

УДК. 621.3+539.213:537.623

Т. П. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, профессор

М. Н. ТОКАРЬ, аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
(г. Харьков, E-mail: [khpavlenko@yandex.ru](mailto:khpavlenko@yandex.ru))

## ИССЛЕДОВАНИЕ АМОΡФНЫХ СПЛАВОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

*В данной работе рассматриваются предварительные исследования и сравнительный анализ магнитопроводов трансформаторов тока из аморфного сплава и электротехнической стали, работающих в зонах малых и максимальных калибруемых кратностей тока в блоках полупроводниковых расцепителей автоматических выключателей.*

*У даній роботі розглядаються попередні дослідження та порівняльний аналіз магнітопроводів трансформаторів струму з аморфного сплаву та електротехнічної сталі, які працюють у зонах малих і максимальних кратностей струму, що калібруються в блоках напівпровідникових розчиплювачів автоматичних вимикачів.*

### Введение

Автоматические выключатели представляют собой электрические аппараты, которые применяются для включения и защиты электрических цепей при токах короткого замыкания, токах перегрузок, снижении напряжения и при других аномальных явлениях. Для реагирования на различные изменения работы электрической цепи в автоматических выключателях используются расцепители, выполняющие определенные функции [1]. Роль защиты от токов короткого замыкания в автоматическом выключателе выполняет электромагнитный расцепитель или полупроводниковый расцепитель, который допускает ступенчатый выбор параметров при их изменении.

Полупроводниковый расцепитель представляет собой блок, состоящий из измерительных элементов, встраиваемых в каждый полюс автоматического выключателя, стабилизатора тока (для выключателей постоянного тока) и исполнительного элемента. Роль источника питания в полупроводниковом расцепителе, а также датчика, реагирующего на поступающие сигналы, выполняет трансформатор тока (ТТ).

В настоящее время сердечники отечественных трансформаторов для различных низковольтных электрических аппаратов, в том числе и для трансформатора тока полупроводникового расцепителя, изготавливают из магнитомягких электротехнических сталей, которые обладают высокой магнитной индукцией насыщения, узкой, по сравнению с другими кристаллическими сталями, петлей гистерезиса, незначительными потерями в зоне перемагничивания материала магнитопровода. Однако форма петли гистерезиса не является прямоугольной, что приводит к повышенным погрешностям, например, трансформатора тока полупроводникового расцепителя, работающего в схеме с импульсным стабилизатором напряжения.

Специфика работы трансформаторов тока в такой схеме заключается в том, что перемагничивание его магнитопровода в зоне малых токов производится по смещенной частной петле гистерезиса. Это обусловлено несимметрией нагрузки ТТ по полупериодам тока, что и приводит к увеличению погрешности устройств, выполняющих защитные функции.

Для повышения защитных функций автоматических выключателей предлагается использование в трансформаторах тока полупроводниковых расцепителей аморфных магнитомягких сплавов на основе железа.

Особенностью аморфных сплавов и их структуры является отсутствие у них дальнего порядка в расположении атомов и строгой периодичности, присущей кристаллическому строению магнитомягких электротехнических сталей. Аморфные магнитомягкие сплавы не имеют междоменных границ. Это обуславливает их высокую твердость, прочность, коррозионную стойкость. Благодаря высоким значениям магнитной проницаемости, прочности и твердости (до 1000 HV), низким значениям коэрцитивной силы ( $H_c$  менее 8 А/м) и другим уникальным свойствам [2, 3], аморфные сплавы находят свое широкое применение в различных электротехнических устройствах. Немногочисленные исследования показали, что такие аморфные сплавы могут использоваться в магнитных системах электрических аппаратов [4].

### Цель работы

Определение возможности применения аморфных сплавов в магнитопроводе трансформатора тока полупроводникового расцепителя, используемого для защиты электрической цепи при возникновении токов короткого замыкания

### Основные положения и результаты исследований

Для исследований изготавливались трансформаторы тока с сердечником магнитопровода из электротехнической стали марки 3421 и аморфного сплава марки 7421. Трансформаторы работали в схеме, имитирующей работу устройства блока полупроводникового расцепителя типа БПР 11, предназначенного для автоматического выключателя серии ВА 50. Исследования параметров образцов проводились также на стендах-имитаторах, генерирующих относительно небольшие токи с частотой сигналов 50 и 400 Гц при номинальном токе 160 А на первичной обмотке ТТ и номинальном токе 1600 А на вторичной обмотке ТТ, с сечением магнитопровода 1 см<sup>2</sup>. Для снижения номинального первичного тока ТТ до 1 А трансформаторы тока выполнялись с многovitковой первичной обмоткой, имеющей количество витков, равное 160.

При исследовании ТТ использовали имитирующее устройство, основными элементами которого являются накопительные конденсаторы и ключевой стабилизатор напряжения. В ходе испытаний исследовалась зависимость минимального значения величины первичного тока, при которой обеспечивается включение стабилизатора и величины тока замыкания вторичной обмотки ТТ, а также зависимость дополнительной погрешности ТТ, обусловленной наличием стабилизатора напряжения (табл. 1–4).

Значения тока включения ( $I_{ip}$ ) импульсного стабилизатора при его частоте тока 50 Гц в зависимости от величины тока нагрузки  $I_{load}$ , как для испытываемого ТТ на основе аморфного сплава, так и для ТТ с магнитопроводом из электротехнической стали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость тока включения  $I_{ip}$  стабилизатора напряжения от тока нагрузки  $I_{load}$

Магнитопровод ТТ	Ток включения, $I_{ip}$ , мА					
	4	5	7	10	15	20
	Ток нагрузки $I_{load}$ , А					
7421	17	20	30	39	51	67
3421	21	25	31	40	50	67

Данные погрешностей  $\delta$  для ТТ с магнитопроводами из аморфного сплава и электротехнической стали при различных значениях токов нагрузки  $I_{load}$  приведены в табл. 2. Испытания проводились при напряжении  $U = 40$  В.

Таблица 2

Погрешности ТТ при различных токах нагрузки  $I_{load}$  и токах включения  $I_{ip}$  стабилизатора напряжения

Магнитопровод ТТ из аморфного сплава							
$I_{load}, A$	25	30	40	50	60	80	$I_{ip} = 5 \text{ мА}$
$\delta, \%$	1,2	<1	<1	<1	<1	<1	
$I_{load}, A$	40	50	60	70	80	100	$I_{ip} = 10 \text{ мА}$
$\delta, \%$	1,4	1	<1	<1	<1	<1	
$I_{load}, A$	50	60	70	80	90	100	$I_{ip} = 15 \text{ мА}$
$\delta, \%$	1,6	1,3	1	<1	<1	<1	
$I_{load}, A$	25	30	40	50	60	80	$I_{ip} = 60 \text{ мА}$
$\delta, \%$	3,0	3,0	2,7	2,5	2,0	1,8	
Магнитопровод ТТ из электротехнической стали							
$I_{load}, A$	40	50	60	70	80	100	$I_{ip} = 10 \text{ мА}$
$\delta, \%$	4,5	4,0	3,5	3,2	3,0	2,0	
$I_{load}, A$	50	60	70	80	90	100	$I_{ip} = 15 \text{ мА}$
$\delta, \%$	9,0	7,0	6,5	6,0	5,0	3,0	

Из приведенных данных таблицы видно, что значение токов включения  $I_{ip}$  ключевого стабилизатора напряжения у магнитопроводов при больших токах нагрузки близки, поскольку ток включения в основном определяется величиной тока нагрузки и слабо зависит от характеристик магнитопровода.

При малых токах нагрузки ток включения у ТТ на основе аморфного сплава меньше, что объясняется влиянием тока намагничивания ТТ, который у ТТ из аморфного сплава меньше, по сравнению с магнитопроводом ТТ из электротехнической стали.

Таким образом, ТТ на основе аморфного сплава дает существенный выигрыш в уменьшении погрешностей измерения первичного тока, особенно в области больших токов нагрузки, снимаемых с накопительных конденсаторов.

Зависимость амплитуды напряжения от отношения токов  $I/I_{load}$  (где  $I$  – текущее значение тока) приводится в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость напряжения  $U$  от отношения токов  $I/I_{load}$  (сплав 7421).

$I/I_{load}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, B$	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30

В диапазоне кратностей токов 1–10, как следует из таблицы, зависимость будет линейна. Такой диапазон токов определяется из максимальной калибруемой кратности токов короткого замыкания для автоматических выключателей, который равен  $10I_{load}$ . Осциллограмма напряжений или кратности тока  $10I_{load}$  приведена на рис. 1, из которой можно определить угол насыщения  $\alpha$  магнитопровода ТТ ( $\alpha = 0,55\pi$ ).

Индукция насыщения  $B_S$  магнитопровода определялась из известного соотношения:

$$N_2 S B_S f_1 = R I_m (1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

где  $N_2$  – количество витков вторичной обмотки ( $N_2 = 1600$ );  
 $f_1$  – частота в сети;  
 $S$  – сечение магнитопровода;  
 $R$  – суммарное активное сопротивление вторичной цепи ТТ ( $R = 100 \text{ Ом}$ );  
 $I_m$  – амплитудное значение вторичного тока ТТ при  $10 I_{load}$  ( $I_m = 1,4 \text{ А}$ ).

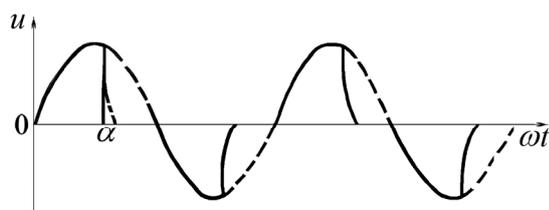


Рис. 1. Осциллограмма напряжений при кратности тока  $I/I_{load} = 10$

Определив значение  $B_S = 1,5 \text{ Тл}$ , можно подсчитать амплитудное значение вторичного тока ТТ при больших величинах первичного тока, в том числе и при предельных значениях тока короткого замыкания по формуле:

$$I_m = \sqrt{1 - \left[ 1 - \frac{N_2 S B_S f_1}{R I_m'} \right]^2}, \quad (2)$$

где  $I_m'$  – приведенное ко вторичной обмотке значение первичного предельного тока короткого замыкания.

Значения тока включения ( $I_{ip}$ ) стабилизатора при его частоте тока 400 Гц в зависимости от величины тока нагрузки  $I_{load}$  для трансформаторов на основе аморфного сплава (с не термообработанным и термообработанным сердечником), а также для ТТ с магнитопроводом из электротехнической стали, соответственно, приведены в табл. 4. Испытания проводились при номинальном первичном токе 160 А.

Таблица 4

Зависимость  $I_{ip}$  от величины тока  $I_{load}$  при их частоте 400 Гц

Ток, $I_{load}, \text{А}$	Ток включения $I_{ip}, \text{мА}$						
	5	7	10	12	15	17	20
Магнитопровод из сплава 7421 без термообработки							
$I_{load 1}$	24	30	42	50	56	70	80
$I_{load 2}$	70	78	98	110	120	13	140
Магнитопровод из сплава 7421 с термомагнитной обработкой							
$I_{load 1}$	38	44	50	53	56	68	91
$I_{load 2}$	38	44	50	53	57	69	92
Магнитопровод из стали 3421							
$I_{load 1}$	30	38	46	53	60	68	75
$I_{load 2}$	52	60	70	76	81	125	144

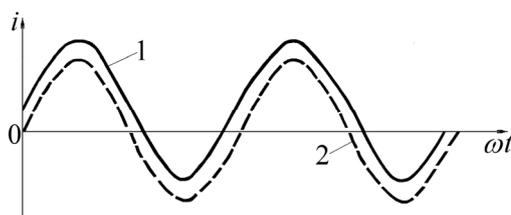


Рис. 2. Осциллограмма тока при частоте 400 Гц

Результаты экспериментов показали, что включение стабилизатора от источника тока частотой 400 Гц при нагрузке  $I_{load 1}$  происходит в один из полупериодов токов, а при нагрузке  $I_{load 2}$  стабилизатор включается в работу в оба полупериода тока. Осциллограмма сигнала в этом диапазоне токов представлена на рис. 2 (кривая 1). Здесь же на рис. 2 (кривая 2) представлена осциллограмма тока, при минимальной токовой погрешности ТТ. Как видно из этой осциллограммы, ТТ обладают в этом диапазоне токов существенной токовой погрешностью, что неприемлемо для устройств защиты.

Указанный эффект объясняется тем, что при частоте 400 Гц сердечник магнитопровода получает малое приращение индукции, вследствие чего он перемагничивается вблизи зоны насыщения магнитопровода.

Если в этой зоне насыщения характеристика перемагничивания существенно отличается от прямоугольной, то в одном полупериоде первичного тока ток намагничивания складывается с приведенным ко вторичной обмотке ТТ первичным током, а во втором полупериоде вычитается из него, что создает значительную асимметрию вторичного тока по полупериодам, как показано на рис. 2. Эта асимметрия также существенно зависит от магнитных свойств материала магнитопровода.

Для обеспечения линейности характеристики ТТ во всем калибруемом диапазоне токов короткого замыкания и уменьшения погрешности при частоте 400 Гц рекомендуется минимальная величина сечения магнитопровода, равная 0,15–0,25 см<sup>2</sup>. Это позволяет повысить точность срабатывания полупроводникового расцепителя.

### Выводы

В результате исследования трансформаторов тока из магнитопроводов электротехнической стали и аморфного сплава определены зависимости минимальных значений величин первичного тока, при которых обеспечивалось включение стабилизатора и величин тока замыкания вторичных обмоток ТТ, работающих при частоте тока 50 и 400 Гц, а также зависимости погрешностей ТТ, обусловленных наличием стабилизатора напряжения. Результаты исследования показали целесообразность применения аморфного сплава марки 7421 в трансформаторе тока полупроводникового расцепителя вместо применяемой, в настоящее время, электротехнической стали марки 3421.

### Список литературы

1. Беляев В. Л. Особенности работы и конструкций многоамперных автоматических выключателей: Учеб. пособ. – СПб.:СЗТУ, 2005. – 254 с.
2. Мишин Д. Д. Магнитные материалы. – М.: Высш.шк., 1991. – 384 с.; ил.
3. Аморфные металлические сплавы. / Под ред. Люборского Ф. Е.: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 584 с.
4. Павленко Т. П. Применение аморфных сплавов в устройствах защитного отключения. // Сб. научн. тр. Вып. 26. – Алчевск: Дон ГТУ, 2008. – с. 343–347.

### INVESTIGATION OF AMORPHOUS ALLOYS IN CURRENT TRANSFORMERS OF SOLID-STATE TRIPPING DEVICES FOR CIRCUIT BREAKERS

T. P. PAVLENKO, Doctor of Engineering, Professor  
M. N. TOKAR, Post graduate student

*The article is concerned with the preliminary studies and comparative analysis of the current transformer cores of amorphous alloy and electrical steel operating within the ranges of low and maximum calibrated current ratios in the solid-state tripping device units for circuit breakers.*

Поступила в редакцию 18.02 2013 г.