

УДК 658.26

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С МАГНИТОПРОВОДОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ

Сорока А.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Радкевич В.Н.

Конструкция силовых трансформаторов в течение многих десятилетий является практически неизменной: магнитопровод, обмотки, изоляция, бак (для масляных трансформаторов). Изменения, произошедшие в последние годы в силовых распределительных трансформаторах носят эволюционный характер. В частности, при изготовлении магнитопроводов вместо горячекатаной электротехнической стали начали применять разные марки холоднокатанной. Способ шихтовки магнитопровода изменился с «прямого стыка» на «косой стык». Наряду с толстостенными баками с расширительным бачком или без него применяются герметичные тонкостенные гофробаки. Обмотки трансформаторов выполняются как из алюминия, так и из меди. Для определения технического состояния мощных силовых трансформаторов на трансформаторных подстанциях начали устанавливать устройства мониторинга, такие, как, например, хроматографы, всевозможные датчики давления и температуры и т.д.

Основными способами повышения энергоэффективности силового трансформатора являются следующие:

- обеспечение оптимальной нагрузки трансформатора;
- увеличение коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi$ ;
- уменьшение потерь мощности холостого хода (ХХ)  $\Delta P_x$  (потерь в магнитопроводе трансформатора);
- уменьшение потерь мощности короткого замыкания (КЗ)  $\Delta P_k$  (потерь в обмотках трансформатора);
- снижение тока ХХ  $I_x$  трансформатора.

Первые два способа реализуются в процессе эксплуатации трансформаторных подстанций, остальные – при изготовлении трансформаторов. Значения  $\Delta P_x$ ,  $\Delta P_k$  и  $I_x$ , являющиеся основными показателями экономичности трансформатора, зависят от его конструктивного исполнения.

Снижение  $\Delta P_x$  связано с совершенствованием конструкции и материала магнитопровода. В этом направлении наиболее перспективным является применение магнитопроводов из аморфных (нанокристаллических) сплавов (АС). При их использовании обеспечивается более чем пятикратное снижение потерь ХХ трансформаторов по сравнению с магнитопроводами из холоднокатаной электротехнической стали.

Уменьшение величины  $\Delta P_k$  достигается внедрением инновационных решений в конструкции обмоток силового трансформатора. В этой области наибольший интерес представляют два направления. Первое связано с использованием высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов. Отметим следующие основные преимущества трансформаторов с обмотками из ВТСП-материалов [1]:

- 1) снижение  $\Delta P_k$  почти в два раза;
- 2) уменьшение массы и габаритов трансформатора до 40%, что облегчает его транспортировку;
- 3) ограничение токов КЗ;
- 4) значительное уменьшение реактивного сопротивления;
- 5) большая перегрузочная способность;
- 6) уменьшение уровня шума;
- 7) пожаробезопасность и экологичность.

Второе направление уменьшения мощности потерь КЗ - это внедрение нового типа трансформатора *DryFormer* (фирма *ABB Transformatoren*), обмотки которого выполняются

из специального кабеля. Этот кабель имеет многопроволочную медную или алюминиевую токопроводящую жилу, поверх которой наложен тонкий слой полупроводящего материала, что позволяет устранить неравномерность электрического поля, вызванного многопроволочностью жилы. Фазная изоляция такой жилы изготавливается из полиэтилена. Ее толщина выбирается из соображений электрической прочности (практически достижим уровень напряжения 220 кВ). Поверх изоляции наложен экран, выполненный также из полупроводящего материала, который заземляется, что обеспечивает рациональное распределение электрического поля. Отсутствие масла, снижение более чем вдвое доли горючих материалов по сравнению с обычным трансформатором устраняют риск пожара, взрыва, загрязнения воды и почвы в случае повреждения трансформатора. Это позволяет применять такие аппараты в зонах с большой плотностью населения, в подземных установках, в экологически охраняемых регионах.

В настоящее время силовые распределительные трансформаторы с сердечником из АС серийно выпускаются и используются в США, Канаде, Японии, Индии, Словакии и других странах. Всего в мире уже изготовлено 60-70 тыс. трансформаторов мощностью 25-100 кВ·А. Примерно 1000 трансформаторов прошли успешные многолетние испытания в различных энергосистемах. Наибольших успехов добились США и Япония. Японская фирма «Hitachi» в сотрудничестве с американской «AlliedSignal» выпустила группу силовых трансформаторов с магнитопроводом из аморфного сплава мощностью от 500 до 1000 кВ·А. Испытания показали, что потери электроэнергии в магнитопроводах таких трансформаторов на 80% меньше по сравнению с трансформаторами со стальными сердечниками.

Компания «AlliedSignal» производит аморфный сплав для трансформаторов на заводе в г. Конуэй (США). Его цена не превышает стоимости кремнистой стали - 2-2,5 USD/кг. Тем не менее, руководство фирмы утверждает, что производство таких сердечников обходится дороже из-за большего потребления металла и несовершенства технологического процесса. Еще одной проблемой является усложнение процесса изготовления сердечника по мере увеличения его размеров. Японской фирме с этой целью пришлось освоить специальную технологию. Фирма «AlliedSignal» имеет два завода по выпуску сердечников из аморфных сплавов: один в Индии (работает с 1993 г.) и другой в КНР (в г. Шанхай, работает с 1996 г.). Годовая мощность последнего составляет 450 т. В перспективе предполагается её увеличение в три раза. Фирмы-партнёры рассчитывают на сбыт силовых трансформаторов с сердечником из аморфных металлов на рынках стран с высокой стоимостью электроэнергии.

Особенности АС потребовали изменения конструкции магнитопровода. В связи с малой толщиной аморфный материал наиболее пригоден для витой конструкции магнитопровода, которая может применяться у трансформаторов с номинальной мощностью до 1000 кВ·А.

Ленточные витые магнитопроводы, изготавливаемые из электротехнической стали или пермаллоевых сплавов, давно и довольно широко используются в трансформаторах, работающих в диапазоне частот до 100 кГц. Однако эти материалы не удовлетворяют требованиям комплексного обеспечения высокого КПД, экономичности, технологичности и других показателей энергоэффективных трансформаторов. Появление аморфных нанокристаллических сплавов, обладающих уникальными физическими и магнитными свойствами, в сочетании с усовершенствованием технологии получения таких сплавов, позволило за последние три десятилетия снизить их стоимость с 300 до 2,8-3,0 USD/кг. Это привело к тому, что стало экономически выгодно серийно изготавливать магнитопроводы из аморфных сплавов и, соответственно, энергоэффективные трансформаторы с такими магнитопроводами.

Исходным материалом для производства магнитопроводов энергоэффективных трансформаторов служит лента, получаемая методом сверхбыстрого (со скоростью порядка  $10^6$  К/с) охлаждения струи готового аморфного нанокристаллического расплава, который выливается на поверхность барабана, вращающегося с большой скоростью  $V_6$ , как это упрощенно показано на рис.1 [1].

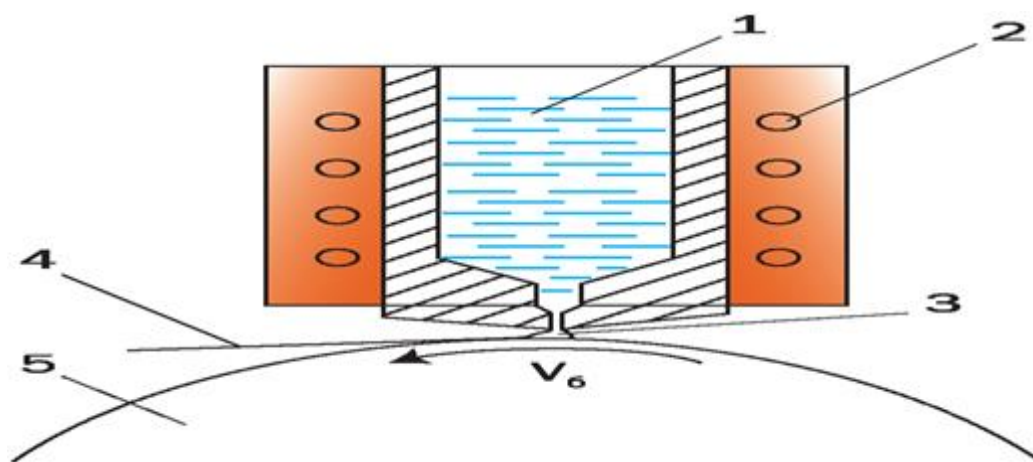


Рисунок 1. Получение аморфной ленты:

1- аморфный расплав; 2- плавильная камера; 3- лужа расплава; 4- лента; 5- охлаждающая поверхность

Упрощенная схема установки, используемая компанией *MetglasInk*. для изготовления ленты из аморфного расплава, показана на рис.2 [1].

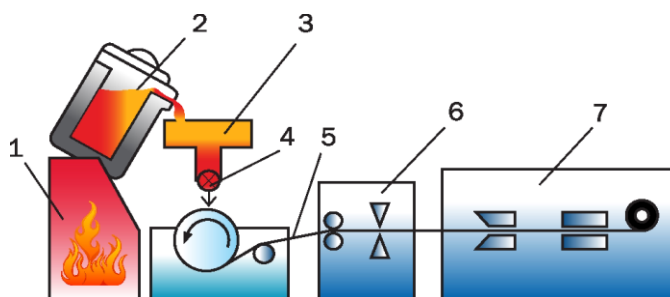


Рисунок 2. Схема установки для изготовления аморфной ленты:

1- печь; 2- аморфный расплав; 3- резервуар; 4- дозатор; 5- лента из аморфного расплава; 6- устройство непрерывного технологического контроля; 7- устройство, осуществляющее непрерывное охлаждение ленты

Изготовленную из аморфного расплава ленту отжигают в среде инертного газа при воздействии магнитного поля напряженностью 800 А/м, что позволяет получить значительно меньшую площадь петли гистерезиса, чем у трансформаторной стали, и, следовательно, достичь намного меньших потерь  $XX$  в аморфном магнитопроводе трансформатора. Так как аморфная лента имеет малую толщину (0,024 мм), ее сворачивают в пять слоев в рулон, тем самым увеличивая ее толщину в 5 раз. Затем изготавливают из нее витые конструкции магнитопроводов распределительных трансформаторов. В трансформаторах традиционных конструкций магнитопровод из трансформаторной стали является несущим элементом, поддерживающим всю активную часть. Магнитопровод, изготовленный из аморфной ленты, из-за низкой механической прочности не допускает воздействия на него чрезмерной весовой нагрузки. Поэтому он крепится к обмоткам, расположенным на несущей базе, и требует дополнительных мероприятий по увеличению жесткости конструкции.

В странах СНГ первый масляный трехфазный трансформатор типа ТМГ24-400/10 с витым магнитопроводом из аморфного сплава был изготовлен на Минском электротехническом заводе. Благодаря инновационным технологиям, используемым при изготовлении трансформатора, удалось добиться существенного улучшения его технических показателей, характеризующих энергоэффективность.

В частности, первый трансформатор имел следующие характеристики:  $S_{ном} = 400 \text{кВ}\cdot\text{А}$ ;  $\Delta P_x = 0,29 \text{ кВт}$ ;  $\Delta P_k = 5,8 \text{ кВт}$ ;  $I_x = 0,3\%$ ; напряжение КЗ  $U_k = 4,5\%$ .

Если сравнивать ТМГ24-400/10 с трансформаторами такой же мощности других типов, то можно заметить, что он имеет значительное превосходство по показателям ХХ. Например, его значение  $\Delta P_x$  примерно в три раза меньше, чем у трансформатора ТМГ11-400/10.

В странах Евросоюза уровень энергоэффективности масляных распределительных трансформаторов определяется стандартом HD428 «Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50 Гц от 50 до 2500 кВ·А с масляным охлаждением и максимальным напряжением не выше 36 кВ». В таблице 1 приведены допустимые уровни потерь КЗ и ХХ в трансформаторах в соответствии с указанным стандартом [2].

Таблица 1-Допустимые уровни потерь по стандарту HD428

Номинальная мощность, кВ·А	Допустимые уровни потерь короткого замыкания, кВт			Допустимые уровни потерь холостого хода, кВт		
	$\Delta P_{ка}$	$\Delta P_{кб}$	$\Delta P_{кc}$	$\Delta P_{ха}$	$\Delta P_{хб}$	$\Delta P_{хc}$
250	3,25	4,20	2,75	0,65	0,53	0,42
400	4,60	6,00	3,85	0,93	0,75	0,61
630	6,50	8,40	5,40	1,30	1,03	0,86
1000	10,50	13,00	9,50	1,70	1,40	1,10
1600	17,00	20,00	14,00	2,60	2,20	1,70
2500	26,50	32,00	22,00	3,80	3,20	2,50

Как видно из таблицы 1, для масляных трансформаторов определенной номинальной мощности допускаются три уровня потерь ХХ ( $\Delta P_{ха}$ ,  $\Delta P_{хб}$ , и  $\Delta P_{хc}$ ) и три уровня потерь КЗ ( $\Delta P_{ка}$ ,  $\Delta P_{кб}$ , и  $\Delta P_{кc}$ ). При этом соблюдаются условия:

$$\Delta P_{ха} > \Delta P_{хб} > \Delta P_{хc}; \tag{1}$$

$$\Delta P_{кб} > \Delta P_{ка} > \Delta P_{кc}. \tag{2}$$

Значения допустимых потерь мощности определяются по специальной методике с учетом погрешности измерений. Теоретически существует девять возможных комбинаций  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$ . Однако норматив HD428 допускает только пять комбинаций (рисунок 1), где комбинация  $\Delta P_{та} = \Delta P_{ха} + \Delta P_{ка}$  (выделена утолщенной линией) принята за основу для сравнения.

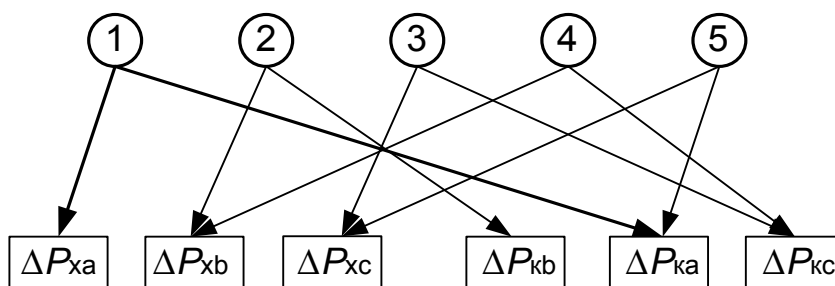


Рисунок 3. Допустимые комбинации уровня потерь.

В соответствии со схемой, показанной на рисунке 1, возможны следующие допустимые комбинации потерь ХХ и КЗ в силовых распределительных трансформаторах:

$$\Delta P_{та} = \Delta P_{ха} + \Delta P_{ка}; \tag{3}$$

$$\Delta P_{тб} = \Delta P_{хб} + \Delta P_{кб}; \tag{4}$$

$$\Delta P_{тc} = \Delta P_{хc} + \Delta P_{кc}; \tag{5}$$

$$\Delta P_{тbc} = \Delta P_{хб} + \Delta P_{кc}; \tag{6}$$

$$\Delta P_{тca} = \Delta P_{хc} + \Delta P_{ка}. \tag{7}$$

Используя данные таблицы 1, определим для рассмотренных комбинаций предельно допустимые численные значения  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$  для трансформатора мощностью 400 кВ·А и приведем их в таблице 2.

Таблица 2- Допустимые уровни потерь для трансформатора мощностью 400 кВ·А.

Номер комбинации	Потери активной мощности, кВт		
	$\Delta P_x$	$\Delta P_k$	$\Delta P_T$
1	0,93	4,6	5,53
2	0,75	6,0	6,75
3	0,61	3,85	4,46
4	0,75	3,85	4,6
5	0,61	4,6	5,21

Энергоэффективность распределительного трансформатора определяется следующими условиями:

$$\Delta P_{xi} \leq \Delta P_{xj} \quad (8)$$

$$\Delta P_{ki} \leq \Delta P_{kj}, \quad (9)$$

где  $\Delta P_{xi}$  и  $\Delta P_{ki}$ - соответственно фактические потери ХХ и КЗ  $i$ -го трансформатора,  $i = 1, \dots, n$  (здесь  $n$ - количество рассматриваемых трансформаторов);

$\Delta P_{xj}$  и  $\Delta P_{kj}$ - соответственно допустимые потери ХХ и КЗ  $j$ -й комбинации,  $j = 1, \dots, 5$ .

Сопоставим технические характеристики трансформатора типа ТМГ24-400/10 с данными таблицы 2 по условиям (8) и (9). Уровень потерь ХХ трансформатора (0,29 кВт) значительно меньше допустимого значения для любой комбинации, а по потере КЗ (5,8 кВт) трансформатор отвечает второй комбинации, для которой  $\Delta P_{тб} = 0,75 + 6 = 6,75$  кВт. Таким образом, трансформатор типа ТМГ24-400/10 по энергоэффективности соответствует стандарту HD428.

В 2012 году первой в России к выпуску силовых распределительных трансформаторов типа АТМГ с аморфными сердечниками АТМГ мощностью 250-1000 кВ·А приступила группа «Трансформер». В таблице 3 приведены сравнительные данные по потерям ХХ трансформаторов АТМГ «Трансформер».

Таблица 3-Потери холостого хода трансформаторов АТМГ «Трансформер»

Номинальная мощность, кВ·А	Потери ХХ в трансформаторе с обычной сталью, кВт	Потери ХХ в трансформаторе с аморфным сплавом, кВт	Снижение потерь ХХ, %
250	0,52	0,15	71%
630	1,0	0,28	77%
1000	1,7	0,35	80%
1600	2,1	0,49	77%
2500	2,7	0,55	80%

Проанализировав уровень потерь ХХ трансформаторов АТМГ «Трансформер», можно сделать вывод, что данные трансформаторы имеют потери холостого хода, соответствующие наиболее энергоэффективному уровню  $\Delta P_{xc}$  (таблица 1).

Трансформаторы с магнитопроводами из АС имеют *высокую энергоэффективность*, так как их потери ХХ составляют примерно 1/3 от потерь холостого хода трансформаторов с сердечником из холоднокатаной электротехнической стали.

В то же время трансформаторы данной конструкции обладают и рядом недостатков. Существенным недостатком магнитопроводов из АС является их более высокая стоимость по сравнению с сердечниками из традиционных материалов. Кроме того, аморфная сталь имеет толщину 25-30 мкм, большую твердость и хрупкость. Последний фактор усложняет сборку магнитопровода. В связи с этим аморфный материал наиболее пригоден для витой конструкции магнитопровода, то есть для трансформаторов, имеющих номинальную мощность до 1000 кВ·А.

#### Выводы

1. Применение трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов позволяет снизить потери мощности и электроэнергии в системах электроснабжения объектов разного назначения, а также связанные с электропотреблением технико-экономические показатели промышленного предприятия: плату за электропотребление, энергетическую составляющую себестоимости продукции, выброс CO<sub>2</sub> в атмосферу и т.д.

2. Серийное производство трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов в Республике Беларусь сдерживается высокой стоимостью аморфных материалов, которые приходится закупать в зарубежных странах. Освоение производства аморфных сплавов в нашей стране способствовало бы выпуску энергоэффективных трансформаторов на Минском электротехническом заводе.

#### Литература

1. Адольф, К.В., Метельский В. Масляные энергосберегающие трансформаторы /К.В. Адольф, В. Метельский // Международный электротехнический журнал ЭЛЕКТРИК – 2013. – № 138. – С. 14-17;

2. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов (электронный ресурс). Ресурс доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2384](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2384).