

**Т. П. ПАВЛЕНКО**, д-р. техн. наук., проф. НТУ «ХПИ»;  
**М. Н. ТОКАРЬ**, соиск. НТУ «ХПИ»

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АМОРФНЫХ СТАЛЕЙ В ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКАХ ТОКА**

В статье проведен анализ существующих технических решений, способствующих повышению эффективности использования датчиков тока за счет использования в магнитопроводах традиционных магнитомягких материалов и аморфной стали. Проведенные исследования показали возможность применения аморфной стали в сердечниках магнитопроводов индуктивных датчиков тока. Данное решение способствует экономии энергоресурсов и материалов магнитопроводов.

**Ключевые слова:** сердечник, магнитопровод, датчик тока, аморфная сталь, индуктивность

**Введение.** В современном мире при автоматизации технологических процессов используются датчики различного назначения [1], которые участвуют в работе систем управления агрегатами, механизмами, электротехническими устройствами. Такие датчики выполняют функции измерения физических величин, с помощью которых получают информацию об изменении параметров контролируемых систем и электротехнических устройств.

Информацию о перемещении рабочих органов машин, роботов, элементов электротехнических устройств, в настоящее время, получают с помощью индуктивных датчиков. Такие датчики реагируют на поступающий электрический сигнал, проходящий через все токопроводящие элементы конструкций, и преобразуют его.

Широкое применение индуктивные датчики получили благодаря простоте конструкции и принципу действия наряду с эффективной их работой. Особенностью таких датчиков (рис.1) является их бесконтактность, что не требует механического воздействия, и работают они за счет изменения электромагнитного поля.



Рис. 1 – Конструкции датчиков

Основными элементами конструкции индуктивного датчика являются обмотка индуктивности и магнитная система, представляющая собой магнитопровод, имеющего подвижный элемент (якорь, сердечник), который совершает линейное или угловое перемещение под действием измеряемой

величины. В результате преобразования поступающего сигнала происходит изменение сопротивления катушки индуктивности датчика со стальным сердечником или якорем при изменении воздушного зазора в магнитной цепи.

Датчики тока широко используются в схемах защиты от перегрузок, в зарядных устройствах, импульсных источниках питания, программируемых устройствах и т.п. Такие датчики осуществляют контроль и измерение тока с помощью токовых шунтов, трансформаторов тока или магнитных усилителей.

В настоящее время самым распространенным в применении является датчик измерения тока на основе датчика Холла. Представленный датчик обладает массой достоинств, которые способствуют его широкому применению в энергетическом и управляющем оборудовании промышленных предприятий, обеспечивая высокую надежность и безопасность систем и приборов. Кроме того, датчик тока на основе эффекта Холла обеспечивает хорошую гальваническую развязку, имеет малые габариты и массу, хорошее быстродействие, низкие потери.

Существует множество методов измерения тока. Однако в промышленности наиболее широко применяются три: резистивный, на основе эффекта Холла и трансформатора тока.

**Цель исследований** – определение свойств и возможности применения аморфной стали в индуктивных датчиках тока.

**Материал и результаты исследований.** Для исследований были изготовлены датчики тока имеющие ферромагнитные сердечники на основе феррита, пермаллоя, электротехнической стали и аморфной стали [1 – 6] с катушками индуктивности. Исследуемые датчики тока содержат три обмотки (рис. 2), расположенные на одном ферромагнитном сердечнике, а именно:  $w_1$  – первичная обмотка, которая подсоединяется к шине с измеряемым током;  $w_2$  – вторичная обмотка,  $w_3$  – короткозамкнутая обмотка (кз). Материал обмоток и шины – медь.

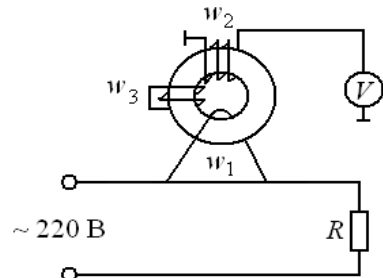


Рис. 2 – Схема соединения датчика тока

Поскольку первичная обмотка и участок шины с измеряемым током представляют собой параллельное соединение, то ток в первичной обмотке в зависимости от измеряемого тока определяется как:

$$I_1 = I \frac{\rho l S_1}{\rho l S_1 + \rho_1 l_1 S}, \quad (1)$$

где  $I_1$  – ток в первичной обмотке, А;

$I$  – измеряемый ток (общий) промышленной частоты, А;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала шины с измеряемым током, (Ом·мм<sup>2</sup>)/м;

$l$  – длина участка шины, м;

$S_1$  – сечение провода первичной обмотки, мм<sup>2</sup>;

$\rho_1$  – удельное электрическое сопротивление провода первичной обмотки, (Ом·мм<sup>2</sup>)/м.

$l_1$  – длина первичной обмотки, м;

$S$  – сечение шины, мм<sup>2</sup>.

Поскольку в приведенном выражении (1) второй сомножитель при выбранных параметрах первичной обмотки и шины является постоянной величиной, то ток вторичной обмотки пропорционален измеряемому току, т.е.

$$I_2 = kI . \quad (2)$$

Этот ток создает в сердечнике датчика магнитный поток, который будучи сцеплен с витками вторичной обмотки  $w_2$  датчика тока, индуцирует в ней ЭДС. Выходной сигнал, согласно выражению (2), линейно зависит от величины измеряемого тока. Но процесс его преобразования, а также линейность определяются параметрами материала ферромагнитного сердечника. Полученные характеристики преобразования измеряемого тока в выходной сигнал для ферромагнитных сердечников из выше приведенных материалов показаны на рис. 3, где 1 – феррит; 2 – пермаллой; 3 – аморфная сталь (без термомагнитной обработки); 4 – электротехническая сталь. Параметры сердечников показаны в табл. 1., а результаты исследований в табл. 2.

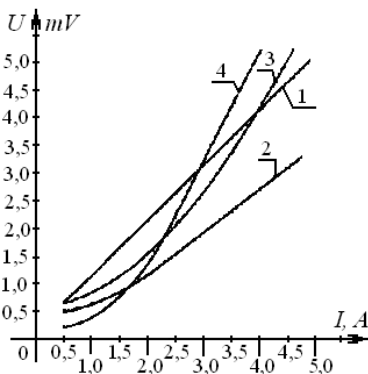


Рис. 3 – Характеристики преобразования тока в выходной сигнал

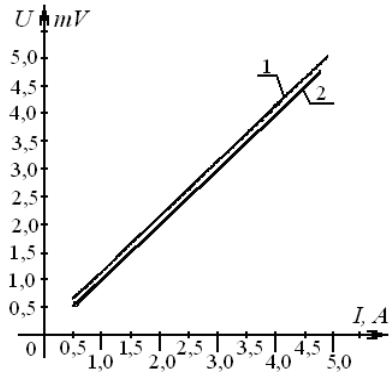


Рис. 4 – Зависимость между выходным сигналом и измеряемым током

Из результатов исследований определено, что сердечник из аморфной стали, не прошедший термомагнитную обработку, имеет нелинейную характеристику, как и сердечник из электротехнической стали.

Для определения возможности применения аморфной стали марки 7421 в сердечниках индуктивных датчиков были изготовлены образцы магнитопроводов из аморфной ленты, прошедшие термомагнитную обработку, с последующим быстрым охлаждением. Дальнейшие исследования аморфной стали после термомагнитной обработки показали совершенно другие результаты, показанные на рис. 4. и в табл.4.

Таблица 1 – Параметры и материал сердечников датчиков тока

Параметры	Материал сердечников датчиков тока			
	1	2	3	4
Размер сердечников, мм	40×25×11	36×24×10	35×26×11	32×20×10
Число витков $w_2$	150	150	150	150
Длина провода $w_1$ , мм	150	200	200	200
Сечение провода $w_1$ , мм <sup>2</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5
Сечение шины измеряемым током, мм <sup>2</sup>	20	20	20	20
Длина участка шины присоединения первичной обмотки, мм	50	50	50	50

Таблица 2 – Параметры исследования сердечников датчиков тока

Диапазон измеряемых токов									
$I$ , А	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Сердечник датчика тока, выполненного из феррита									
$U$ , мВ	0,65	1,1	1,6	2,16	2,68	3,2	3,7	4,19	4,69
Сердечник датчика тока, выполненного из пермаллоя									
$U$ , мВ	0,5	1,61	0,83	1,16	1,54	1,92	2,32	2,19	4,69
Сердечник датчика тока, выполненного из аморфной стали (до термообработки)									
$U$ , мВ	0,53	1,57	0,62	0,71	0,83	0,95	1,08	1,21	1,34
Сердечник датчика тока, выполненного из электротехнической стали									
$U$ , мВ	0,44	0,47	0,55	0,69	0,86	1,05	1,26	1,48	1,68

Полученные результаты исследований показали линейность характеристики датчика тока, имеющего сердечник из феррита.

Параметры сердечников магнитопроводов (табл. 3) изменялись в связи с их расширенным исследованием, где сердечники 1 – на основе феррита; 2 – на основе аморфной стали марки 7421.

Таблица 3 – Параметры и материал сердечников датчиков тока

Параметры	Материал сердечников	
	1	2
Размер сердечников, мм	20×15×4	20×15×4
Число витков $w_2$	200	150
Длина провода $w_1$ , мм	150	150
Сечение провода $w_1$ , мм <sup>2</sup>	0,75	0,5
Сечение шины с измеряемым током, мм <sup>2</sup>	20	20
Длина участка шины присоединения первичной обмотки, мм	50	50

Таблица 4 – Параметры исследования сердечников датчиков тока

Диапазон измеряемых токов									
$I$ , А	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Сердечник датчика тока, выполненного из феррита									
$U$ , мВ	0,51	0,98	1,47	2,02	2,53	3,04	3,53	4,06	4,59
Сердечник датчика тока, выполненного из аморфной стали (после термообработки)									
$U$ , мВ	0,49	0,88	1,29	1,83	2,35	2,87	3,41	3,96	4,49

Крутизна характеристик обоих сердечников практически одинакова

По сравнению зависимостей и определению коэффициента  $k$  из выражения (2), можно сделать следующие выводы:

$k = 0,018$  – для зависимости сердечника, выполненного из феррита;

$k = 0,008$  – для зависимости сердечника, выполненного из аморфной стали марки 7421.

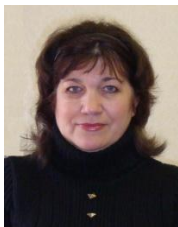
**Выводы.** Полученные результаты исследований говорят о возможности замены сердечника магнитопровода датчика тока на основе феррита сердечником на основе аморфной стали.

Кроме того, учитывая, что вторичная обмотка датчика тока на основе феррита содержала большее количество витков, то датчик тока на основе аморфной стали в 2-3 раза эффективнее по сравнению с другими выше приведенными. Это способствует уменьшению расхода материалов, и соответственно приводит к уменьшению габаритов сердечников. Проведенные исследования и полученные результаты способствуют развитию дальнейшего поиска по возможности применения аморфных сталей различных марок в электромагнитных системах электротехнических устройств.

**Список литературы:** 1. Захаров М.М. Датчики электропроводности. – М.: Наука, 1979.– 156 с. 2. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. –М.: Высш. шк., 1991.– 384 с. 3. Аморфные металлические сплавы. / Под ред. Люборского Ф.Е.: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 584 с. 4. Павленко Т.П. Определение параметров аморфного сплава, предназначенного для электромагнитных систем электрических аппаратов. / Т.П. Павленко, М.Н. Токарь // Сб. научн. тр. ДонГУ – Алчевск. Вип. 40. – 2013. – С. 207. – 211. 5. Павленко Т.П.. Исследование параметров аморфных сплавов, предназначенных для электромагнитных систем электрических аппаратов / Т.П. Павленко. М.Н.Токарь // Оптимізація виробничих процесів. Зб. наук. пр. – Севастополь: СевНТУ. – 2013. – Вип. 14. – 2013 – С. 218 – 223. 6. Павленко Т.П. Токарь М.Н. Анализ и исследование свойств аморфных сплавов. / Т.П. Павленко М.Н Токарь. // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2013. – № 5. – С. 45 – 47.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zakharov M.M. *Datchyky elektroprovodnosti*. Moscow. Nauka, 1979. [Print]. 2. Myshyn D.D. *Mahnytny materyaly*, 1991. [Print]. 3. *Amorfnye metallicheskiye splavy*. / Pod red. Lyuborskoho F.E.: Per. s anhl. Moscow. Metallurgiya, 1987. [Print]. 4. Pavlenko T.P., Tokar M.N. Opredelenie parametrov amorfnoho splava, prednaznacheno dlya elektromagnitnykh system elektricheskikh apparatov. "Sbornik nauchnykh trudov. DonHTU". Alchevsk. Vol. 40. 2013. 207 – 211. [Print]. 5. Pavlenko T.P., Tokar M.N. Issledovanie parametrov amorfnykh splavov, prednaznachennykh dlya elektromagnitnykh system elektricheskikh apparatov Optymizatsiya vyrobnychkh protsesiv. "Zbirnyk naukovykh prats". Sevastopol. Vol. 14. 2013. 218 – 223. [Print]. 6. Pavlenko T.P. Tokar M.N. Analyz i issledovaniye svoystv amorfnykh splavov. "Elektrotehnika i Elektromekhanika". 2013. No 5. 45 – 47. [Print].

*Надійшла (received) 06.07.2014*



Павленко Татьяна Павловна  
д-р техн. наук, проф.  
каф. электрических машин, НТУ «ХПИ»  
E-mail: khpavlenko@yandex.ru



Токарь Максим Николаевич  
соискатель кафедры  
электрических машин, НТУ «ХПИ»  
E-mail: mr.max.t@mail.ru