

УДК 621.314.214

Б.Т. Кононов, Л.Ю. Журба

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИЗНОС ПОДВИЖНЫХ КОНТАКТОВ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Устанавливаются параметры, определяющие ресурс работы переключающих устройств регулируемых силовых трансформаторов, установлена связь между восстанавливающим напряжением трансформатора, током нагрузки и напряжением ступени получены соотношения для определения величины тока отключения для различных схем включения, приводятся рекомендации, применение которых позволяет снизить износ подвижных контактов таких устройств.

**Ключевые слова:** трансформатор, регулирование, переключение, напряжение, контакт, износ, переключатель, реактор, нагрузка, сопротивление.

### Введение

**Постановка задачи.** В электрических сетях электроснабжения для местного регулирования напряжения нашли широкое применение регулируемые высоковольтные силовые трансформаторы, в которых изменение напряжения осуществляется путем переключения ответвлений обмотки высшего напряжения трансформатора. Переключение ответвлений (выводов, отходящих от регулировочной обмотки трансформатора) для исключения перерывов в энергоснабжении необходимо осуществлять, не отключая нагрузку трансформатора, применяя для этого специальное переключающее устройство, схема которого приведена на рис. 1.

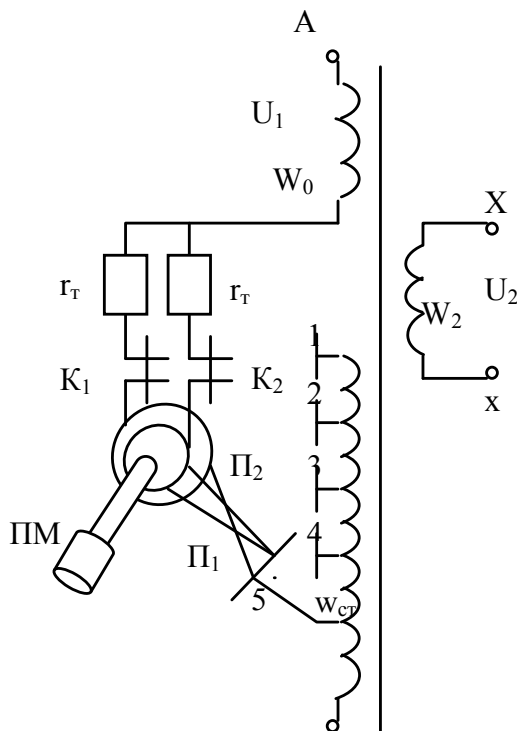


Рис. 1. Схема переключающего устройства

В состав переключающего устройства входят переключатель, содержащий в каждой фазе  $n+1$  неподвижных контакта по числу ответвлений  $n$  и два подвижных контакта П1 и П2, приводной механизм ПМ и токоограничивающие сопротивления  $Z_T$ . В качестве токоограничивающих сопротивлений используются реакторы со стальным сердечником и воздушным зазором или активные сопротивления. Для обеспечения условий работы подвижных контактов П1 и П2 в трансформаторах мощностью более 6300 кВА используются дополнительные контакты К1 и К2, работающие асинхронно с переключателем. Наиболее уязвимыми элементами переключающих устройств являются подвижные контакты П1 и П2, гарантированное число переключений которых, определяет ресурс работы силового трансформатора. Для продления ресурса работы силового трансформатора необходимо установить взаимосвязь между допустимым числом переключений переключающего устройства и параметрами, определяющими работу устройства, и предложить рекомендации, применение которых позволит уменьшить износ подвижных контактов.

**Цель статьи.** Обоснование рекомендаций, обеспечивающих при их реализации повышение эксплуатационной надежности переключающих устройств силовых трансформаторов.

**Анализ литературы.** В [1] предлагается для снижения износа контактов выполнять их из металлокерамического компонента, содержащего вольфрам и медь (кирита). Применение контактов, выполненных из кирита, позволяет примерно вдвое (по сравнению с медными контактами) уменьшить коэффициент трения. Для уменьшения величины контактного сопротивления предлагается использовать в контактном узле пружины, сила нажатия которых примерно равна 4–6 Н. В [2] предлагается для обеспечения требований по изоляции размещать переключающее устройство в бакелитовом цилиндре,

заполненном трансформаторном маслом. В [3] предлагается для уменьшения влияния электрической дуги на работу переключающего устройства уменьшать до нескольких десятков миллисекунд время переключения контактов путем увеличения скорости процесса переключения. Однако увеличение скорости переключения приводит к возникновению опасности смятия контактов из-за сильных ударов. В [4] предлагается для трехфазных трансформаторов с соединением по схеме “звезда” размещать регулировочную обмотку с ответвлениями со стороны нейтрали, что обеспечит работу элементов переключающего устройства под минимально возможным напряжением.

### Основной материал

Обобщая результаты, изложенные в [1 – 4], можно сделать вывод о том, что основными факторами, влияющими на износ контактов, являются величина тока отключения  $I_0$ , величина восстанавливающегося напряжения  $U_v$ , время горения электрической дуги  $\tau$  и скорость движения контактов  $v_k$ . В соответствии с [5] износ контактов определяется выражением

$$q = KI_0^a \tau^b, \quad (1)$$

где  $q$  – износ пары контактов в миллиграммах на одну операцию;

$K$  – коэффициент, зависящий от материала контакта (для кирита ВМ-50 коэффициент  $K=0,032$ );

$a, b$  – коэффициенты, численно равные  $a=1,4 - 1,6$ ;  $b=1,5 - 2$ ;

$\tau$  – время горения дуги, определяемое выражением

$$\tau = 30U_v \sqrt{I_0}, \text{мс} . \quad (2)$$

В (2) напряжение выражено в кВ, а ток – в кА.

Между временем горения дуги  $\tau$  и временем движения контакта  $\tau_{дв}$  должно выполняться следующее условие

$$\tau_{дв} = \frac{l_k}{v_k} \leq \tau, \quad (3)$$

где  $l_k$  – длина контакта.

В существующих конструкциях переключающих устройств увеличение скорости движения контактов  $v_k$  с 0,5 м/с до 0,86 м/с приводит к уменьшению времени горения дуги с 0,08с до 0,065с.

Допустимое число переключений  $N$  можно найти из выражения

$$N = \frac{\Delta Q}{q}, \quad (4)$$

где  $\Delta Q$  – допустимое уменьшение массы контакта.

Установим связь между восстанавливающимся напряжением  $U_v$  (напряжением между контактами П1 и П2, когда один из них разомкнут), током  $I_0$ , напряжением ступени  $U_{ст}$  и током нагрузки  $I$ .

Величина напряжения ступени  $U_{ст}$  определяется номинальным напряжением трансформатора, числом ответвлений регулировочной обмотки, способом включения токоограничивающего сопротивления и его типом. Значения напряжения  $U_{ст}$  в вольтах для различных трансформаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Напряжение ступени  $U_{ст}$  регулируемых трансформаторов

Ступени регулирования	Номинальное напряжение на стороне высокого напряжения					
	6 кВ	10 кВ	13,8 кВ	20 кВ	35 кВ	115 кВ
$\pm 6 \times$ 1,67%	100/ 58	170/ 100	13,8	330/ 190	580/ 335	–
$\pm 8 \times$ 1,25%	72/ 42	123/ 71	–	–	–	–
$\pm 6 \times$ 1,5%	–	–	–	300/ 173	520/ 300	–
$\pm 8 \times$ 1,5%	–	150/ 87	210/ 121	300/ 173	520/ 300	–
$\pm 9 \times$ 1,78%	–	–	–	–	–	2050 / 1190

В табл. 1 данные, приведенные в числителе, соответствуют соединению обмоток по схеме “треугольник”, данные, приведенные в знаменателе, соответствуют соединению обмоток по схеме “звезда”.

Основные схемы включения токоограничивающих сопротивлений показаны на рис. 2.

На рис. 2, а приведена симметричная, а на рис. 2, б показана несимметричная схема включения токоограничивающего реактора Р.

При симметричной схеме оба контакта в исходном состоянии находятся на одной общей отпайке п. В случае несимметричной схемы один из контактов (вспомогательный контакт П2) как бы “висит” в воздухе.

В табл. 2 приведены соотношения, с помощью которых находятся ток отключения, восстанавливающееся напряжение и сопротивление токоограничивающих устройств для различных схем включения и различных типов токоограничивающих устройств. Здесь приняты следующие обозначения:  $I_0$ ,  $U_v$  – ток отключения и восстанавливающееся напряжение при первом, в направлении вращения, разрыве цепи;  $I_0''$ ,  $U_v''$  – ток отключения и восстанавливающееся напряжение при втором разрыве;  $X_p$  – сопротивление одного плеча симметричного реактора;  $X_p'$  – сопротивление несимметричного реактора;  $g$  – величина

активного сопротивления одного плеча токоограничивающего устройства;  $I_k$  – контурный ток, возникающий в положении “мост”, когда контакты П1 и П2 находятся на разных отпайках.

ва и устройства с активными токоограничивающими сопротивлениями.

В случае применения несимметричного реакторного устройства контурный ток  $I_k$  не должен быть больше номинального тока нагрузки.

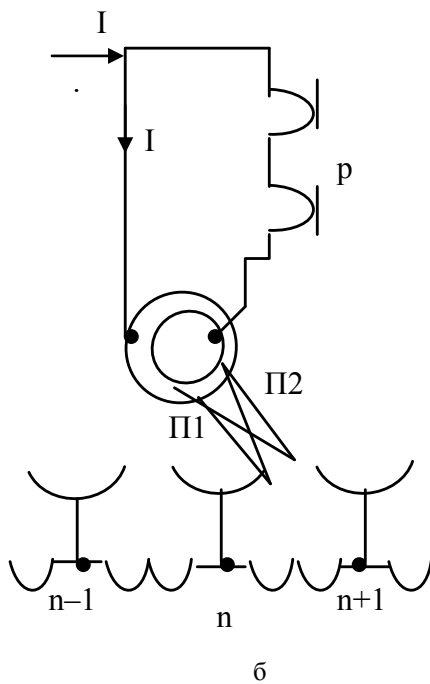
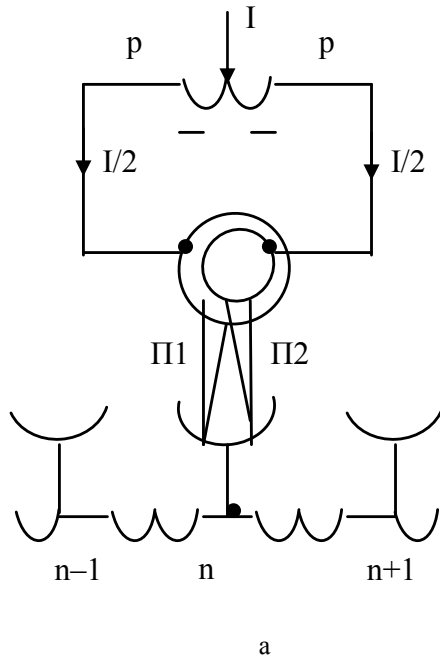


Рис. 2. Схемы включения токоограничивающих сопротивлений

Для ограничения мощности, отключаемой контактами переключателя, величину контактного сопротивления следует выбирать таким образом, чтобы ток  $I_k$  не превышал половины номинального тока нагрузки для симметричного реакторного устрой-

Таблица 2

Расчетные соотношения для определения параметров токоограничивающих устройств

Параметр	Реакторное симметричное		Реакторное несимметричное		Симметричное с активными сопротивлениями	
	От n-1 ступени к n ступени	От n ступени к n+1 ступени	От n-1 ступени к n ступени	От n ступени к n+1 ступени	От n-1 ступени к n ступени	От n ступени к n+1 ступени
$U_B'$	$2j^* X_p I$	$2j^* X_p I$	$U_{ст}$	$jX_p I$	$rI$	$rI$
$I_0'$	$0,5I$	$0,5I$	$I_k - I$	$I$	$I$	$I$
$U_B''$	$\frac{U_{ст,+}}{U_B}$	$\frac{U_{ст,-}}{U_B}$	0	$U_{ст}$	$\frac{U_{ст,+}}{U_B}$	$\frac{U_{ст,-}}{U_B}$
$I_0''$	$0,5I + I_k$	$I_k - 0,5I$	0	$I_k$	$0,5I + I_k$	$I_k - 0,5I$
$I_k$	$\frac{U_{ст}}{4jX_p}$	$\frac{U_{ст}}{4jX_p}$	$\frac{U_{ст}}{jX_p}$	$\frac{U_{ст}}{jX_p}$	$\frac{U_{ст}}{2r}$	$\frac{U_{ст}}{2r}$

Из табл. 2 видно, что значения параметров  $I_0$  и  $U_B$  зависят от направления вращения переключателя от n-1 к n или от n к n+1.

При определении гарантийного числа переключений N следует ориентироваться на наиболее тяжелые режимы работы переключающего устройства.

Для наиболее тяжелых режимов работы используя данные, приведенные в табл. 2, можно получить расчетные формулы для определения максимальных значений токов отключения  $I_0$  и восстанавливаемых напряжений  $U_B$ :

в случае применения симметричного реакторного устройства

$$I_{0max} = I \sqrt{0,25 + \frac{I_k}{I} \sin \varphi + \left(\frac{I_k}{I}\right)^2}; \tag{5}$$

$$U_{Bmax} = U_{ст} \sqrt{1 + \frac{I}{I_k} \sin \varphi + 0,25 \left(\frac{I}{I_k}\right)^2},$$

и в случае применения несимметричного реакторного устройства

$$I_{0\max} = I \sqrt{1 - 2 \frac{I_k}{I} \sin \varphi + \left(\frac{I_k}{I}\right)^2};$$

$$U_{\text{вmax}} = U_{\text{ст}} \sqrt{1 - 2 \frac{I}{I_k} \sin \varphi + \left(\frac{I}{I_k}\right)^2},$$
(6)

В соотношениях (5) и (6) угол  $\varphi$  соответствует углу сдвига фаз между напряжением  $U$  и током  $I$  и определяется характером нагрузки. Для режима номинальных нагрузок с учетом требований по выбору значений контурного тока  $I_k = 0,5I_n$  для симметричного реакторного устройства соотношения (5) и (6) примут вид

$$I_{0\max} = I_{\text{ном}} \sqrt{0,5 (1 + \sin \varphi)};$$

$$U_{\text{вmax}} = U_{\text{ст}} \sqrt{2 (1 + \sin \varphi)};$$

$$I_{0\max} = I_{\text{ном}} \sqrt{2 (1 - \sin \varphi)};$$

$$U_{\text{вmax}} = U_{\text{ст}} \sqrt{2 (1 - \sin \varphi)}.$$
(7)

Из полученных выражений (7) следует, что контакты переключателя, включенного по несимметричной схеме, разрывают меньшую мощность,  $S_{\text{откл}} = I_{0\max} U_{\text{вmax}}$ , чем контакты переключателя, включенного по симметричной схеме. Естественно, что несимметричная схема обеспечит меньший износ контактов.

Вместе с тем, при  $\cos \varphi \approx 1$ , что соответствует чисто активной нагрузке, более выгодно применение переключателей, выполненных по симметричной схеме.

## Выводы

1. Износ контактов переключающих устройств трансформаторов, регулируемых под нагрузкой, зависит от величины тока отключения, значения

восстанавливающегося напряжения, времени горения дуги, возникающей в процессе переключения ответвлений регулируемой обмотки трансформатора и скорости движения контактов.

2. Для уменьшения износа подвижных контактов переключающих устройств силовых трансформаторов целесообразно в зависимости от характера нагрузки применять либо несимметричную (для активно-индуктивной нагрузки), либо симметричную (для активной нагрузки) схему включения токоограничивающих сопротивлений.

3. Скорость движения контактов переключающих устройств силовых трансформаторов должна быть ограничена временем горения электрической дуги и ударными усилиями, возникающими в конце движения контактов и способными вызвать их механические повреждения.

## Список литературы

1. Хольм Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с.
2. Афанасьев В.В. Конструкция выключающих аппаратов высокого напряжения / В.В. Афанасьев. – Л.: Энергия, 1961. – 464 с.
3. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г.В. Буткевич. – М.: Энергия, 1973. – 263 с.
4. Баркан Я.Д. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях / Я.Д. Баркан. – М.: Энергия, 1971. – 412 с.
5. Чунихин А.А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергия, 1975. – 648 с.

Поступила в редколлегию 1.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Н. Чинков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПАРАМЕТРИ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ЗНОС РУХОМИХ КОНТАКТІВ ПЕРЕМІКАЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Б.Т. Кононов, Л.Ю. Журба

*Встановлюються параметри, які визначають ресурс роботи перемикаючих пристроїв регулюючих силових трансформаторів, встановлено зв'язок між напругою трансформатора, що відновлюється, струмом навантаження і напругою ступеня, отримані співвідношення величини струму вимикання для різних схем включення, наводяться рекомендації, використання яких дозволяє знизити знос рухомих контактів таких пристроїв.*

**Ключові слова:** трансформатор, регулювання, перемикач, напруга, контакт, знос, перемикач, реактор, навантаження, опір.

## PARAMETERS WHICH ARE DETERMINE DETERIORATION OF MOVABLE SWITCHING CONNECTIONS OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS

B.T. Kononov, L.Yu. Zhurba

*Parameters are installed which are determine resert of work switching devices which are adjusted by force transformers established connections between transformer's restored tensions, load current and step of voltage, correlation is obtained for determination of breaking current for different closed circuit. Led recommendations, using of which makes it possible to reduce movable connections deterioration of similar devices.*

**Keywords:** transformer, adjusting, switching, tension, connection, deterioration, switch, reactor, load, resistance.