

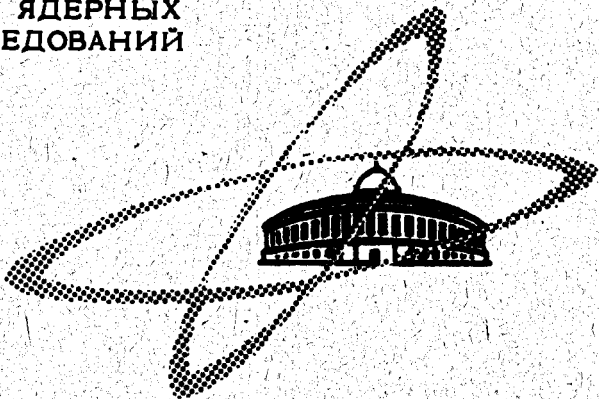
С 345 е 5

К-937

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

131/1-81



9 - 5376

И.А. Курсков

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ЗАЩИТА ОТ ЗАМКНИЙ НА ЗЕМЛЮ
МОЩНОГО УПРАВЛЯЕМОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

1970

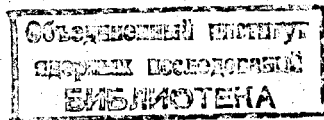
З.ч. 50

9 - 5376

И.А. Курсков

**ЗАЩИТА ОТ ЗАМКНИЙ НА ЗЕМЛЮ
МОЩНОГО УПРАВЛЯЕМОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Направлено в журнал
"Электротехника"



Описание схемы (рис. 1)

Синхронный генератор СГ питает управляемый преобразователь, нагрузкой которого служит электромагнит ЭМ. Параллельно электромагниту включена цепочка из последовательно соединенных сопротивления $R_{ш}$ и емкостей $C_{ш}$. Средняя точка сопротивления $R_{ш}$ через последовательно соединенные емкость C_0' и выходную обмотку $w_{к_2}$ делителя частоты (ДЧ) 50 гц пополам подключена к земле.

В качестве реагирующего реле используется полупроводниковое избирательное частотное реле РЧ, подключенное к делителю напряжения ДН емкости C_0' . Реле РЧ срабатывает при повышении напряжения частоты 25 гц, возникающего на емкости C_0' при замыканиях на землю в защищаемой зоне. Несрабатывание реле РЧ при нормальном и ненормальном режимах работы преобразователя обеспечивается нечувствительностью частотного реле к частотам больше 25 гц и свойством преобразователя, позволяющим ему вырабатывать гармоники, кратные частоте 50 гц /3/.

Анализ работы схемы защиты

Напряжение частоты 25 гц $U_{C_0'}$ на емкости C_0' , которое питает реагирующее реле, определяется формулой:

$$U_{C_0'} = \frac{U_D}{R + Z_{cx} - jX_{C_0'}} (-jX_{C_0'})$$

Здесь U_D - напряжение 25 гц выходной обмотки w_{k_2} делителя частоты, $X_{C_0'}$ - сопротивление емкости C_0' на частоте 25 гц, Z_{cx} эквивалентное сопротивление схемы между точкой X и местом замыкания на землю, $R_{изол.}$ - сопротивление изоляции в месте замыкания на землю.

Величины $X_{C_0'}$, Z_{cx} , $R_{изол.}$ будем считать заданными. Тогда чувствительность защиты будет определяться напряжением U_D делителя. Напряжение U_D зависит как от нагрузки выходной обмотки, так и от токов преобразователя, протекающих по этой обмотке делителя частоты. Нами был выполнен анализ гармонических составляющих токов, протекающих через емкость C_0' . Расчет проводился для упомянутой схемы, нагруженной на активное сопротивление при следующих допущениях:

1. Рассчитывался преобразователь с малым током замыкания на землю. Принималось, что минимальное значение выпрямленного тока за период пульсаций превосходит амплитуду тока замыкания на землю, текущего через вентиль.

2. Емкости фаз принимались равными между собой: $C_{фА} = C_{фВ} = C_{фС} = C_{ф}$; емкости полюсов - одинаковыми: $C_+ = C_- = C_K$. Принималось $C_0' \gg C_K$, $C_{ш} \gg C_0'$, и $C_0' \gg C_{ф}$; $C_{ш}$ и C_K из расчетной схемы исключались. Пренебрегалось падением напряжения в горящих вентилях, угол коммутации γ полагался равным нулю. Пренебрегалось всеми сопротивлениями, кроме сосредоточенного активного $R_{ш}$ и емкостных $X_{ф}$, $X_{C_0'}$.

3. Гармонические составляющие при обратном зажигании рассчитывались для случая $\frac{X_K}{R_K} = 0$, т.е. $\gamma = 0$ /4/. Результаты рас-

чета и соответствующие схемы приведены в таблице. Формулы проверены на низковольтном полупроводниковом преобразователе, нагруженном на активное сопротивление. Как можно видеть из таблицы, в токе I_{C_0} при замыканиях переменного тока нет постоянной составляющей, есть гармоники 1,3,9,15 и т.д. При замыканиях в зоне защиты нет первой гармоники, есть постоянная составляющая и гармоники 6,12,18 и т.д.

В режимах обратного зажигания, пропусков в поджигании вентиля есть постоянная составляющая, 1,2,3,4 и т.д. гармоники. Чтобы обеспечить чувствительность и избирательность защиты, необходимо знать зависимость напряжения U_D выходной обмотки делителя частоты w_{k_2} при протекании по ней токов указанных гармоник. Условия деления частоты получены в [5] при аппроксимации кривой намагничивания сердечников многочленом $V = aN - bN^3$:

1) если в каждом сердечнике ампервитки переменного тока I_2 частоты 50 гц обмотки подмагничивания w_{k_2} одинаковы, а также одинаковы ампервитки постоянного тока I_0 обмотки подмагничивания w_0 , то индукции частоты 25 гц в каждом сердечнике будут равными;

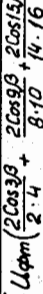
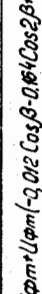
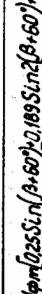

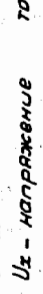
2) индукция частоты 25 гц четным образом зависит от величины токов I_2 и I_0 ;

3) граничные значения токов I_2 и I_0 , при которых явление деления частоты будет возможным, определяются неравенствами

$$3I_0 I_2 \text{ макс. } k_{\omega} b' > R_k, \quad (1)$$

$$a' - M - \frac{3}{2} b' I_2 \text{ макс. } \pm 3I_0 I_2 \text{ макс. } b' \sqrt{\left(1 - \frac{R_k}{3I_0 I_2 \text{ макс. } k_{\omega} b'}\right)^2} - 3b' I_0 > 0, \quad (2)$$

Таблица

№ п/п	Режим работы преобразователя	Расчетная схема	Напряжение эквивалентного генератора	Расчетные соотношения лене $\frac{R_{\Sigma}}{4}$
1.	Нормальный		$U_{\Sigma 1} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{\text{фм}} \left(\frac{2 \cos 3\beta}{2 \cdot 4} + \frac{2 \cos 9\beta}{8 \cdot 10} + \frac{2 \cos 15\beta}{14 \cdot 16} + \dots \right) \beta = \omega t$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j \left(X_{C0'} + \frac{X_{\Sigma}}{3} \right)$
2.	Обратное засижание		$U_{\Sigma 2} = 0.113 U_{\text{фм}} + U_{\text{фм}} (-0.012 \cos \beta - 0.044 \cos 2\beta - 0.07 \cos 3\beta - 0.022 \cos 4\beta - \dots)$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j \left(X_{C0'} + \frac{X_{\Sigma}}{3} \right)$
3.	Пропуск впадки ваний вентиль		$U_{\Sigma 3} = 0.135 \left(U_{\text{фм}} + U_{\text{фм}} \cos 5\beta + \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{\text{фм}} \cos 6\beta + \dots \right) \left(\beta = \omega t \right) \cdot 0.189 S_1 \sin 2(\beta + 60^\circ) + 0.103 \cos 3\beta + 0.036 \sin 4(\beta + 60^\circ) + \dots$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j \left(X_{C0'} + \frac{X_{\Sigma}}{3} \right)$
4.	Замыкание на стороне переменного тока		$U_{\Sigma 4} = \delta U_{\text{фм}} \cos \beta + \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{\text{фм}} \cos 2\beta + \dots$	$\frac{R_{\Sigma}}{4} - j X_{C0'}$
5.	Замыкание на стороне постоянного тока		$U_{\Sigma 5} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_{\text{фм}} \left(1 - \frac{2 \cos 5\beta}{5 \cdot 7} - \frac{2 \cos 12\beta}{11 \cdot 13} - \frac{2 \cos 19\beta}{17 \cdot 19} - \dots \right) - (0.5 - \delta')$	$- \left(R_{\Sigma} - \frac{R_{\Sigma}}{2} \right) - j X_{C0'}$

где $k = 2S w_{k1}$, S - площадь поперечного сечения каждого сердечника, w_{k1} - число витков каждого сердечника контурной обмотки,
 $\omega = \frac{2\pi f}{2} = 157$, $a' = \frac{a}{\ell}$, $b' = \frac{b}{l^3}$, ℓ - длина средней магнитной линии
каждого магнитопровода, R_k - активное сопротивление контура, $f =$
 $= 25$ гц, $M = \frac{1}{k \omega^2 C_k}$.

Рассмотрим изменение условий деления частоты при протекании по выходной обмотке w_{k2} тока частоты 50 гц. Поскольку обмотки w_{k2} в магнитном отношении к обмоткам w_2 включены согласно в одном сердечнике и встречно в другом сердечнике, то один из сердечников будет подмагничиваться, другой размагничиваться (условно принимаем фазу подаваемого тока по отношению к току I_2 в обмотке подмагничивания w_2 равной 0 или 180°). При заданных значениях R_k и I_0 неравенство (1) может нарушиться, так как размагничивание сердечника аналогично по своим результатам уменьшению тока $I_{2 \text{ макс.}}$. Намагничивание сердечника аналогично увеличению $I_{2 \text{ макс.}}$, в результате чего неравенство (2) может нарушиться. Таким образом, при подаче в выходную обмотку w_{k2} тока частоты 50 гц в обоих сердечниках одновременно могут нарушаться условия деления частоты, что приведет к понижению напряжения частоты 25 гц.

Аналогично рассуждая, можно показать, что при включении постоянного тока напряжение частоты 25 гц также может уменьшаться. Фаза ампервитков $I w_{k2}$ может отличаться от фазы ампервитков $I_2 w_2$ тока I_2 . Из неравенств (1) и (2), а также из того, что индукция частоты 25 гц каждого сердечника четным образом зависит от токов $I_{2 \text{ макс.}}$ и I_0 , следует, что в каждом сердечнике делителя происходит процесс деления частоты в случае, если абсолютное значение геометрической суммы ампервитков переменного тока $|\sum \overline{aw}|$ лежит в пределах:

$$a w_{\text{мин.}} < |\sum a w| < a w_{\text{макс.}}$$

Здесь $a w_{\text{макс.}}$ - граничное значение, при превышении которого деление частоты прекращается; $a w_{\text{мин.}}$ - граничное значение, ниже которого деление частоты прекращается. Неравенства 1 и 2 не дают информации о процессе деления в случае подачи токов высших гармоник.

Для проверки приведенных рассуждений, а также для исследования влияния на напряжение делителя U_d протекания по выходной обмотке токов любых гармоник был изготовлен делитель частоты на сердечниках двух трансформаторов освещения типа ОСО 220/12.

Конструктивные данные каждого сердечника

- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Число витков обмотки подмагничивания переменного тока | $w_2 = 24$. |
| 2. Число витков обмотки подмагничивания постоянного тока | $w_0 = 460$. |
| 3. Число витков обмотки колебательного контура | $w_{k_1} = 480$. |
| 4. Число витков выходной обмотки колебательного контура | $w_{k_2} = 65$. |
| 5. Сечение сердечника | $S = 1880 \text{ мм}^2$ |
| 6. Длина средней магнитной линии | $l = 420 \text{ мм.}$ |

Электрические характеристики

1. При токе $I_2 = 12$ а в обмотке w_2 подмагничивания переменного тока диапазон изменения постоянного тока I_0 , при котором происходит деление частоты, составил

$$0,8 a > I_0 > 0,3 a .$$

Этот диапазон не зависел от изменения нагрузки в пределах $(15 \div 100)$ ом.

2. Критическая нагрузка вторичной обмотки w_{K_2} колебательного контура составила 10 ом при значениях токов $I_0 = (0,4 + 0,7) a$ и $I_2 = 12 a$. В пределах $(10 \div 15)$ ом колебания неустойчивы.

3. При $I_0 = 0,5 a$ диапазон изменения тока I_2 , при котором происходит деление частоты, составляет по току $9,5 a < I_2 < 28 a$, по напряжению $8 в < U_2 < 26 в$. Току $I_2 = 9,5 a$ соответствуют ампервитки $aw_2 \text{ мин.} = 228$, току $I_2 = 28 a$ соответствуют ампервитки $aw_2 \text{ макс.} = 672$.

Для изучения делителя частоты в условиях, когда по вторичной обмотке колебательного контура, кроме тока частоты 25 гц, протекают также токи гармоник и постоянный ток, была собрана схема, изображенная на рис. 2. Схема состоит из двух частей: исследуемой (зажимы 1-2) и измерительной (зажимы 5-6). К зажимам 1-2 подключена цепь, состоящая из последовательно соединенных элементов: амперметра А, выходной обмотки колебательного контура w_{K_2} , нагрузки колебательного контура R_H . На зажимы 1-2 поочередно подавалось напряжение: постоянное (от аккумуляторной батареи), 50 гц (от сети), 200 гц (от электромашинного генератора для питания дрейлей), 500 гц (от электромашинного генератора для питания магнитных усилителей). Указанные напряжения в дальнейшем именуется исследуемыми. Активное сопротивление R_H во всех опытах изменялось ступенями (105 ом, 70 ом, 35 ом, 15 ом) с целью изучения характера изменения напряжения делителя частоты в зависимости от нагрузки.

Измерение напряжения U_d делителя частоты производилось измерительной схемой (зажимы 5-6), для чего зажимы 5-6 подключались к зажимам 3-4 делителя.

Схема измерения состоит из двух выпрямителей, B_1, B_2 , включенных по схеме сравнения с встречным включением выпрямителей. На выпрямитель B_2 напряжение подавалось через разделительный трансформатор с $K_T = 1$, на B_1 - через двойной Т-образный мост, настроенный на нуль при частоте 25 гц. Двойной Т-образный мост при подаче на него исследуемого напряжения по-разному вызывает затухание напряжения различных частот. Перед началом измерения исследуемое напряжение подавалось на зажимы 5-6 схемы измерения. Потенциометрами Π_1 и Π_2 схема уравнивалась. Настроенная таким образом схема измерения при подаче на ее выводы 5-6 напряжения, состоящего из суммы напряжений частотой 25 гц и исследуемой, покажет напряжение, пропорциональное только напряжению частоты 25 гц, так как напряжение на выходе схемы исследуемой частоты, измеряемое вольтметром V , равно нулю. Измерения производили в следующей последовательности:

1. Производили настройку схемы измерения при подаче на зажимы 5-6 исследуемого напряжения.

2. Возбуждали делитель частоты ($I_2 = 12$ а, $I_0 = 0,5$ а).

3. Зажимы 5-6 схемы измерения подключали к зажимам 3-4 делителя. Зажимы 1-2 закорачивали, нагрузку R_H изменяли ступенями и на каждой ступени измеряли напряжение на выходе схемы U'_d .

4. На зажимы 1-2 подавали исследуемое напряжение, нагрузку R_H изменяли указанными ступенями, измеряли напряжение на выходе схемы U_d . Ввиду того, что напряжение постоянного тока на обмотке w_{k1} близко к нулю, напряжение на делителе в этом случае измеряли непосредственно вольтметром на зажимах 3-4 делителя.

На рис. 3 изображены зависимости:

$$U_{d \text{ отн}} = \frac{U_d}{U'_d} = f(I_f, R_H),$$

$$I_f = f(R_H).$$

I_r - ток от исследуемого напряжения, соответствующий сопротивлению нагрузки R_D . Из представленных на рис. 3 характеристик можно видеть:

1. Напряжение частоты 25 гц уменьшается по-разному при включении тока частоты 50 гц и постоянного.

2. Подача токов высших гармоник до 9,5 а на исследуемый делитель влияет незначительно.

3. При $I_r = 2,1$ а, $f = 50$ гц $U_D \approx 0,5 U'_D$,

при $I_r = 5,8$ а, $f = 50$ гц $U_D = 0$.

Произведем расчет результирующих ампервитков сердечников при подаче указанных в п.3 токов. Граничные значения результирующих ампервитков для испытуемого делителя составляют:

$$a_{w \text{ макс}} = 672, \quad a_{w \text{ мин}} = 228.$$

При подаче тока 2,1 а для результирующих ампервитков подмагничиваемого сердечника получаем:

$$|a_{w \text{ рез}}'| = |a_{w_2} + a_{w_{k_2}}| = 12,24 + 2,1 \cdot 65 = 424.$$

Так как $a_{w \text{ рез}}' < a_{w \text{ макс}}$, в сердечнике происходит деление частоты. Для результирующих ампервитков размагничиваемого сердечника имеем:

$$|a_{w \text{ рез}}''| = |a_{w_2} - a_{w_{k_2}}| = |24 \cdot 12 - 2,1 \cdot 65| = 152.$$

Так как $a_{w \text{ рез}}'' < a_{w \text{ мин}}$, в сердечнике процесса деления частоты не происходит.

При подаче тока $I_r = 5,8$ а $a_{w_{k_2}} = 377$. Для результирующих ампервитков подмагничиваемого сердечника запишем:

$$|aw'_{рез}| = |aw_2 + aw_{k_2}| = |288 + 377| = 665.$$

Так как ампервитки $aw'_{рез} = 665$ близки к $aw_{макс} = 672$, сердечник деление частоты прекращает. Для результирующих ампервитков размагничиваемого сердечника

$$|aw''_{рез}| = |aw_2 - aw_{k_2}| = |288 - 377| = 89.$$

Так как $89 < 228$, сердечник деление частоты прекращает. Делитель частоты испытывался в схеме преобразователя. На рис. 4 приведены осциллограммы тока, протекающего по выходной обмотке, и напряжение делителя. Действующее значение тока не превышало 12 а. Как можно видеть, выходное напряжение частотой 25 гц искажается высокочастотными наводками, при этом амплитуда напряжения остается в основном постоянной.

Понижение напряжения U_D при подаче в выходную обмотку w_{k_2} тока частоты 50 гц можно использовать для получения избирательности описываемой защиты. При замыкании на стороне переменного тока, например в точке X рис. 1, через емкость C_0 и выходным обмоткам делителя будет протекать ток I_{C_0} гармоник первой, третьей, девятой, пятнадцатой и т.д. (см. таблицу). Первая гармоника тока зависит от места замыкания на землю $\delta = \frac{U_x}{U_\phi}$, U_x - напряжение между точкой X повреждения обмотки генератора и нулем, U_ϕ - фазное напряжение генератора.

Ток 3,9,15 и т.д. гармоник увеличивается по сравнению с нормальным режимом, т.к. емкость C_ϕ шунтируется местом замыкания на землю.

Чтобы защита выводилась из работы при замыканиях на землю переменного тока преобразователя, необходимо выполнить неравенство

$$I_{C_0, w_{k_2}} > aw_2 + aw_2_{\text{макс}} \quad (4)$$

Оптимальным значением ампервитков aw_2 является

$$aw_2 = \frac{aw_2_{\text{макс}} + aw_2_{\text{мин}}}{2} \quad (5)$$

С учетом (4), (5) можем записать:

$$I_{C_0, w_{k_2}} > \frac{3aw_2_{\text{макс}} + aw_2_{\text{мин}}}{2} \quad (6)$$

или

$$\frac{\delta U_{\phi}}{Z_p} w_{k_2} > \frac{3aw_2_{\text{макс}} + aw_2_{\text{мин}}}{2} \quad (7)$$

Z_p рассчитывается по таблице.

Неравенство (7) теряет силу при замыканиях в области нейтрали генератора ($\delta \approx 0$). В этом случае блокировать защиту можно за счет выпрямления гармоник тока $I_{C_0, 1,3,9,15}$ и т.д., создавая дополнительное подмагничивание выпрямленным постоянным током сердечников делителя или автоматически вывода из работы реагирующее реле.

При замыканиях постоянного тока преобразователя ток, протекающий через емкость C_0 , и по выходной обмотке делителя, будет содержать постоянную составляющую (зарядный ток емкости C_0) и гармоники 6,12, 18 и т.д. В результате на время заряда емкости C_0 напряжение делителя может снизиться. Защита будет работать с выдержкой времени, обусловленной временем заря-

да емкости C_0' . Описываемая защита имеет наибольшую чувствительность при замыканиях в области средней точки электромагнита, так как результирующее сопротивление электромагнита на частоте 25 гц настроено в резонанс с емкостью C_0' . Принятые устройства указанную область не защищают. Согласно ^{12/} выходная обмотка делителя частоты обладает резонансным сопротивлением на частоте 25 гц, а на других частотах сопротивление ее значительно меньше. Так, для испытываемого делителя частоты сопротивление выходной обмотки составило: на частоте 200 гц - 0,56 ом, 500 гц - 0,965 ом. Такое сопротивление не мешает шунтированию токов высших гармоник в защищаемой схеме.

Защита стороны переменного тока преобразователя

Как указывалось ранее, ток через емкость C_0' возрастает значительно при замыканиях переменного тока, так как $C_0' \gg C_{\phi}$, а C_{ϕ} шунтируется местом замыкания на землю. Это обстоятельство использовано для защиты стороны переменного тока преобразователя, для чего к трансформатору тока ТТЗ подключено токовое реле (на рис. 1 в целях упрощения не показано). Многолетний опыт эксплуатации показывает ее работоспособность. Уставка защиты - 18 а, ток гармоник не превышает 12 а. Кроме того, на генераторах установлен контроль изоляции согласно "Правилам устройства электроустановки" ^{16/}.

Л и т е р а т у р а

1. М.А. Гашев, Е.Г. Комар и др. Система питания электромагнита ОИЯИ. Электричество, №1, 1960.

2. Р.А. Вайнштейн. Томский политехнический институт. Авторское свидетельство № 177958. Устройство для защиты от замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью. Бюллетень изобретений № 2, 1966.
3. И.Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи. Часть III, ГЭИ, 1956.
4. А.М. Утевский. Электромагнитные процессы при аварийных режимах выпрямительных агрегатов. Известия АН СССР, ОТН, №2, 1949.
5. Л.А. Бессонов. Автоколебания в электрических цепях со сталью. ГЭИ, 1958.
6. Правила устройства электроустановки. Энергия, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 сентября 1970 года.