — на  $25 \div 75$  %, АТ8 — на  $53 \div 86$  % при соответствующем изменении сопротивления  $R_n$  в диапазоне 10 – 40 Ом. Вместе с тем токи через трансформаторы с короткозамкнутой нейтралью возрастают от 2,65 до 4,44 кА (для Т1, Т2, Т9) и от 2,18 до 3,37 кА (для блочных Т10, Т11). Данное увеличение не опасно для перечисленных трансформаторов, но должно быть учтено при расчёте уставок защит.

В табл. 2 приведены действующие значения токов, протекающих в обмотках трансформаторов и АТ при рассмотренных изменениях сопротивлений в нейтралях. Тенденции к этим изменениям — уменьшение токов в обмотках трансформаторов ТЗ, Т4, Т6, Т7 при увеличении со-

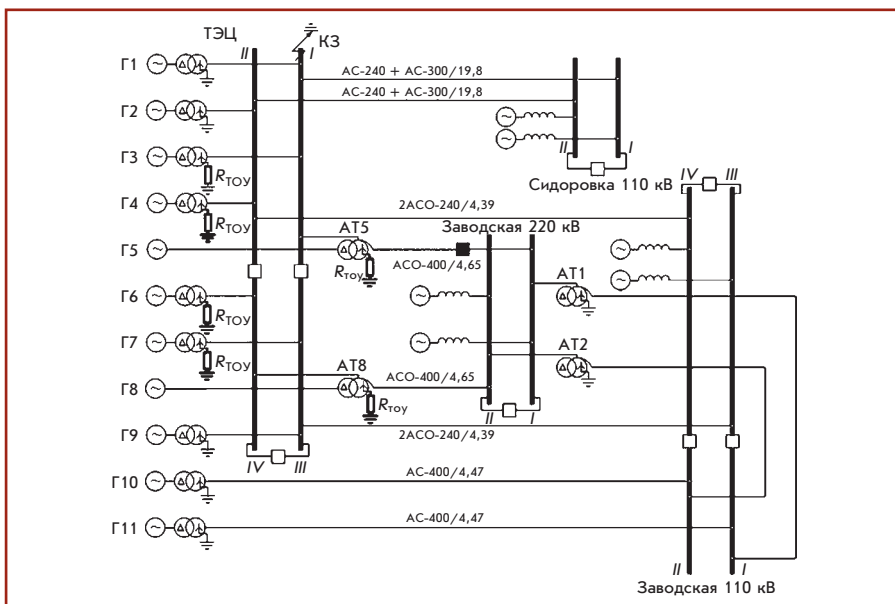


Рис. 1. Расчётная схема электрической сети, прилегающей к Набережно-Челнинской ТЭЦ

Таблица 1

Сопротивление в нейтрали $R_n$ , Ом	Ток КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ, кА	Ток в нейтрали трансформаторов и АТ, кА					
		T1, T2, T9	T3, T4, T6, T7	T10, T11	AT5	AT8	
0	45,4	2,65	4,15	2,18	2,80	5,32	
10	38,9	3,94	2,26	3,02	2,10	2,52	
20	36,4	4,29	1,33	3,26	1,30	1,45	
30	35,6	4,40	0,92	3,34	0,91	1,01	
40	35,2	4,44	0,70	3,37	0,70	0,77	

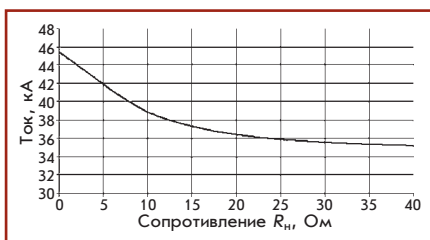


Рис. 2. Ток однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ

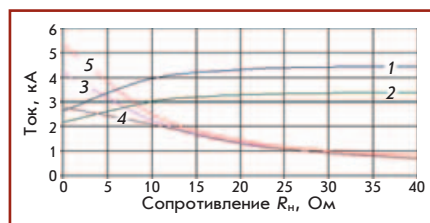


Рис. 3. Токи, проходящие через нейтрали трансформаторов Т1, Т10, Т3 (графики 1, 2, 3) и автотрансформаторов АТ5, АТ8 (графики 4, 5) при однофазных КЗ на шинах ОРУ 110 кВ

противления  $R_n$  и рост токов в обмотках высокого напряжения (ВН) трансформаторов Т1, Т2, Т9 (от 1,88 до 2,26 кА).

Применение ТОУ ограничивается фактором повышения напряжения на нейтрали  $U_n$ . При выборе сопротивления ТОУ рекомендуется за допустимое напряжение на нейтрали трансформаторов 110 кВ и АТ 220 кВ и выше принимать значение  $U_{н, доп} = 65$  кВ, что составляет 65 %  $U_{н1}$  — одноминутного испытательного напряжения нейтрали. Целесообразность запаса по допустимому напряжению мотивируется износом и старением изоляции трансформаторов, срок эксплуатации которых в энергосистемах, как правило, близок или превышает нормативный.

В табл. 3 приведены результаты расчётов напряжений на нейтрали трансформаторов и АТ при различных значениях сопротивлений  $R_n$  в условиях однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ. Данные свидетельствуют, что напряжение составляет менее 35 кВ при всех значениях со-

противления  $R_n$ . По результатам расчётов можно сделать предварительный вывод, что установка в нейтрали трансформаторов Т3, Т4, Т6, Т7 и АТ5, АТ8 резисторов  $10 \text{ Ом} \leq R_n \leq 40 \text{ Ом}$  приводит к поставленной цели — снижению токов однофазного КЗ менее 40 кА при изменениях в сети, обеспечивающих безопасную эксплуатацию основного электрооборудования ТЭЦ.

Для выбора оптимального сопротивления  $R_n$  проведём необходимые расчёты в условиях вывода в ремонт резисторных установок. В табл. 4 приведены действующие значения установившихся токов однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ при работе всех ТОУ, выводе в ремонт одного (режим  $N - 1$ ) и двух (режим  $N - 2$ ). На рис. 4 показаны соответствующие графики.

Как видно из приведённых результатов, в режиме  $N - 1$  использование резисторов  $R_n$  сопротивлением 20 Ом обеспечивает снижение токов КЗ до допустимых значений. Варианты применения резисторов сопротивлением 40 и 30 Ом практически равнозначны. Из этого следует, что оптимальное значение сопротивления для резисторных установок ТОУ-Н-110 — 30 Ом. Режим  $N - 2$  в эксплуатации недопустим для любых сопротивлений в нейтрали  $10 \text{ Ом} \leq R_n \leq 40 \text{ Ом}$ .

Эффективность ТОУ в значительной мере определяется также возможностью значительного уменьшения электродинамических воздействий токов КЗ на оборудование. На рис. 5 показаны расчётные осциллограммы переходных токов КЗ при различных значениях активного сопротивления  $R_n$ . Ударные токи КЗ (амплитудные значения) при различных сопротивлениях в нейтрали в условиях однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ приведены далее:

$R_n$ , Ом	Ударный ток КЗ, кА
0	113,3
10	91,6
20	87,6
30	86,3
40	85,7

Таким образом, ударные токи снижаются на 25 % при установке резисторов 30 Ом по сравнению с токами в условиях короткозамкнутой нейтрали (рис. 6). В табл. 5 приведены соответствующие изменения значений ударного тока КЗ в обмотках НН/ВН трансформаторов и НН/СН/ВН АТ в условиях однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ. При увеличении тока в обмотках ВН трансформаторов Т1, Т2, Т9 с короткозамкнутыми нейтралью, ток в которых возрастает от 4,7 до 5,6 кА, наблюдается значительное уменьшение ударного тока во всех обмотках трансформаторов и АТ.

На основании расчётов разработана электрическая схема ТОУ с заданными техническими характеристиками, определяемыми параметрами комплектующих резисторов, электрической схемой их включения и компоновкой резисторного модуля. Установка ТОУ-Н-110 комплек-

Таблица 2

Сопротивление в нейтрали $R_n$ , Ом	Ток КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ, кА	Ток в обмотках НН/ВН трансформатора и НН/СН/ВН АТ, кА					
		T1, T2, T9	T3, T4, T6, T7	T10, T11	AT5	AT8	
0	45,4	19,8/1,88	19,62/3,03	19,36/3,10	15,25/2,27/0	17,57/7,00/2,27	
10	38,9	17,1/2,17	16,93/1,85	16,69/3,01	13,02/1,61/0	14,99/5,10/1,92	
20	36,4	16,4/2,24	16,24/1,46	16,07/2,98	12,47/1,23/0	14,35/4,40/1,76	
30	35,6	16,22/2,25	16,06/1,36	15,92/2,97	12,34/1,11/0	14,20/4,16/1,70	
40	35,2	16,16/2,26	16,00/1,33	15,88/2,97	12,29/1,07/0	14,15/4,06/1,67	

Таблица 3

Сопротивление в нейтрали $R_n$ , Ом	Напряжение на нейтрали трансформаторов и АТ, кВ		
	T3, T4, T6, T7	AT5	AT8
10	22,6	21,0	25,2
20	26,5	25,9	29,1
30	27,7	27,3	30,2
40	28,1	27,9	30,6
50	28,4	28,3	30,9
60	28,5	28,4	31,0

Таблица 4

Сопротивление в нейтрали $R_n$ , Ом	Установившийся ток однофазного КЗ в трансформаторах и АТ при различных режимах работы ТООУ, кА		
	T3, T4, T6 и AT5; AT8, все ТООУ в работе	T3, T4, T6, T7 и AT5; в ремонте ТООУ AT8 (режим N – 1)	T4, T6, T7 и AT5; в ремонте ТООУ T3 и AT8 (режим N – 2)
10	38,9	40,7	41,8
20	36,4	39,2	40,9
30	35,6	38,7	40,6
40	35,2	38,5	40,5

Таблица 5

Исследуемые трансформаторы и АТ	Удельный ток в обмотках трансформаторов и АТ при разных значениях сопротивления $R_n$ (Ом)	
	0	30
T1, T2, T9	46,7/4,7	36,5/5,6
T3, T4, T6, T7	46,5/7,7	36,3/3,3
T10, T11	42,3/7,3	33,2/6,8
AT5	37,1/6,0/0	28,7/2,8/0
AT8	34,6/18,4/6,0	32,6/10,5/4,3

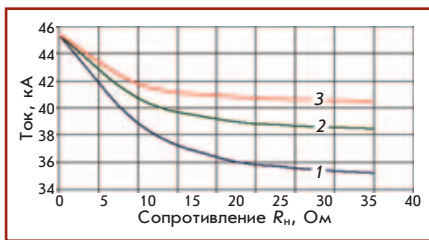


Рис. 4. Ток однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ при работе всех ТООУ (1), выводе в ремонт одного (2) и двух (3) ТООУ

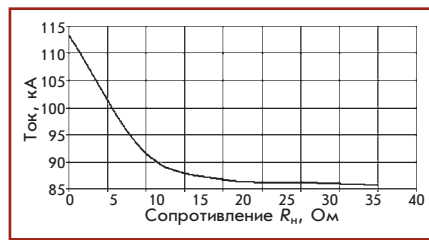


Рис. 6. Ударный ток однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ

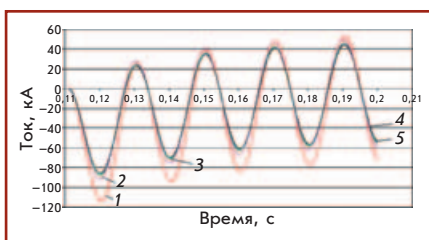


Рис. 5. Переходные токи однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ при разных значениях сопротивлений в нейтрали: 1 – 0 Ом; 2 – 10 Ом; 3 – 20 Ом; 4 – 30 Ом; 5 – 40 Ом

туется резисторами РШ-Э производства ООО «Болид» (г. Новосибирск), изготовленными из электропроводного материала ЭКОМ.

Для обеспечения технических требований по электрической прочности и максимальному токовому воздействию на резистор электрическая схема ТООУ выполнена из двух параллельно включённых цепей по четыре последовательно соединённых резистора в каждой. Сопротивление одного резистора 15 Ом, общее

сопротивление установки ТООУ-Н110 составляет 30 Ом. Чтобы вывести ТООУ в ремонт, предусмотрен разъединитель для отключения устройства от нейтрали трансформатора.

Для защиты шунтирующих резисторов устройства установлен короткозамы-



Рис. 7. Общий вид размещения устройства ТООУ-Н110

катель, при замкнутом положении которого восстанавливается режим работы трансформатора с глухозаземлённой нейтралью. В цепи рабочего заземления ТООУ размещён трансформатор тока, что обеспечивает работу схемы автоматического контроля его функционирования. Конструкция устройства ТООУ-Н110 имеет несущую раму, на которой монтируются две колонки резисторов, разъединитель и трансформатор тока, соединённые согласно электрической схеме. Рама располагается на стойках, закреплённых на фундаменте (рис. 7).

### Выводы

1. Применение устройства ТООУ-Н110 с включением резисторов в нейтрали трансформаторов T3, T4, T6, T7 и автотрансформаторов AT5, AT8 на Набережно-Челнинской ТЭЦ обеспечивает снижение токов однофазного КЗ ( $I^{(1)} < 40$  кА), что позволяет использовать выключатели с  $I_{о,ном} = 40$  кА.

2. Оптимальное значение сопротивления резисторной установки — 30 Ом.

3. По условию уменьшения токов КЗ ниже 40 кА допускается вывод в ремонт одной ТООУ. Режим вывода в ремонт одновременно двух устройств недопустим.

4. При расчёте уставок защит следует учитывать, что в случае установки резисторов в нейтрали трансформаторов T3, T4, T6, T7 и автотрансформаторов AT5, AT8 изменяются токи во всех их нейтралях: T3, T4, T6, T7, AT5, AT8 — в сторону уменьшения, T1, T2, T10, T11 — в сторону увеличения.

5. Размещение резисторов в нейтрали трансформаторов T3, T4, T6, T7 и автотрансформаторов AT5, AT8 приводит к значительному уменьшению электродинамического воздействия на оборудование ОРУ 110 кВ Набережно-Челнинской ТЭЦ.

6. Модульное исполнение устройства ТООУ-Н110 включает в себя две параллельные колонки, состоящие из четырёх последовательно соединённых резисторов РШ-Э. Это позволяет собрать конструкцию, полностью удовлетворяющую техническим требованиям, предъявляемым к силовым резисторам, исходя из электрической прочности и максимальной токовой нагрузки.

7. Резисторные ограничители тока КЗ в нейтралях трансформаторов и АТ — средства оптимизации технических требований к отключающей способности выключателей и повышения ресурса работы трансформаторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.20.175. Указания по ограничению токов короткого замыкания в сетях напряжением 110 кВ и выше. — М.: Минэнерго СССР, 1975.

2. Расчёт коротких замыканий и выбор электрооборудования / И. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов и др. // Под ред. И. П. Крюčkова, В. А. Старшинова. 2-е изд. — М.: Издательский центр «Академия», 2006.