

УДК 621.313

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ИНДУКТИВНОГО ТИПА

С.И. Копылов (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»)
 В.Я. Геча (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)
 Х. Хараламбус (НИУ «МЭИ»)
 В.В. Желтов (ОИВТ РАН)
 В.Е. Сытников (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»)

Приводятся результаты расчётов различных токоограничивающих устройств индуктивного типа. Проведено сравнение токоограничителей трансформаторного и автотрансформаторного типов. Предложен токоограничитель, состоящий из одной секционированной обмотки с выключателями.

Ключевые слова: токоограничивающие устройства, трансформатор, автотрансформатор, обмотка.

В сетях различного напряжения современных развивающихся энергосистем максимальный уровень токов короткого замыкания (КЗ) в той или иной степени непрерывно возрастает. Токоограничивающие устройства (ТУ) – это электротехнические устройства, предназначенные для ограничения токов КЗ в электрических сетях различного напряжения.

Очень сложно быстро отключить цепь при возникновении КЗ [1]. Для отключения разработаны сверхбыстродействующие коммутационные аппараты, полное время отключения цепи которых не превышает 5 мс. К ним относятся аппараты взрывного действия, плавкие предохранители и некоторые другие [2 – 4].

Последние годы в мире и также в РФ особенно активно исследуются ТУ, использующие высокотемпературные сверхпроводящие материалы [5, 6]. В настоящей работе исследуются альтернативные (несверхпроводящие) ТУ.

Методика расчётов. Для численного расчёта характеристик токоограничителя использовались две программы: программа расчёта собственных и взаимных индуктивностей обмоток и программа расчёта переходных процессов. Для каждой из предлагаемых ниже конструкций рассчитывалось несколько вариантов с целью выбора оптимального сочетания характеристик, при условии соблюдения всех параметров, представленных в табл. 1.

Для расчёта собственных и взаимных индуктивностей использовались традиционные методы расчёта. Расчёт переходных процессов состоит из последовательного рассмотрения четырёх режимов:

а) нормального режима – установившегося режима работы сети, существовавшего до момента возникновения КЗ; б) режима нерегулируемого КЗ – промежутка времени от момента возникновения КЗ до начала размыкания выключателей. Этот режим содержит две части – промежуток времени от начала КЗ до момента подачи сигнала управляющей системой на размыкание выключателей (сигнал подаётся по достижении током сети заданного предельного значения J_p) и время задержки срабатывания системы Δt_p – промежуток от момента подачи сигнала на размыкание до фактического начала размыкания выключателей (значение Δt_p определяется техническими характеристиками управляющей системы). Скорость изменения тока в этом режиме ограничивается только сопротивлением защищаемого участка сети (т. е. сопротивлением генератора $\omega L_g, R_g$) и эквивалентным сопротивлением токоограничителя (сопротивлением токоограничителя при замкнутых выключателях ωL_s); в) режима размыкания выключателей. Длительность этого режима определяется характеристикой выключателя – зависимостью, которая описывает увеличение сопротивления плавкой вставки выключателя со временем. Характеристика может варьироваться путём изменения материала и размеров вставки; г) режима ограничения тока – режима, установившегося после размыкания всех выключателей токоограничителя. Максимальная величина тока в этом режиме J_0 определяется практически только индуктивностью обмотки токоограничителя. Поэтому заданные значения J_0 (наряду с величиной номинального тока J_N) являются основными параметрами, определяющими весогабаритные характеристики токоограничителя.

Данные технического задания к расчёту токоограничителя

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Значение
Номинальное напряжение. Действующее значение	U_N	кВ	132
Номинальный ток. Действующее значение. (Номинальный режим работы сети – все выключатели замкнуты)	J_N	кА	2
Падение напряжения на токоограничителе в номинальном режиме. Действующее значение. Не более	ΔU_N	кВ	1
Ток срабатывания защиты токоограничителя. Мгновенное значение. (Ток сети, при котором подаётся сигнал на размыкание выключателей)	J_P	кА	5
Ударный ток. Мгновенное значение. Не более. (Максимально допустимое значение тока в режиме КЗ)	J_U	кА	15
Ток в режиме «ограничения тока» (все выключатели разомкнуты, сопротивление нагрузки равно нулю, ток в сети ограничивается только сопротивлением обмотки токоограничителя и характеристиками генератора L_g, R_g). Максимальное значение. Не более	J_0	кА	15
Индуктивность генератора	L_g	мГн	2
Активное сопротивление генератора	R_g	Ом	0,01
Время запаздывания срабатывания системы управления выключателями	$\Delta \tau_p$	мс	0,1
Допустимое время размыкания вторичной обмотки токоограничителя	τ_p	мс	от 1 до 10
Время отключения релейной защиты сети. Не более. (Это время равно максимальному времени работы токоограничителя в аварийном режиме).	τ_c	мс	120
Время восстановления работоспособности токоограничителя. (Время восстановления готовности токоограничителя к пробному включению релейной защиты)	$\Delta \tau$	с	2
Количество следующих подряд пробных включений релейной защиты. Не более	n	шт.	3

Принципиальная схема токоограничителя трансформаторного и автотрансформаторного типов приведены на рис. 1.

Особенность токоограничителя автотрансформаторного типа состоит в том, что его обмотки связаны не только индуктивно, но и гальванически (см. схему на рис. 1, б). Поэтому, более естественно считать, что такой токоограничитель имеет только одну обмотку, разделённую на несколько секций. В номинальном режиме ток секции L_1 равен току сети $J_1=J_S$, а токи короткозамкнутых секций направлены противоположно J_S (при этом модуль тока через выключатель каждой из секций равен сумме модулей тока секции и тока сети). Это, как и в случае токоограничителя трансформаторного типа, обеспечивает низкое значение эквивалентной индуктивности L_3 . В процессе размыкания выключателя ток соответствующей секции ме-

няет направление и далее растёт до значения, равного току сети. В режиме ограничения тока все секции обмотки оказываются соединёнными последовательно и все участвуют в формировании необходимой индуктивности L_0 . В этом и состоит резерв экономии материала по сравнению с трансформаторной схемой, в которой величина L_0 равна индуктивности только первичной обмотки. По условиям расчёта количество короткозамкнутых секций и, соответственно, количество выключателей может быть любым. Предполагается, что сигнал на размыкание подаётся управляющей системой одновременно на все выключатели. Однако характеристики выключателей и время задержки их срабатывания $\Delta \tau_p$ можно задавать различными. Такой подход позволяет определить влияние на переходный процесс естественного разброса технических характеристик выключателей.

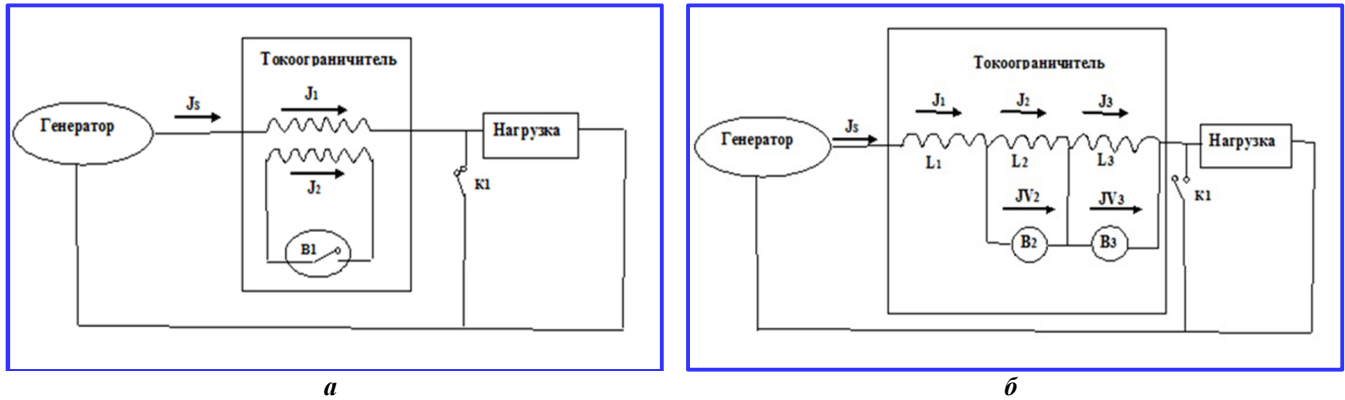


Рис. 1. Схема включения токоограничителя: а – трансформаторного типа; б – автотрансформаторного типа

При наличии n секций, из которых секция №1 не содержит выключателя, а остальные (с номерами от 2 до n) короткозамкнуты, распределение токов определяется системой из n дифференциальных уравнений:

$$L \frac{dJ_s}{dt} + \sum_{i=2}^n \frac{dJ_i}{dt} L_{i\exists} = U_0 \sin(\omega t + \phi_0) - R J_s - \sum_{i=2}^n R_i J_i; \quad (1)$$

$$M_{21} \frac{dJ_s}{dt} + \sum_{i=2}^n M_{2i} \frac{dJ_i}{dt} = R_{V1} (J_s - J_i) - R_i J_i; \quad (2)$$

$$M_{n1} \frac{dJ_s}{dt} + \sum_{i=2}^n M_{ni} \frac{dJ_i}{dt} = R_{Vn} (J_s - J_n) - R_n J_n. \quad (3)$$

Здесь R_i, J_i – активное сопротивление и ток секции i ; M_{ki} – взаимная индуктивность секций k и i ; R_{Vi} – сопротивление выключателя секции i ; $L_{i\exists}$ – эквивалентная индуктивность секции i , равная сумме строки i в матрице взаимных индуктивностей секций $L_{i\exists} = \sum_{j=1}^n M_{ij}$. Для расчёта токов через

выключатели и напряжений на них используются соотношения: $J_{Vi} = J_s - J_i$, $U_{Vi} = R_{Vi} J_n$. Кроме того, естественно, что $J_1 = J_s$.

Из системы (1) – (3) видно, что значения R и L представляют собой активное сопротивление и индуктивность участка цепи, не замкнутого выключателями. Поэтому, в номинальном режиме: $L = L_g + L_{i\exists} + L_n$ и $R = R_g + R_1 + R_n$. Значения R_{Vi} , есте-

ственно, равны сопротивлениям замкнутых выключателей. При переходе к режиму нерегулируемого КЗ следует положить $R_n = 0$ и $L_n = 0$. При размыкании выключателей значения R_{Vi} вычисляются в соответствии с заданной для них характеристикой. Момент полного размыкания устанавливается условием $J_{Vi} < 0,001 J_i$. После полного размыкания выключателя i , из системы (1) – (3) исключается уравнение, соответствующее секции, которую замыкал этот выключатель (уравнение (3)). С этого момента $J_i = J_s$, а к значению L в уравнении (1) добавляется эквивалентная индуктивность секции i : $L = L + L_{i\exists}$. После полного размыкания выключателя, напряжение на нём не может быть вычислено как произведение $R_{Vi} J_i$, так как это соотношение становится неопределённостью вида $\infty \cdot 0$. Поэтому используется соотношение:

$$U_{Vi} = \sum_{j=1}^n M_{ij} \frac{dJ_j}{dt} - J_i R_i. \quad (4)$$

Режим ограничения тока наступает после полного размыкания всех выключателей. К этому времени в системе (1) – (3) остаётся только первое уравнение, определяющее ток сети, которому равны токи всех секций обмотки.

Результаты расчётов. Итоговые результаты проведённых расчётов сведены в табл. 2, схемы и геометрические характеристики обмоток даны на рис. 2 – 5. Всего представлено 4 варианта (далее В) токоограничителей автотрансформаторного типа (от В2 до В5), использующих соответственно 1, 2, 3 и 4 выключателя. Данные В1 приведены для сравнения и рассчитаны по программе, описанной в [7]. Ниже будут даны комментарии к В1 – В4.

Характеристики токоограничителей

Характеристика	B1	B2	B3	B4	B5
Вид обмотки	послойная, схема трансформа- тора	дисковые катушки, схема автотрансформатора			
Количество слоёв или дисков, материал обмотки	10 медь	9 медь	7 медь	5 медь	1** сталь
Количество выключателей	1	1	2	3	4
Внутренний диаметр, м	2,15	1,45	1,65	1,65	1,0
Наружный диаметр, м	2,98	2,9	2,9	2,9	2,5
Общая высота обмотки, м	1,9	0,835	0,775	0,545	0,1
Суммарное число витков	200+40	206	191	188	296
Общий вес обмотки, т	26,9	18,3	13,69	8,76	0,64
Потребляемая мощность в номи- нальном режиме (выключатели за- мкнуты), кВт	296	178,2	120,3	83,26	1,2
Падение напряжения на токоограни- чителе в номинальном режиме*, кВ	0,81	0,98	0,86	0,65	0,00
Индуктивность токоограничителя в номинальном режиме, мГн	1,28	1,56	1,37	1,04	0,00
Токи секций в номинальном режиме*, кА	2; 10,1	2; 5,76	2; 2,12; 2,12	2; 0,70; 2,58; 0,70	0,00
Плотности токов в секциях в номи- нальном режиме*, А/мм ²	2,29; 2,02	2,13; 1,92	1,96; 2,08	1,96; 2,06; 2,02; 2,06	0,00
Индуктивность токоограничителя в режиме «ограничения тока», мГн	76,5	76,8	77,0	77,7	157,4
Ударный ток, кА	14,0	14,2	13,4	14,25	14,9
Максимальное значение тока в режиме ограничения тока, кА	14,4	14,5	14,4	14,3	5,83
Амплитуда переменной составляю- щей тока в режиме ограничения тока, кА	7,25	7,23	7,26	8,45	3,5
Максимальное среднее значение тока в режиме ограничения тока, кА	7,16	7,01	7,06	5,7	0,15
Оптимальный коэффициент увеличе- ния сопротивления выключателя при размыкании k_R	3,7	5	11	12	15
Максимальные напряжения на вы- ключателях в аварийном режиме, кВ	54,6	68,8	62,6; 62,6	54,3; 59,4; 54,3	66,5
Максимальные токи через выключа- тели в аварийном режиме, кА	69,7	56,1	26,9; 26,9	19,8; 31,4; 19,8	14,85
Напряжения на выключателях в ре- жиме ограничения тока*, кВ	34,2	31,4	29,6; 29,6	28,4; 19,5; 28,4	31,4

*– действующие значения; ** – характеристики B5 вычислены при соблюдении одного из следующих условий: 1) сокращения времени запаздывания срабатывания выключателей с 0,1 до 0,075 мс; 2) увеличения собственной индуктивности аварийного участка цепи (индуктивности генератора) с 2 до 3,6 мГн; 3) включения дополнительной обмотки индуктивностью 1,6 мГн.

Ориентировочные характеристики дополнительной обмотки: $d=1$ м; $D=2$ м; $H=0,1$ м; $W=31$; $P=12,4$ кВт; $G=1,3$ т.

Конструкция В5 имеет особый характер, она будет рассмотрена в разделе «Адиабатическая обмотка».

Основным параметром, ограничивающим возможности выключателей взрывного типа, является допустимое напряжение размыкания. До сих пор они используются при действующих значениях напряжения размыкаемой цепи до 35 – 40 кВ. При этом известно, что максимальные напряжения в момент размыкания вдвое выше действующих значений. В соответствии с этими данными все предложенные конструкции рассчитывались, исходя из следующих условий: максимальное напряжение размыкания на выключателе не должно превышать 70 кВ, а действующее напряжение на выключателе в режиме ограничения тока должно быть не выше 35 кВ.

Понижение напряжения размыкания в токоограничителях трансформаторного типа достигается соответствующим выбором коэффициента трансформации k_T . При этом изменение k_T , практически не влияет ни на вес обмотки, ни на потребляемую мощность (число витков вторичной обмотки снижается по отношению к числу витков первичной обмотки в k_T раз, однако, во столько же раз возрастает ток вторичной обмотки и, следовательно, необходимое сечение витка). В этой ситуации возможности повышения k_T ограничены лишь соображениями технологического характера – слишком большое сечение витка при высоких значениях k_T . В случае токоограничителей автотрансформаторного типа ситуация иная: чем большая часть обмотки закорочена, тем меньше её объём и потребляемая мощность. Следовательно, использование нескольких выключателей (или выключателей с более высокими значениями напряжений размыкания) становится решающим фактором улучшения характеристик токоограничителя в целом.

Из табл. 2 видно, что при использовании одного, двух и трёх выключателей вес обмотки по сравнению с токоограничителем трансформаторного типа уменьшается соответственно в 1,47; 1,96 и 3 раза, а потребляемая мощность – в 1,66; 2,46 и 3,55 раза. Заметим, что соотношение между выигрышем в весе обмотки (и соответственно, в её объёме V) и в потребляемой мощности зависит только от вариаций в выборе плотности тока, поскольку $P = \rho j^2 V$. В предлагаемых конструкциях плотность тока была несколько снижена по сравнению с вариантом послышной обмотки в связи с ухудшением условий охлаждения.

В процессе расчётов была выявлена ещё одна особенность: чем компактнее обмотка, тем легче достичь заданного значения эквивалентной индуктивности токоограничителя L_3 .

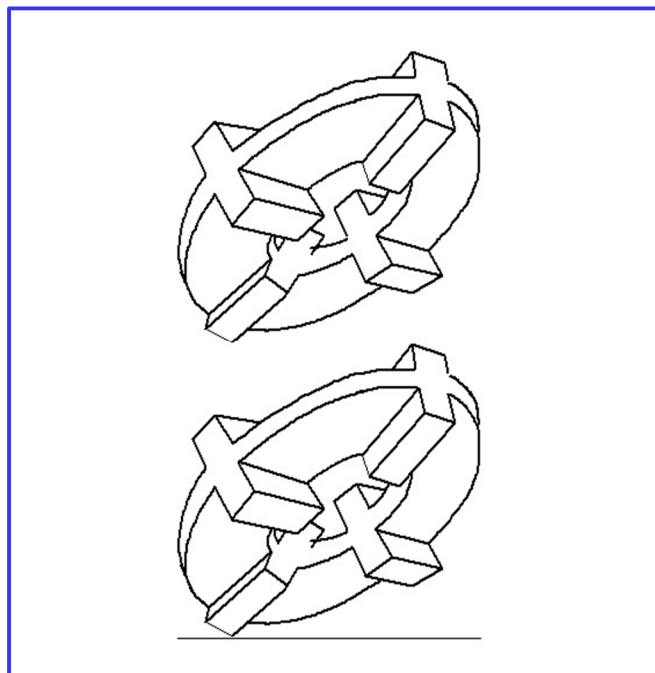


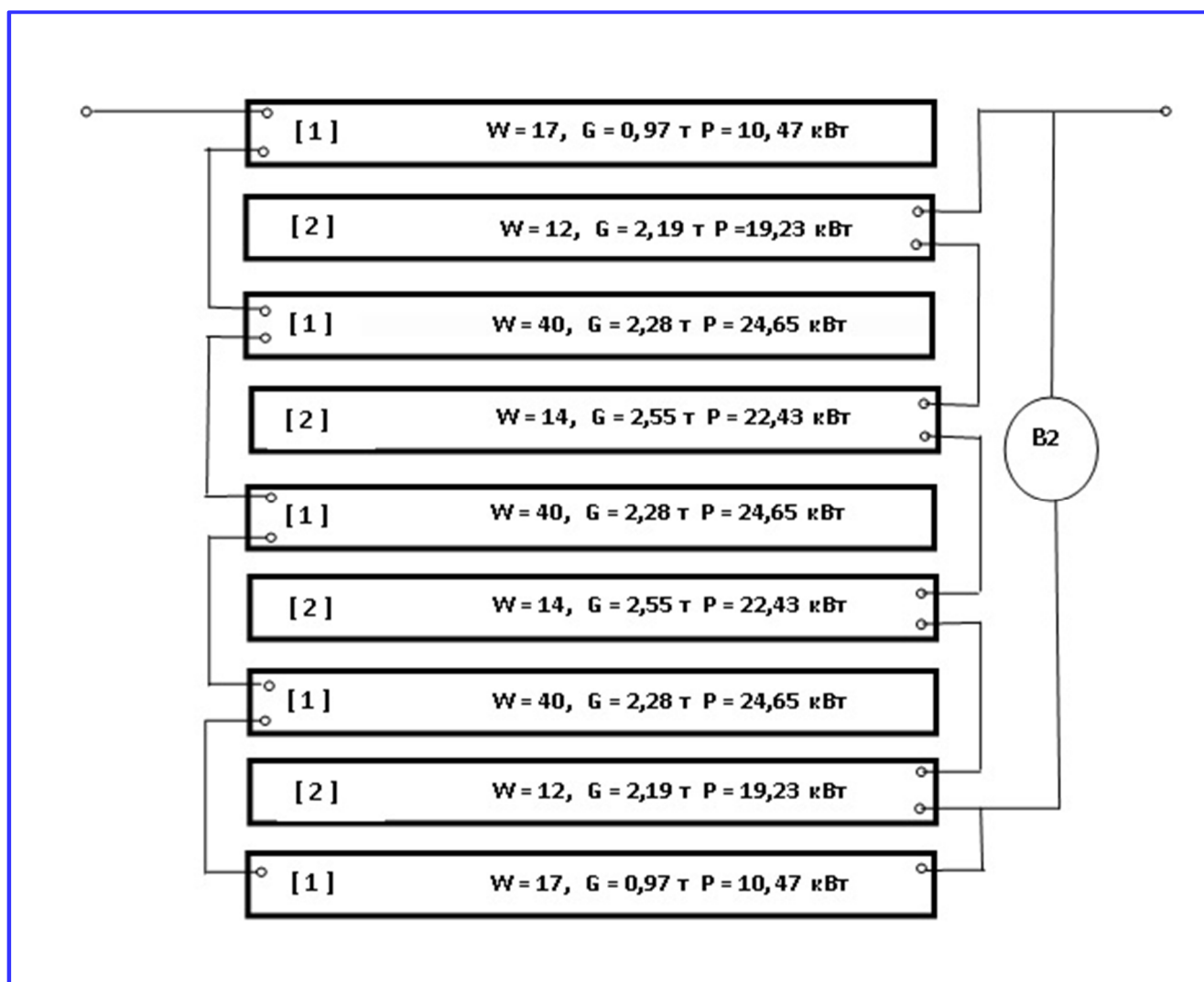
Рис. 2. Предполагаемая конструкция дисков токоограничителей для В2 – В4

Если в В1 необходимого результата удалось достичь только путём разделения обмоток на слои [7], то в новых вариантах токоограничителей оказалось возможным использовать схему чередующихся дисковых катушек.

Этот вариант представляется предпочтительнее с точки зрения технологии изготовления в серийном производстве: диски могут быть замоноличены и снабжены рёбрами жёсткости, размеры которых одновременно обеспечивают необходимый для охлаждения зазор между дисками (достаточно 15 – 20 мм). В результате конструкция обмотки становится модульной (см. рис. 2).

Варьируя количество базовых модулей-дисков, можно изменять характеристики токоограничителей. Специальное оборудование необходимо лишь при изготовлении дисков. Сборка конструкции из дисков представляется несложной технологической задачей.

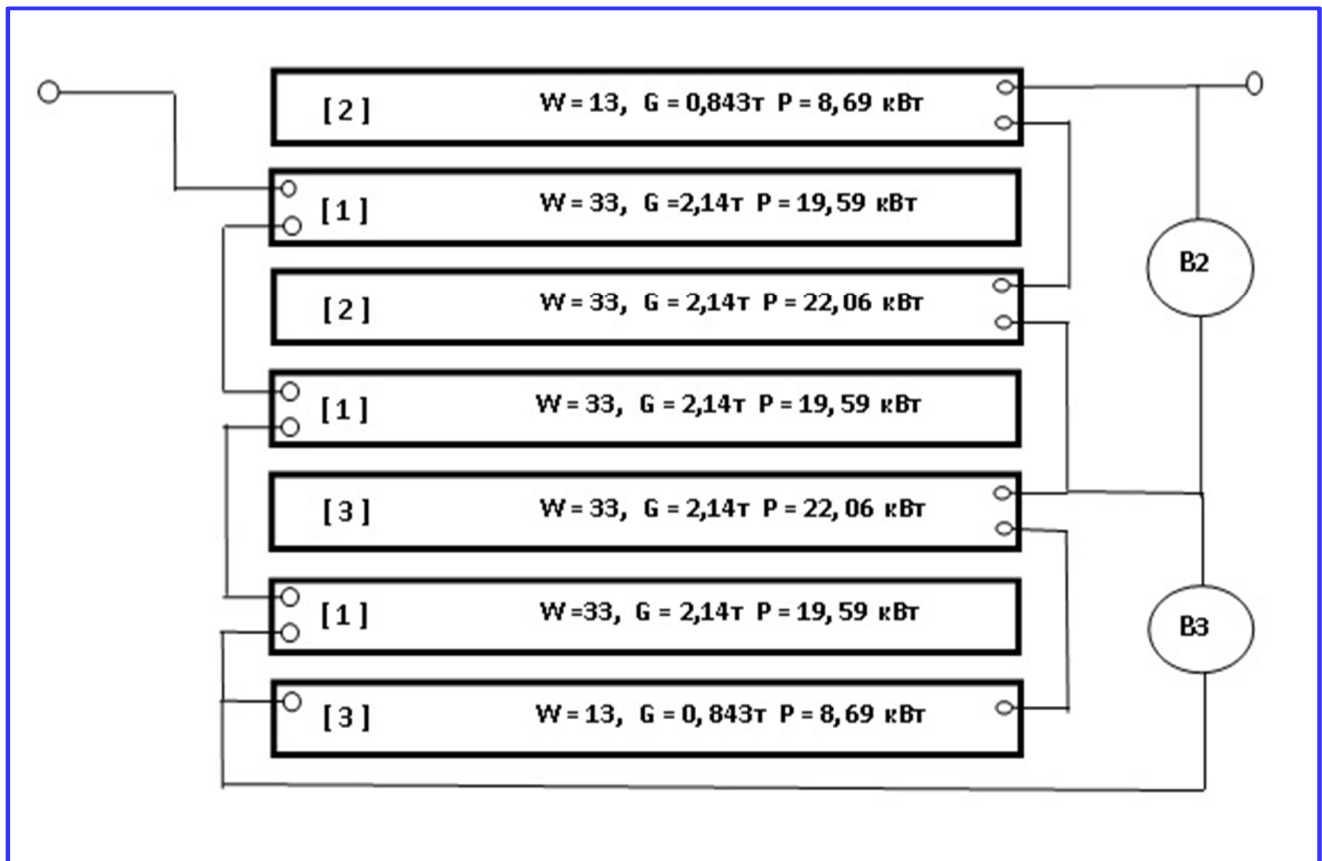
В случае, если прочность компаунда окажется недостаточной при расчётной толщине диска, возможно использование, в качестве базовых модулей, сборки из пары дисков (принадлежащих разным секциям обмотки), разделённых рёбрами жёсткости. Прочность такой конструкции значительно выше. По мере уменьшения объёма обмотки преимущества дисковой конструкции возрастают.



Геометрические характеристики обмотки (тип обмотки – дисковая)

Число дисков в секциях №1, №2 соответственно	n_1, n_2	5, 4
Число витков секций №1, №2 соответственно	W_1, W_2	154, 52
Расстояние между токоведущими частями витков соседних дисков	δ	20 мм
Высота токоведущей части витка в диске	h	75 мм
Структура витка секции № 1	b_1h	5 медных лент сечением $2,5 \times 75 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение $937,5 \text{ мм}^2$
Структура витка секции № 2	b_2h	16 медных лент сечением $2,5 \times 75 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение 3000 мм^2

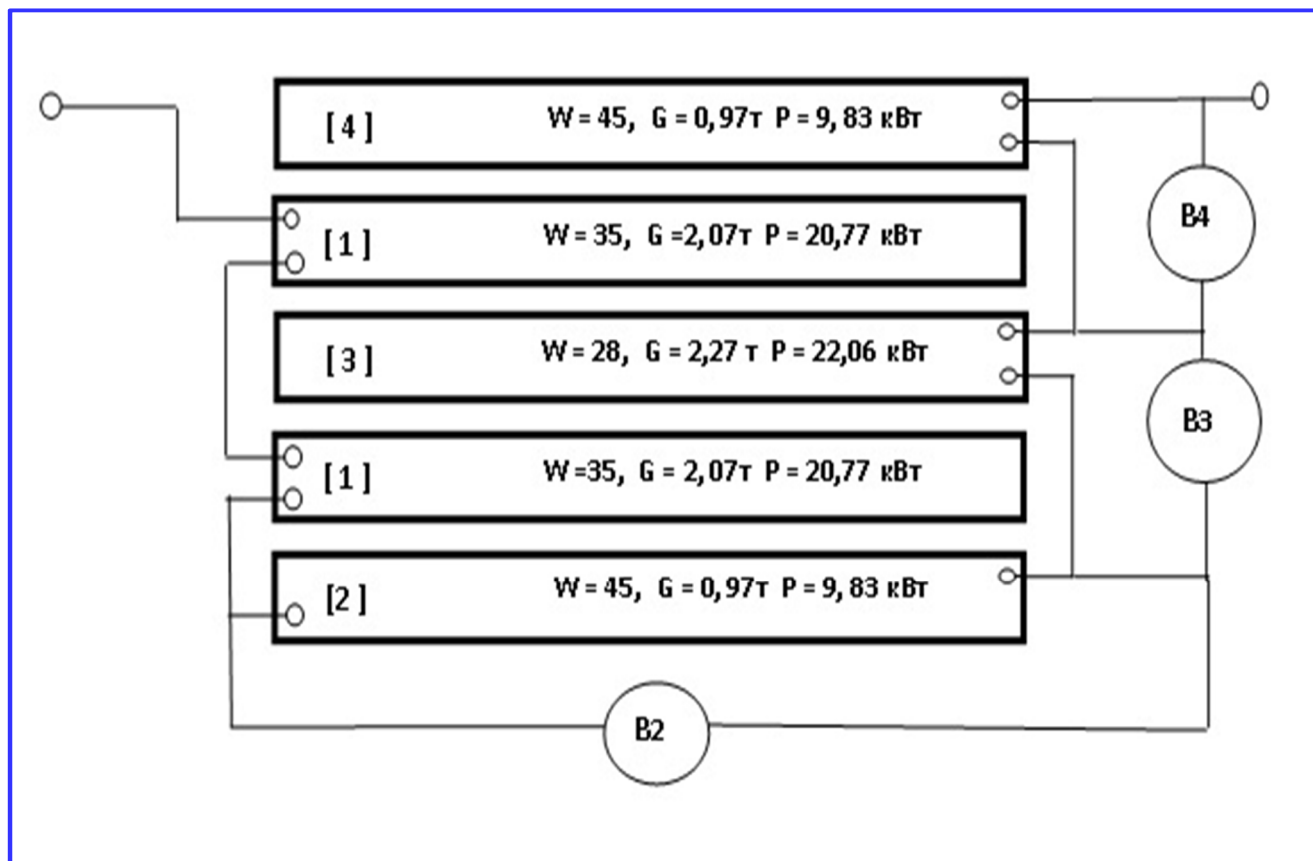
Рис. 3. Схема обмотки токоограничителя автотрансформаторного типа с одним выключателем, В2. Цифра в квадратных скобках – номер секции, которой принадлежит диск. W, G, P – число витков в диске, вес меди в диске, мощность тепловых потерь в диске (в номинальном режиме)



Геометрические характеристики обмотки (тип обмотки – дисковая)

Число дисков в секциях №1, №2, №3 соответственно	n_1, n_2, n_3	3, 2, 2
Число витков секций №1, №2, №3 соответственно	W_1, W_2, W_3	99, 46, 46
Расстояние между токоведущими частями витков соседних дисков	δ	30 мм
Высота токоведущей части витка в диске	h	85 мм
Структура витка (одинакова для всех секций)	bh	6 медных лент сечением $2 \cdot 85 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение 1020 мм^2

Рис. 4. Схема обмотки ограничителя автотрансформаторного типа с двумя выключателями, В3. Цифра в квадратных скобках – номер секции, которой принадлежит диск. W, G, P – число витков в диске, вес меди в диске, мощность тепловых потерь в диске (в номинальном режиме)



Геометрические характеристики обмотки (тип обмотки – дисковая)

Число дисков в секциях №1, №2, №3, №4 соответственно	n_1, n_2, n_3, n_4	2, 1, 1, 1
Число витков секций №1, №2, №3, №4 соответственно	W_1, W_2, W_3, W_4	70, 45, 28, 45
Расстояние между токоведущими частями витков соседних дисков	δ	30 мм
Высота токоведущей части витка в диске	h	85 мм
Структура витка секции №1	$b_1 h_1$	6 медных лент сечением $2 \times 85 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение 1020 мм^2
Структура витка секции №2, №4	$b_2 h_2 = b_4 h_4$	2 медных ленты сечением $2 \times 85 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение 340 мм^2
Структура витка секции №3	$b_3 h_3$	6 медных лент сечением $2,5 \times 85 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение 1275 мм^2

Рис. 5. Схема обмотки токоограничителя автотрансформаторного типа с тремя выключателями, В4. Цифра в квадратных скобках – номер секции, которой принадлежит диск. W, G, P – число витков в диске, вес меди в диске, мощность тепловых потерь в диске (в номинальном режиме)

Если в В2 необходимое значение L_s достигнуто при высоте витка 75 мм и расстоянии между витками соседних дисков 20 мм (см. рис. 3), то в последующих вариантах удалось перейти на более технологичные размеры – 85 и 30 мм соответственно (см. рис. 4 и 5).

Отметим дополнительное технологическое преимущество В3 – в этом варианте закорочена приблизительно половина витков обмотки токоограничителя, и это дало возможность использовать один и тот же проводник для всех секций. К сожалению, во всех вариантах для достижения заданного значения L_s сохраняется необходимость уменьшения числа витков в крайних дисках по отношению к дискам, расположенным внутри обмотки. Это – отрицательный фактор, прежде всего, с точки зрения условий теплоотдачи: при неизменной мощности обмотки в целом тепловая нагрузка на центральные диски возрастает.

Основные количественные данные для всех вариантов приведены в табл. 2. Изменение токов и напряжений в переходном процессе для вариантов В1 – В4 качественно одинаковы. Поэтому, мы посчитали возможным представить соответствующие зависимости только для одного из рассчитанных вариантов (для В4 на рис. 6 и 7) и ограничиться несколькими дополнительными замечаниями. Из приведённых зависимостей видно, что значения напряжения, близкие к максимальным, действуют лишь на начальной стадии процесса размыкания. Уже через 1 мс напряжение на выключателе и текущий через него ток падают вдвое, в то время как весь процесс размыкания занимает время порядка 3,5 – 5 мс. Не исключено, что благодаря этой особенности, возможно допустить большее значение максимального напряжения размыкания и, соответственно, уменьшить количество используемых выключателей или дополнительно сократить вес обмотки.

В случае использования нескольких выключателей существенным является вопрос о влиянии на переходный процесс естественного разброса в их технических характеристиках. С целью его исследования были проведены расчёты для случаев разброса в характеристиках выключателей в пределах 25% относительно соответствующих средних значений. Результаты показали, что такой разброс не приводит к сколько-нибудь существенным изменениям. Например, если для В4 принять значения задержки срабатывания выключателей для секций № 2, № 3 и № 4 равными соответственно: 0,075, 0,1 и 0,125 мс, то изменение значений токов в режиме нерегулируемого КЗ и режиме размыкания выключателей не превысит 1%, а изменение напряжений

на выключателях – 4%. Параметры режима ограничения тока останутся практически неизменными. Эти результаты демонстрируют возможность совместной работы нескольких выключателей, но ни в коем случае не означают, что допустим произвол в выборе их характеристик.

Из табл. 2 видно, что оптимальный вид $R_V(dt)$ меняется в зависимости от варианта обмотки гораздо более существенно (коэффициент k_R изменяется в 4 раза). Неопределённость такого порядка может изменить значения ударного тока более чем на 100%. Поэтому, уточнение возможностей варьирования характеристик выключателей и корректная экспериментальная проверка этих характеристик является необходимым условием успешности работы в целом.

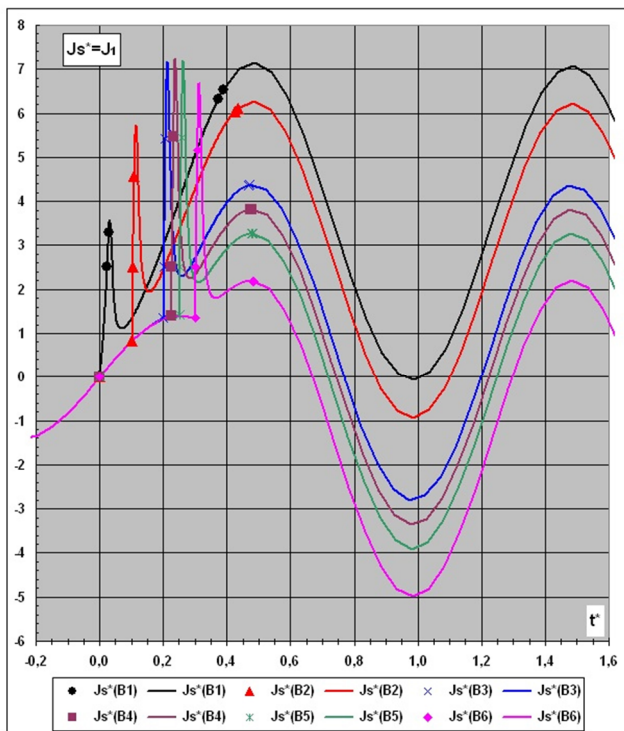
Адиабатическая обмотка. При использовании четырёх выключателей, конструкция токоограничителя меняется радикально (см. В5 табл. 2). В этом случае, обмотка токоограничителя разбивается на 4 секции, каждая из которых замкнута выключателем (ограничения по напряжению размыкания выключателей, естественно, соблюдаются). В результате, в номинальном режиме ток течёт только через выключатели и сечение проводника обмотки нужно выбирать только по условиям её нагрева в аварийном режиме. Потери тепла в аварийном режиме существенно возрастают, как за счёт увеличения амплитуды колебаний тока, так и благодаря наличию постоянной составляющей тока J_s . Интегрируя выражение $J^2 R$ по времени для зависимости $J(t) = J_s + \Delta J \sin(\omega t)$ и нормируя полученные потери на величину потерь в номинальном режиме, получим:

$$P_{K3} = P_n k_p, \quad (5a)$$

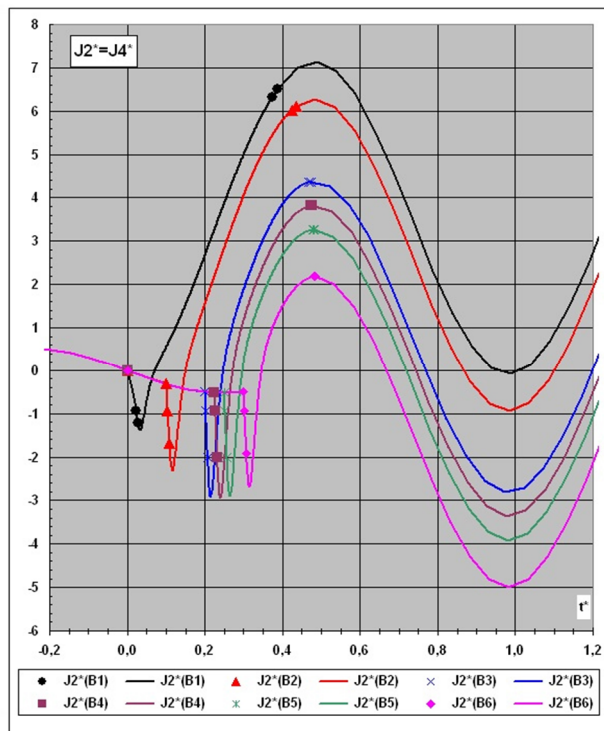
$$\text{где } k_p = \frac{1}{J_n^2} \left(J_s^2 + \frac{4}{\pi} J_s \Delta J + \frac{1}{2} \Delta J^2 \right). \quad (5b)$$

Принимая наихудшие, с точки зрения увеличения мощности потерь, значения $\Delta J = J_s = 7,25$ кА, получим, что для всех вариантов $k \leq 40$.

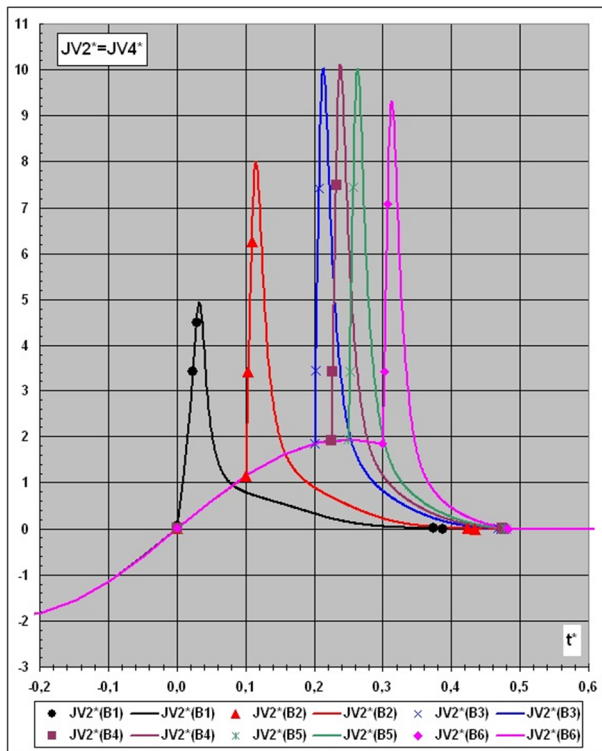
Значит, значение мощности потерь в режиме КЗ может достигать в расчёте на единицу массы проводника 0,4 кВт/кг. Однако время переходного процесса не превышает 120 мс. Поэтому, количество выделяемого тепла составит не более 48 Дж/кг.



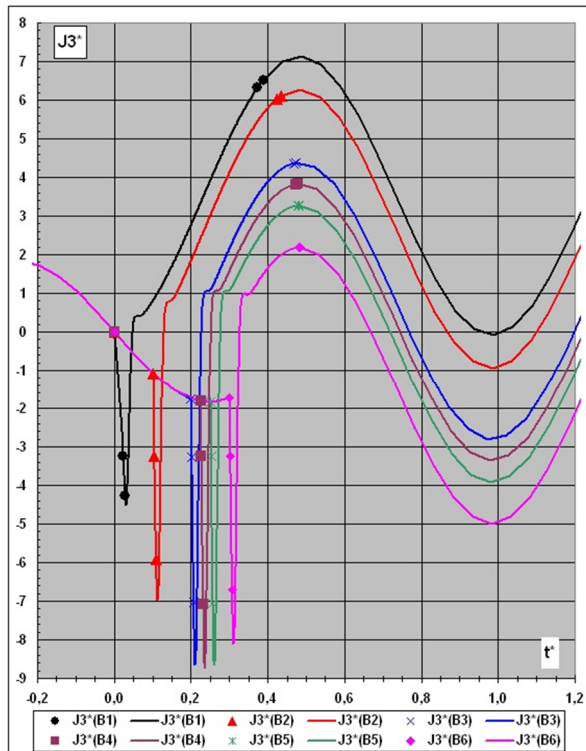
a



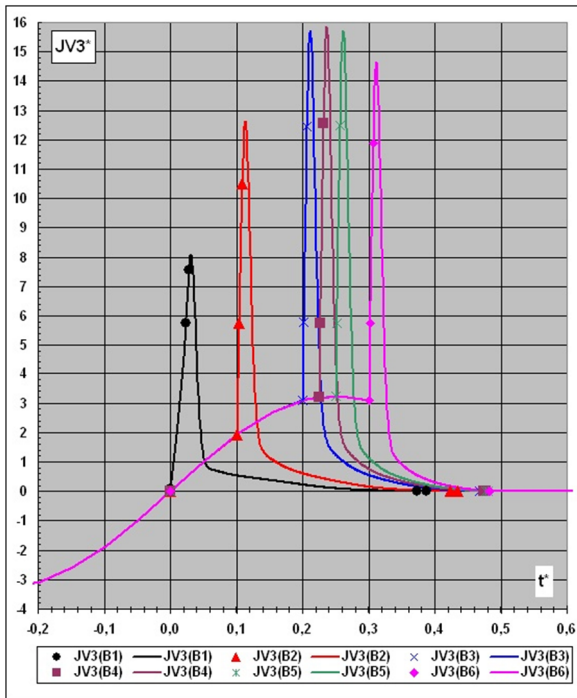
b



g



z



δ

Рис. 6. Изменение тока: *a* – сети (равного тока секции №1) в переходном процессе, В4; *б* – секций №2 и №4 в переходном процессе, В4; *в* – через выключатели секций №2 и №4 в переходном процессе, В4; *г* – секции №3 в переходном процессе, В4; *д* – через выключатель секции №3 в переходном процессе, В4. $J^*=J/J_n$, $t^*=t/T$, $J_n=2$ кА, $T=20$ мс. Параметр кривых – время начала режима КЗ. Точки – моменты начала режимов

Нагревы в аварийных режимах в силу кратковременности процесса, являются адиабатическими, т. е. вся выделяемая энергия поглощается токонесущей частью проводника. Изменение его температуры равно:

$$\Delta t = \frac{j_N^2 \rho \tau k_p}{c \gamma}, \quad (6)$$

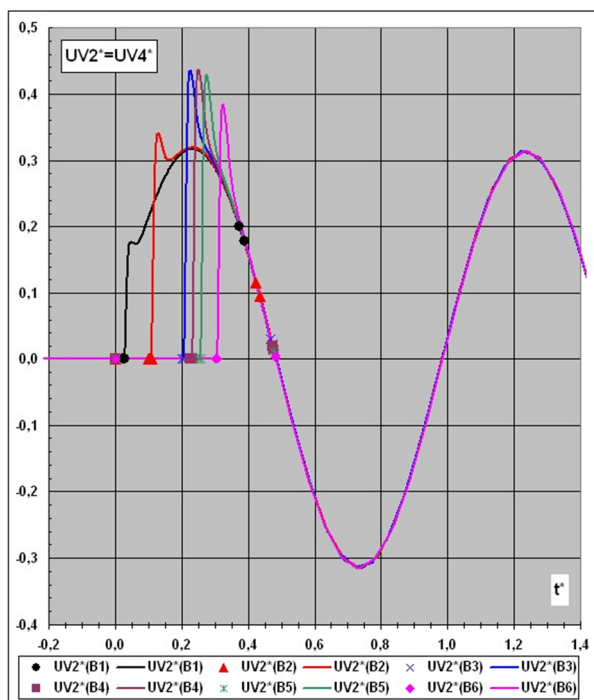
где ρ , c , γ – соответственно удельные электропроводность, теплоёмкость и вес токонесущей части материала обмотки; j_N – плотность тока, которая была бы в обмотке при разомкнутых выключателях и номинальном значении тока; k_p – коэффициент увеличения мощности в аварийном режиме, вычисляемый по (5, б); τ – длительность аварийного режима. Из (6) следует, что:

1. При указанной длительности аварийного режима, допустимая плотность тока в обмотке составляет десятки А/мм². При таких плотностях тока вопрос компенсации электродинамических усилий становится более существенным, чем обеспечение низкого электрического сопротивления.

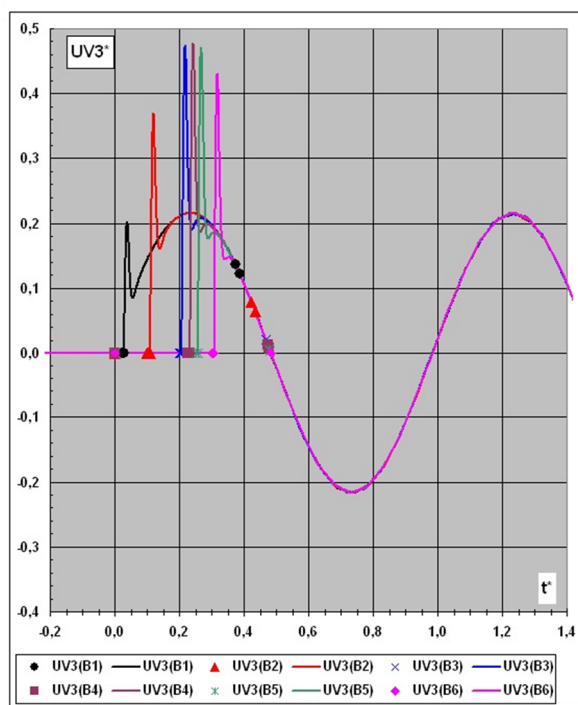
2. Увеличение индуктивности обмотки (и, следовательно, уменьшение J в режиме ограничения тока) ведёт не к увеличению, а к уменьшению необходимого объёма обмотки. Следовательно, возможно одновременное улучшение и весогабаритных характеристик, и качества защиты сети.

Изложенные обстоятельства позволяют предложить достаточно простую конструкцию обмотки токоограничителя: одна дисковая катушка, разделённая на 4 радиальных секции. Материал обмотки – стальная лента сечением $S=hb=100 \cdot 0,5$ мм². При такой конструкции проблема компенсации осевых нагрузок не возникает, поскольку они взаимно уравновешиваются в пределах высоты каждого витка. Для компенсации радиальных нагрузок достаточно собственной прочности стальной ленты. В обеспечении необходимого соотношения электрической прочности и теплопроводности изоляции нет необходимости, так как условия теплообмена в адиабатическом процессе не имеют значения. Как видно из табл. 2, вес материала такой обмотки сокращается по сравнению с В1 более чем в 40 раз. Мощность, потребляемая в номинальном режиме – ничтожна (1,6 кВт – это мощность, выделяющаяся на замкнутых контактах четырёх выключателей).

Переходный процесс в токоограничителе В5 представлен на рис. 8 (расчёт корректен при использовании немагнитных сортов стали). Как видим, максимум J в режиме ограничения тока ниже значения, ограниченного техническим заданием в 2,5 раза. Кроме того, за счёт повышенного активного сопротивления обмотки значительно подавлен средний ток ($J_s < 0,15$ кА при любом времени начала КЗ). При наихудшем, с точки зрения выделяемой мощности, варианте переходного процесса (в случае начала КЗ при $t=0$) коэффициент увеличения мощности равен $k_p=1,67$. Это соответствует нагреву обмотки за один аварийный режим (по (6) при $\rho=2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, $\tau=120$ мс) на 17°C. Токоограничитель должен выдерживать три следующих подряд аварийных отключения. Даже если пренебречь охлаждением обмотки в промежутке между включениями, её нагрев в течение трёх режимов не превысит 51°C.



a



б

Рис. 7. Изменение напряжения: **a** – на выключателях секций №2 и №4 в переходном процессе; **б** – на выключателе секции №3 в переходном процессе, В4. $U^*=U/U_n$, $t^*=t/T$, $U_n=127$ кВ, $T=20$ мс. Параметр кривых – время начала режима КЗ. Точки – моменты начала режимов

Электроизоляция низшего класса нагревостойкости (класса А) допускает длительное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды 65°C . Допустимый кратковременный нагрев – выше. Следовательно, даже при использовании такой изоляции, конструкция имеет запас, как минимум, на 2 сверхнормативных включения.

В номинальном режиме падение напряжения на токоограничителе практически отсутствует, поскольку эквивалентная индуктивность обмотки $L_3=0$. При сочетании параметров данного технического задания этот фактор играет не положительную, а отрицательную роль. Дело в том, что в режиме нерегулируемого КЗ, при $L_3=0$ производная от тока по времени ограничивается только сопротивлением защищаемого участка сети. Если последнее близко к нулю, то ни при каком быстродействии системы защиты невозможно ограничить ударный ток. В рассматриваемом случае индуктивного сопротивления генератора ($L_g=2$ мГн) оказывается недостаточно. Для выхода из этой ситуации можно использовать один из трёх вариантов, перечисленных в примечаниях к табл. 2. Первый вариант – уточнение фактического значения остаточного сопротивления сети. Будет достаточно, если уточнённое значение окажется более 3,5 мГн. Второй вариант – повышение быстродействия системы на 25% – также представляется реалистичным. Наконец, в наихудшем случае, если оба предыдущих варианта окажутся неприемлемыми, необходимо использовать дополнительную обмотку индуктивностью 1,6 мГн. Вес такой обмотки невелик, конструкция достаточно проста. Поэтому, соответствующее увеличение стоимости системы несравнимо со стоимостью токоограничителя, использующего неадиабатическую обмотку.

Выводы

1. Предложен вид индуктивного токоограничителя, использующий соединение обмоток по схеме автотрансформатора. Рассчитаны варианты конструкций токоограничителей автотрансформаторного типа на рабочее напряжение 132 кВ при номинальном токе 2 кА. Для каждого из вариантов исследованы переходные процессы и подобраны оптимальные характеристики выключателей. Все варианты удовлетворяют техническому заданию.

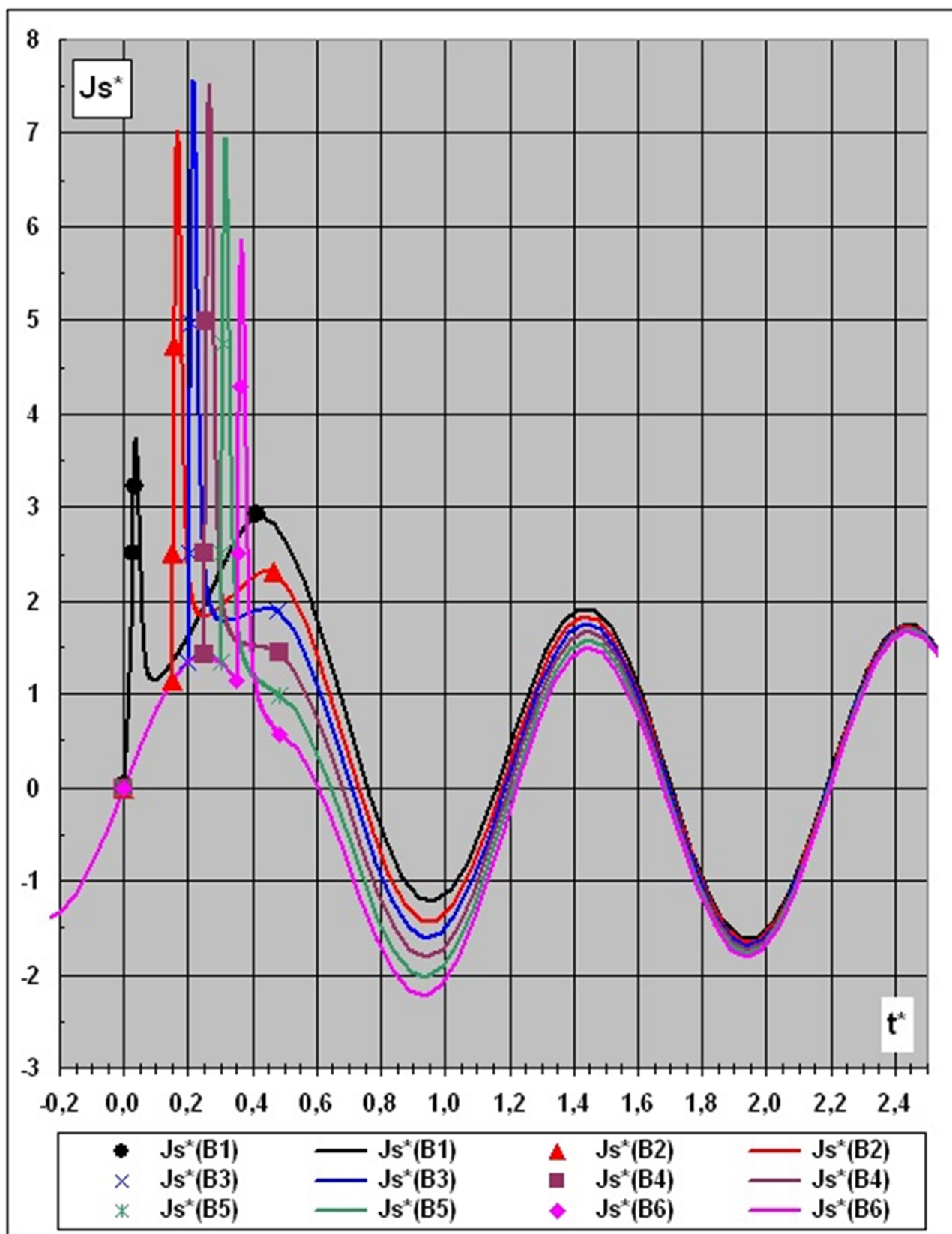


Рис. 8. Изменение тока сети в переходном процессе. Адиабатическая обмотка, В5 . $J^*=J/J_n$, $t^*=t/T$, $J_n=2$ кА, $T=20$ мс. Параметр кривых – время начала режима КЗ. Точки – моменты начала режимов

2. Проведено сравнение токоограничителей автотрансформаторного и трансформаторного типа. Показано, что при использовании одного выключателя, переход к автотрансформаторной схеме, позволяет сократить вес обмотки и потребляемую ей мощность приблизительно в 1,5 раза. Одновременно появляется возможность улучшения технологии изготовления токоограничителя – использование дисковых катушек вместо послойной обмотки.

3. Показано, что дальнейшее улучшение характеристик токоограничителя возможно при использовании нескольких выключателей, размыкаемых по сигналу одной управляющей системы. В рассчитанных вариантах конструкций использование двух и трёх выключателей позволило уменьшить вес обмотки (по сравнению с обмоткой токоограничителя трансформаторного типа) соответственно в 1,96 и 3 раза, а потребляемую мощность – в 2,46 и 3,55 раза. (Естественно, что в случае повышения максимального напряжения размыкания выключателей тот же эффект может быть получен при уменьшении их количества).

4. Ситуация меняется радикально, если снабдить выключателями все секции обмотки токоограничителя (при принятом значении максимального напряжения размыкания для этого необходимы 4 выключателя). В этом случае, вес обмотки сокращается более чем в 40 раз, потребляемая в номинальном режиме мощность практически равна нулю, существенно упрощается конструкция обмотки, улучшается качество защиты сети.

Литература

1. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г.В. Буткевич. – М.: Энергия, 1973. – 264 с.
2. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Б. Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
3. ABB, Is-limiter – Ограничители тока. [Электронный ресурс] база данных и программное обеспечение. – Режим доступа: <http://www.abb.com/product/ru/9AAC720018.aspx?country=RU>, свободный.
4. Short circuit current Limiter for Electric Network Based on the Magnetic coupled Reactor and Fast operating switch / В. Е. Фортов, А. В. Шурупов, М. О. Радченко, С. В. Уколов, С. И. Копылов, Ю. Г. Шакарян, Н. Л. Новиков, В. С. Чуприков, А. В. Малышев, В. М. Батенин, А. В. Козлов, А. С. Веселовский // 43 сессия международного совета по большим электроэнергетическим систем. CIGRE, 23 – 27.08.2010, Paris, France.
5. Лобынцев В. В. Сверхпроводниковые ограничители токов короткого замыкания для систем тягового электроснабжения / Автореферат // В. В. Лобынцев. – М.: МИИТ, 2009. – 24 с.
6. Кривецкий И. В. Разработка рациональных способов секционирования сверхпроводящих токоограничивающих устройств / Автореферат // И. В. Кривецкий. – М.: МАИ (НИУ), 2014. – 24 с.
7. Альтов В. А., Иванов С. С., Желтов В. В., Копылов С. И., Попова М. В. Токоограничивающее устройство трансформаторного типа // ЭЛЕКТРО. – 2010. – № 5. – С. 46 – 55.

Поступила в редакцию 5.12.2014

Сергей Игоревич Копылов, д-р техн. наук, проф., зав. лаб. ОАО «НТЦ ФСК ЕС»,
т. (495) 362-55-64, e-mail: KopylovS56@yandex.ru.

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, зам. генерального директора,
т. (495) 365-26-69, e-mail: vniiem@orc.ru.

Хрисантос Хараламбус, аспирант НИУ «МЭИ»,
т. (495) 362-71-89, e-mail: chrysanthoscg@gmail.com.

Владимир Валентинович Желтов, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник ОИВТ РАН,
т. (495) 362-55-64, e-mail: zheltovvv@yandex.ru

Виктор Евгеньевич Сытников, д-р техн. наук, зам. директора «НТЦФСК ЕС»,
т. (495) 923-66-34, e-mail: vsytников@gmail.com.