

УДК 621.3.3

**А. В. Китаев**, канд. техн. наук,  
**А. Н. Войцеховский, С. А. Войцеховский, А. В. Евдокимов**

### О ТАЙНАХ ТОРОИДАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

*Аннотация.* В работе на основе экспериментальных данных описана картина магнитных полей проводника с током, установленного в центре тороидального сердечника, коаксиального кабеля и тороидального трансформатора. Установлено, что причиной наведения ЭДС в витках последнего является разновидность электромагнитной индукции.

*Ключевые слова:* магнитное поле, проводник с током, тороидальный трансформатор, электромагнитная индукция

**A. V. Kitaev** PhD.,  
**A. N. Voytsekhovskiy, S. A. Voytsekhovskiy, A. V. Yevdokimov**

### ABOUT SECRETS OF TOROIDAL TRANSFORMER

*Abstract.* In the work on the basis of experimental data documented picture of the magnetic conductor with current are set in the heart of the toroidal core coaxial cable and toroidal transformer. The cause of EMF in the turns of the last command is a kind of electromagnetic induction.

*Keywords:* magnetic field guide with shock, toroidal transformer, electromagnetic induction

**О. В. Китаев**, канд. техн. наук,  
**О. Н. Войцеховский, С. О. Войцеховский, О. В. Евдокимов**

### ПРО ТАЄМНИЦІ ТОРОЇДАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

*Анотація.* У роботі на основі експериментальних даних описано картину магнітних полів провідника зі струмом, встановленого в центрі тороїдального осердя, коаксіального кабелю і тороїдального трансформатора. Встановлено, що причиною наведення ЕРС у витках останнього є різновидність електромагнітної індукції.

*Ключові слова:* магнітне поле, провідник зі струмом, тороїдальний трансформатор, електромагнітна індукція

**Введение.** В работах Кузьмина В.В., Николаева Г.Н. [7– 8] и других авторов в достаточно эмоциональной форме высказывается мнение, что работа тороидального трансформатора (ТТР) необъяснима на основе устоявшихся положений электродинамики. Дело в том, что во внутренней полости и вне ТТР магнитного поля нет, и, тем не менее, в проводнике, расположенном вдоль центральной оси трансформатора, наводится ЭДС. Следовательно, как утверждают авторы, имеет место парадокс: при отсутствии изменяющегося потока, сцепленного с проводником, в последнем развивается ЭДС. Это явление ставит закон электромагнитной индукции под сомнение.

Обращение к зарубежным источникам [9, 10] с целью поиска ответа на затронутый вопрос успеха не принесло, поскольку авторы указанных работ стараются обойти «скользкую» тему. Важно отметить, что трансформатор, несмотря на принци-

альную простоту устройства, постоянно ставит перед исследователями различные задачи. Дело дошло до того, что журнал «Электричество» организовал дискуссию по вопросам его поведения и описания, которая длилась более двадцати лет (1975–2000 гг.). И это в условиях, когда разработанная теория трансформатора считается одной из лучшей в электротехнике.

**Цель настоящей работы** состоит в построении версии, способной снять ореол загадочности в поведении ТТР на основе использования работ, выполненных авторами ранее [1 – 5].

**Результаты исследований.** Прежде всего, обсудим причины отсутствия магнитного поля во внутренней полости ТТР и вне него. Авторы указанных выше работ этому вопросу не уделяют внимания, полагая, видимо, что отсутствие поля – очевидный факт.

Действительно, в соответствии с традиционным подходом здесь можно рассуждать так:

– для любого внешнего контура, прове-

© Китаев А.В., Войцеховский А.Н.,  
Войцеховский С.А., Евдокимов А.В., 2013

денного вокруг ТТР, согласно закону полного тока алгебраическая сумма пронизывающих его токов равна нулю; следовательно, равна нулю и магнитная напряженность вдоль этих контуров;

– для любого контура внутренней полости ТТР пронизывающий ток равен нулю, поэтому условий для создания магнитного поля нет.

Приведенное объяснение с формальной стороны построено достаточно логично, но неубедительно, поскольку оно не отвечает, например, на такой вопрос: в силу каких физических причин исчезает магнитное поле над проводниками первичной обмотки ТТР, поскольку именно согласно закону полного тока или первого закона Максвелла оно должно там быть? И все попытки по его объяснению через взаимокompенсацию магнитных полей проводников наружного и внутреннего слоев обмотки не выдерживают критики.

Когда объяснение явления на основе положений теории заходит в тупик, то чаще всего причина состоит в том, что абстрактная картина построена без учета ряда воздействующих факторов и потому не соответствует реальной действительности. Коротко говоря, чтобы снять проблему, нужны дополнительные опытные данные. Отсюда возникает необходимость экспериментальных исследований. Приведем описание некоторых из них.

Согласно первому эксперименту изучалось магнитное поле тороидального сердечника при его намагничивании одиночным проводником, установленным по центру.

Этот прием намагничивания широко используется в практике магнитных измерений из-за простоты определения магнитной напряженности. Поскольку считается, что в соответствии с законом полного тока магнитная напряженность  $H$  в любой точке пространства, расположенной на расстоянии  $R$  от провода, прямо пропорциональна току  $I$ , протекающему через провод, и обратно пропорциональна  $R$ .

Следовательно, по мере удаления от провода  $H$  снижается. Проведенный авторами эксперимент с использованием методики, подробно описанной в [5], показал,

что такая закономерность, действительно, имеет место, но только при отсутствии испытуемого образца (в нашем случае тороидального сердечника) (рис.1, а).

При наличии сердечника картина магнитного поля иная (рис.1, б):

– магнитное поле вокруг проводника с током резко сужается и выглядит как ободок, прижавшийся к поверхности проводника;

– между зоной поля проводника и внутренним диаметром сердечника поля нет (или оно так мало, что не улавливается используемыми средствами измерения);

– сильное магнитное поле наблюдается за внешним диаметром сердечника.

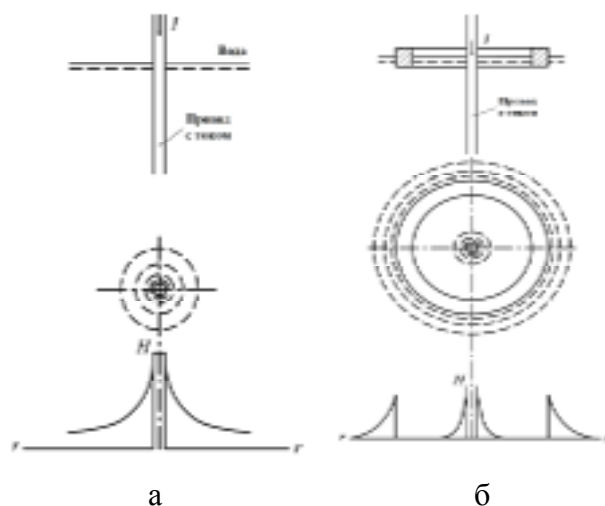


Рис. 1. Конструктивная схема установки и результаты исследования зависимостей  $H = f(r)$

Объяснить все эти явления можно следующим образом:

– намагниченный сердечник создает собственное сильное магнитное поле;

– взаимодействие двух тороидальных полей (сердечника и проводника) ведет к отталкиванию магнитных силовых линий проводника, которые вынуждены прижаться к проводу, что формирует между сердечником и проводником немагнитную зону (магнитный вакуум);

– совокупность магнитных силовых линий внутри сердечника столь велика, что часть их выталкивается во внешнее окружающее пространство.

Наиболее значимым здесь является факт, согласно которому магнитное поле сердечника отталкивает магнитное поле проводника с формированием немагнитной зоны, поскольку всегда считалось, что магнитные поля взаимодействуют при непосредственном контактировании.

Во втором эксперименте исследовалось магнитное поле коаксиального кабеля.

Признано, что магнитное поле вокруг коаксиального кабеля отсутствует. Для объяснения используют опять же закон полного тока, согласно которому любой контур над кабелем пронизывается одинаковыми токами разного направления; их алгебраическая сумма равна нулю, а потому условий для существования магнитного поля нет. Разумеется, что это объяснение носит формальный характер и не раскрывает физической сути исчезновения магнитного поля над оболочкой.

Поэтому был поставлен эксперимент с акцентом фиксации над оболочкой хотя бы узкого магнитного пояса, поскольку ток, протекающий по ней, в соответствии с законом полного тока обязан создать магнитное поле.

Но выполненные исследования показали, что все магнитное поле коаксиального кабеля сосредоточено между жилой и оболочкой. Причем оно настолько сильное, что втягивает в себя магнитные силовые линии оболочки, поэтому ореол магнитного поля над ней отсутствует.

Объектом исследования в третьем эксперименте был непосредственно сам ТТР. Он содержал тороидальный сердечник, на котором была выполнена однослойная обмотка. В результате этого получим дроссель или ТТР с первичной обмоткой. Если по ней пропустить ток, то, как показал эксперимент, в пространстве вокруг ТТР магнитного поля будет отсутствовать. Но теперь в этом уже нет никакой загадочности, поскольку магнитное поле сердечника во много раз превосходит магнитное поле предыдущего устройства и потому втягивает в себя магнитные силовые линии внутренней полости и внешней области.

Далее перейдем к обсуждению вопроса о наведении ЭДС в проводниках вторичной обмотки ТТР. С этой целью возвратимся к

устройству, описанному в эксперименте №1, доработав его следующим образом:

– тороидальный сердечник заменим на описанный выше ТТР с первичной обмоткой;

– проводник, расположенный по центру устройства, сохраним, но в отключенном состоянии от источника и будем рассматривать его как элемент вторичной обмотки ТТР.

Если далее по первичной обмотке устройства пропустить переменный электрический ток и тем самым создать переменный магнитный поток в сердечнике, то в проводнике, расположенном по центру, произойдет разделение зарядов, т.е. наводится ЭДС. Разумеется, что тут же возникнут вопросы: Как доказать и почему это происходит?

В качестве обоснования занятой позиции сошлемся:

1) на прямое измерение ЭДС посредством вольтметра;

2) на возможность измерения электрической напряженности, если исследуемый проводник выполнить в виде излучающего диполя;

3) на известное положение Максвелла: «Если переменное магнитное поле способно вызвать поле электрическое, то переменное электрическое поле создаст поле магнитное». Специалисты в области электродинамики это положение называют выдающимся, гениальным, бесспорным, хотя ни Максвелл, и никто другой никаких доказательств на этот счет не приводили.

Поэтому сформулируем его применительно к нашему рассматриваемому устройству: «Если ток протекает по проводнику под воздействием приложенной к его зажимам внешней переменной ЭДС и определяет создание переменного магнитного поля в сердечнике, расположенном соосно с ним, то переменное магнитное поле того же сердечника, созданное, например, расположенной на нем обмоткой, приведет к разделению зарядов в соосно расположенном проводнике, т.е. к созданию на его зажимах переменной ЭДС».

И, наконец, на вопрос, почему это происходит, ответим: такова одна из возможных форм проявления электромагнитной индукции. Причем она имеет место не только при

охвате проводника магнитным полем, локализованным в сердечнике, но и полем рядом соосно-расположенного проводника.

Разумеется, без возражений в резкой форме здесь дело не обойдется. И будут говорить, что согласно принятым представлениям электромагнитная индукция связана либо с движением проводника в магнитном поле или поля относительно неподвижного проводника, либо с изменением потокосцепления, пронизывающего токопроводящий контур. Все это верно, но нельзя требовать от природы, чтобы ее явления укладывались в рамки нами познанного. Задача науки состоит совсем в расширении познаваемости окружающего мира. Почему бы не согласиться с тем, что в момент формирования взглядов на явление электромагнитной индукции экспериментальных данных оказалось недостаточно. Про ТТР, конечно, знали, но на особенности его поведения специалисты долго не обращали внимания. Интерес к нему резко возрос только в последние годы. Тем не менее, уже сейчас накопленный багаж экспериментальных данных по ТТР дает основания к пониманию электромагнитной индукции в более широко развернутом смысле. И тогда спадает завеса загадочности в поведении ТТР.

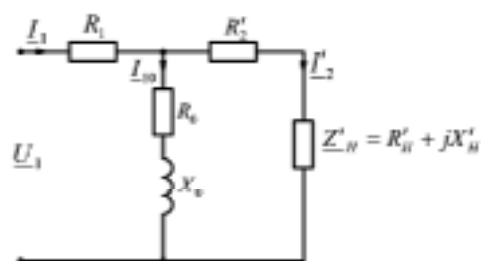
Предложенная форма явления электромагнитной индукции характеризуется тем, что значения развиваемой ЭДС практически сохраняются неизменными при коаксиальном, аксиальном или наклонном положении проводника. Аналогичный результат будет при изменении его длины, сечения, материала (медь, алюминий, сталь) и изгиба вокруг сердечника вплоть до формирования витка в форме петли. Важно иметь в виду, что роль сторон витка в создании ЭДС различна. Разделение зарядов имеет место только в той его части, которая охватывается магнитным потоком. Остальные элементы витка в этом смысле пассивны и функционально нужны лишь для выполнения проводниковой связи.

Составленная версия ведет не только к пониманию механизма работы ТТР, но и пригодна для объяснения принципа действия трансформаторов обычного исполнения. Действительно, здесь при любом рас-

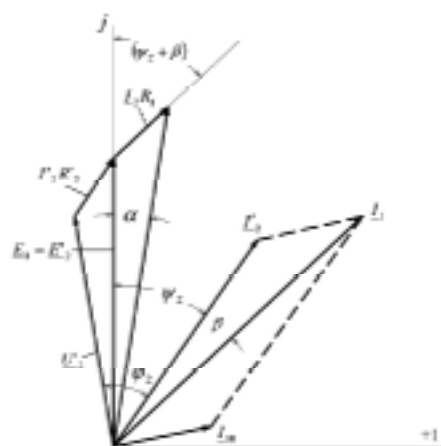
положении вторичной обмотки ее витки также охватываются магнитным потоком, сосредоточенным в сердечнике. Это ведет к разделению зарядов и возникновению ЭДС. Разумеется, что наличие потока рассеяния, создаваемого первичной обмоткой сосредоточенного исполнения, вносит в эту картину определенные искажения и усложнения. Но они не меняют принципиальной сути. Поэтому система основных уравнений трансформатора приемлема и для описания поведения ТТР, но отсутствие в последнем потоков рассеяния приведет к упрощению ее формы записи:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{E}_1; \quad \underline{E}_2' = \underline{I}_2' R_2' + \underline{U}_2'; \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_2',$$
 где  $\underline{U}_1; \underline{E}_1; \underline{I}_1; R_1$  – соответственно напряжение, ЭДС, ток, активное сопротивление первичной обмотки;  $\underline{U}_2'; \underline{E}_2'; \underline{I}_2'; R_2'$  – соответственно приведенные значения напряжения, ЭДС, тока и активного сопротивления вторичной обмотки;  $\underline{I}_{10}$  – ток холостого хода.

В соответствии с системой может быть составлена схема замещения и построена векторная диаграмма ТТР (рис. 2).



а



б

Рис.2. Схема замещения и векторная диаграмма ТТР

Аналитические соотношения для определения фазовых сдвигов между векторами токов и напряжений, необходимых при построении векторной диаграммы, приведены ниже:

Для расчета соотношения угла сдвига между векторами	Векторы
$\varphi_2 = \arctg \frac{X_H}{R_H}$	$\underline{U}'_2$ и $\underline{I}'_2$
$\psi_2 = \arctg \frac{X_H}{R_H + R'_2}$	$\underline{E}'_2$ и $\underline{I}'_2$
$\beta = \arccos \frac{I_1^2 + I_2'^2 - I_{10}^2}{2I_1 I_2'}$	$\underline{I}_1$ и $\underline{I}'_2$
$\alpha = \arccos \frac{U_1^2 + E_1^2 - I_1^2 R_1}{2U_1 E_1}$	$\underline{U}_1$ и $\underline{E}_1$
$\varphi_1 = \psi_2 + \beta - \alpha$	$\underline{U}_1$ и $\underline{I}_1$

Отсутствие потоков рассеяния, разумеется, ведет к большим токам ТТР в режиме короткого замыкания. Но это явление имеет место лишь при однослойной распределенной по периметру ТТР обмотке. Если из того же провода выполнить сосредоточенную обмотку, то токи короткого замыкания снижаются до уровня, наблюдаемого в обычном трансформаторе.

Итак, на основе изложенного достигается универсальность в понимании работы трансформаторов любого конструктивного исполнения, обеспечивается соответствие положений теории с результатами практики, что полностью отвечает принципам системности и преемственности, которые являются основой построения учебного процесса в высшей школе.

### Выводы

1. В основе принципа действия ТТР и всех ТР лежит явление электромагнитной индукции. Оно отличается от известных форм тем, что разделение электрических зарядов в проводнике выполняется переменным магнитным полем, локализованным, например, в сердечнике, охватывающим этот проводник.

2. Наличие ЭДС в проводнике фиксируется даже при наличии значительного не-

магнитного зазора между сердечником и рассматриваемым проводником.

### Список использованной литературы

1. Китаев А. В. Точку в споре о записи основных уравнений трансформатора должен поставить эксперимент / А. В. Китаев // *Электричество* – №7 – 1997. – С. 47 – 53.
2. Китаев А. В. Причины спора записи основных уравнений трансформатора / А. В. Китаев // *Техническая электродинамика*. – 1998. – № 3. – С. 74 – 76.
3. Китаев А. В. Математическое описание электромагнитных процессов в трансформаторе / А. В. Китаев // *Электричество*. – 2000. – № 4. – С. 64 – 69.
4. Китаев А. Проектирование катушек индуктивности / А. В. Китаев, А. Н. Войцеховский, С. А. Войцеховский // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 2 (78). – С. 137 – 143.
5. Китаев А. В. Магнитное поле проводников с током на основе экспериментальных данных / А. В. Китаев, А. Н. Войцеховский, С. А. Войцеховский // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2012. – № 7(83). – С. 58 – 64.
6. Котенев С. В. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов // С. В. Котенев, А. П. Евсеев. – М. : Горячая линия – Телеком., 2011 – 327 с.
7. Кузьмин В. В. Проблемы современной электротехники на пути создания новых источников энергии. / В. В. Кузьмин // *Новини енергетики*. – 2005. – № 15. – С. 44 – 57.
8. Николаев Г. В. Современная электродинамика и причины ее парадоксальности / Г. В. Николаев. – Томск : Изд-во Твердыня, 2003. – 149 с.
9. Pappas P., (1983), The original Ampere Force and Biot-Savart and Lorenz Forces / P. Pappas, H. Nuovo cimento. 11 Agosto. – V. 76B. – No. 2. – Pp. 189 – 196.
10. Michael S. La Fevre, (1992), The core Issues; Understanding Output transformers / S. La Fevre Michael, Part 1 of a series Sound Practices Fall – Pp. 22 – 24.

Получено 26.11.2012

References

1. Kitaev A.V., (1997), Point in dispute about the record of basic equalizations of transformer must do an experiment / A. V. Kitaev // *Electricity* – No. 7. – Pp. 47 – 53 [in Russian].

2. Kitaev A.V., (1998), Reasons of dispute of record of basic equalizations of transformer/ A. V. Kitaev // *Technical electrodynamics* .– No. 3. – Pp. 74 – 76 [in Russian].

3. Kitaev A.V., (2000), Mathematical description of electromagnetic processes is in a transformer. / A.V. Kitaev // *Electricity*. – No. 4.– Pp. 64 – 69 [in Russian].

4. Kitaev A.V., (2011), Planning of spools of Inductance / A. V. Kitaev, A. N.Voytsehovsky, S. A.Voytsehovsky // *Electrotechnic and computer systems*. – No. 2(78). – Pp. 137 – 143 [in Russian].

5. Kitaev A.V., (2012), Magnetic field of , explorers by a c current on the basis of experimental data / A. V. Kitaev, A. N. Voytsehovsky, S. A. Voytsehovsky // *Electrotechnic and computer systems*. – No. 7(83). – Pp. 58 – 64 [in Russian].

6. Kotenjov S.V., (2011), Calculation and optimization of toroid transformers / V. S. Kotenjov, A. P. Yevseev. Moscow: *Hot line – TELECOM.*, – 327 p. [in Russian].

7. Kuzmin V.V., (2005), Problems of the modern electrical engineering on the way of creation of new energy sources. / V. V. Kuzmin // *News of energy*. – No. 15. – Pp. 44 – 57 [in Russian].

8. Nikolayev G.V., (2003), Modern electrodynamics and reasons of her paradoxicality / G. V. Nikolayev. – Tomsk : *Stronghold*, – 149 p. [in Russian].

9. Pappas P. The original Ampere Force and Biot-Savart and Lorenz Forces / P. Pappas, H. Nuovo cimento. 11 Agosto. – 1983. – V. 76B. – No. 2. – Pp.189 – 196. [in English]

10. Michael S. La Fevre, (1992), The core Issues; Understanding Output transformers / S. La Fevre Michael, Part 1 of a series Sound Practices Fall 1992. – P.22 – 24 [in English].



Китаев Александр Васильевич, канд. техн. наук, проф. каф. энергетики и электротехники. Херсонского нац. технического ун-та. Бериславское шоссе 24. г.Херсон,Украина, 73008, тел.+38(0552)516-468, e-mail: laurvignon@yahoo.fr



Войцеховский Александр Никифорович, доц. каф.энергетики и электротехники Херсонского нац. технического ун-та. Бериславское шоссе 24 . г.Херсон,Украина, 73008, тел.+38(0552)516-468,e-mail: laurvignon@yahoo.fr



Войцеховский Сергей Александрович, аспирант каф. технической кибернетики Херсонского нац. технического ун-та. Бериславское шоссе 24 г.Херсон,Украина,73008, тел.+38(0552)516- 468, e-mail: laurvignon@yahoo.fr



Евдокимов Алексей Вячеславович, ст.техник ин-та физики полупроводников. Бериславское шоссе 24 . г. Херсон, Украина, 73008, тел.+38(0552)516-468, e-mail: laurvignon@yahoo.fr,