

Принципы построения трансформаторных датчиков для измерения постоянных, переменных и импульсных токов

СУХОВ Д.В., ШЕВЦОВ Д.А., ШИШОВ Д.М., СОТНИКОВ И.А.

В силовой электронике существует ряд ключевых элементов, без которых невозможно создание статических преобразователей электроэнергии. Одним из таких элементов является датчик тока. Идеальный датчик тока должен обладать рядом особенностей: обеспечивать гальваническую развязку, иметь хорошие линейность и точность, работать в широком диапазоне температур. Он должен давать возможность измерять постоянный, переменный и импульсный токи произвольной формы и иметь максимально широкую полосу пропускания. Наиболее распространенные технологии не позволяют создать устройство, удовлетворяющее всем этим требованиям. В этой связи необходимо искать альтернативные пути решения данной проблемы. Отсутствие отечественных датчиков тока с гальванической развязкой, разрешенных к применению в спецтехнике и способных измерять постоянный и переменный ток произвольной формы, является проблемой государственного масштаба. Кроме того, поставлена задача импортозамещения компонентов для устройств регулирования, преобразования и распределения электроэнергии. В статье авторами предложены два варианта трансформаторных датчиков тока, представлены функциональные схемы, компьютерные модели и результаты моделирования, подтверждающие правильность теоретических основ работы устройства.

К л ю ч е в ы е с л о в а: силовая электроника, датчик тока, трансформаторный датчик тока, датчик тока с трансформаторной развязкой, функциональные схемы, компьютерные модели

В силовой электронике сложно найти более распространенные устройства, чем датчик тока. Они необходимы для построения любого статического преобразователя электроэнергии и применяются во всех случаях, когда необходимо измерить значение электрического тока, в частности в таких устройствах, как:

- блоки ограничения тока;
- блоки питания;
- преобразователи рода тока;
- преобразователи уровня напряжения;
- корректоры коэффициента мощности;
- зарядные устройства аккумуляторных батарей;
- регуляторы электродвигателей всех типов;
- устройства аварийного отключения.

При этом необходимо иметь возможность измерять постоянный, переменный и импульсный токи. Промышленность выпускает датчики тока различных типов. В [1] дан обзор известных технологий, применяемых фирмами, выпускающими датчики. Рассмотрим их основные достоинства и недостатки.

Краткий обзор существующих технологий. Резистивный датчик тока. Датчик представляет собой низкоомный резистор, называемый также шунтом. Принцип действия очевиден – резистор представляет собой простейший преобразователь тока в напряжение. Однако несмотря на очевидность идеи, к шунту предъявляются очень серьезные требова-

ния по точности и температурной стабильности характеристик. В случае измерения быстроизменяющихся токов накладывается дополнительное требование по минимизации паразитной индуктивности. В этой связи стоимость специализированного резистивного датчика тока может быть немалой.

Основной недостаток классического шунта – отсутствие гальванической развязки, необходимой в подавляющем большинстве случаев. Правда, эта проблема решена в так называемых «изолированных шунтовых датчиках», которые, кроме самого измерительного резистора, содержат изолирующий каскад как часть встроенного электронного преобразователя сигнала датчика [1]. Но такое решение приводит к удорожанию изделия и не решает другой проблемы – энергетической. Резистивные датчики не выгодны с точки зрения потерь при измерении больших токов.

Датчик тока на основе элемента Холла. Эти датчики, пожалуй, наиболее широко распространены. Их производят такие гиганты, как LEM, Honeywell и Allegro. Единственным производителем в РФ является АО «НИИЭМ», г. Истра. Однако отечественная продукция по энергетическим и динамическим характеристикам сильно уступает зарубежным аналогам и отсутствует в списке разрешенных компонентов для спецприменений. Стоит особо отметить тот факт, что в этом списке за 2018 г. вообще

отсутствуют датчики тока, что, на наш взгляд, является государственной проблемой.

Датчики на базе элемента Холла в основном выпускают в двух вариантах: прямого измерения и компенсационные. Не вдаваясь в подробности их устройства и работы, выделим достоинства и недостатки.

Датчики Холла прямого измерения тока обладают хорошими динамическими характеристиками, относительно дешевы, с широким диапазоном измеряемых величин. Основные их недостатки — влияние на результат измерения внешних магнитных полей и положения токонесущего провода в окне корпуса (естественно, в случае конструкции с окном), а также существенная нелинейность выходной характеристики.

Датчики компенсационного типа представляют собой систему управления с обратной связью, в которой управляемым параметром является магнитный поток в сердечнике [2]. Свойства элементов, входящих в эту систему, определяют невысокие динамические характеристики таких устройств. Типичное значение полосы пропускания 200 кГц (LEM LA 55-P). Безусловные достоинства компенсационных датчиков — хорошая линейность, отсутствие пульсаций в выходном сигнале и стойкость к внешним электромагнитным полям.

Общими недостатками всех датчиков Холла являются небольшая допустимая отрицательная температура ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) и сложность изготовления таких устройств, вследствие чего они достаточно дороги. В связи с температурным ограничением применение этих изделий в военной технике затруднительно.

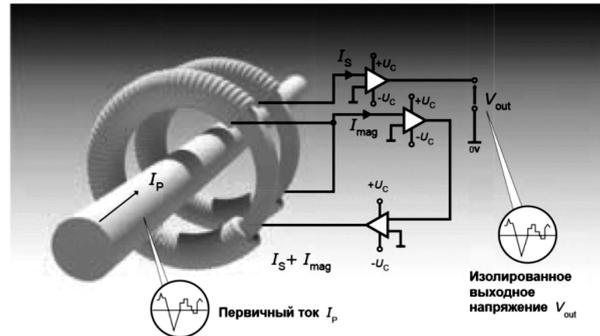
Трансформаторные датчики тока. С точки зрения физических принципов работы наибольший интерес вызывают трансформаторные датчики тока. Не стоит путать их с измерительными трансформаторами тока, которые широко используются для измерения переменного тока промышленной частоты. Такие приборы рассчитаны на измерение только токов, близких по форме к синусоидальному в очень узком диапазоне частот. С помощью трансформаторных датчиков тока можно измерять как переменный ток произвольной формы в широком частотном диапазоне, так и постоянный ток, а также импульсный. По информации из открытых источников, самыми близкими аналогами таких устройств являются датчики компании LEM, выполняемые по технологии Closed Loop Fluxgate C Type. Устройства обладают рядом достоинств. На рис. 1 представлен фрагмент страницы официального каталога датчиков тока и напряжения LEM. Схематично показана конструкция трансформаторного датчика и перечислены его основные преимущества.

Компенсационные датчики по технологии Fluxgate, тип C

Достоинства

- Высокая точность
- Очень широкий частотный диапазон
- Сниженный температурный дрейф
- Отличная линейность
- Измерение дифференциальных токов (CD)
- Высокий уровень изоляции (CV)
- Пониженное влияние на первичный сигнал (CV)

Принцип действия



Используются два тороидальных магнитопровода и две вторичные обмотки. Датчик работает на принципе феррозонда (компенсации Ампер-витков). В датчиках напряжения из первичной цепи берется небольшой ток (несколько мА) и пропускается через первичный резистор и первичную обмотку

Рис. 1. Краткое описание технологии Closed Loop Fluxgate C Type из официального каталога датчиков тока и напряжения LEM

Необходимо отметить, что более развернутого описания принципа действия, чем приведенное на рис. 1, в открытых источниках нет, и это вполне понятно, так как подобные сведения представляют коммерческую тайну производителя. Немногочисленные патенты по данной тематике также не могут прояснить физические принципы работы таких приборов. Авторы [4] предлагают очень интересный вариант построения трансформаторного датчика тока с тремя тороидальными сердечниками. Однако динамические характеристики такого прибора оставляют желать лучшего: полоса пропускания меньше 100 кГц.

Перейдем к рассмотрению предлагаемых авторами статьи двух конструкций трансформаторных датчиков тока.

Конструкция и принцип действия трансформаторного датчика тока. Трансформаторный датчик тока с одной вторичной обмоткой на сердечнике. Функциональная схема предлагаемого датчика тока приведена на рис. 2. Первичная обмотка трансформатора имеет один виток и представляет собой провод с измеряемым током, пропущенным через два тороидальных сердечника (форма сердечника не важна). На каждый сердечник намотана вторичная обмотка. Число витков у вторичных обмоток одинаково. Принцип действия устройства основан на

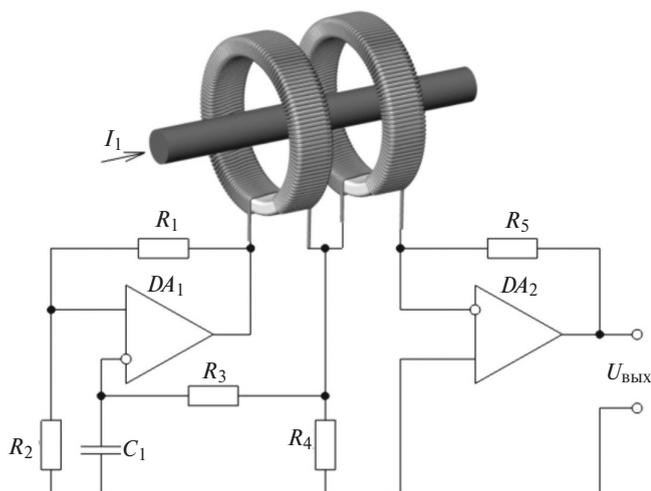


Рис. 2. Функциональная схема трансформаторного датчика тока с одной вторичной обмоткой на сердечнике

законе электромагнитной индукции (закон Фарадея). Применяя его для данной схемы, можно сформулировать следующее: если хотя бы в одном из сердечников присутствует изменяющийся во времени магнитный поток ($dB/dt \neq 0$), то будет происходить электромагнитное преобразование. Устройство будет трансформировать ток как и обычный измерительный трансформатор тока. С помощью операционного усилителя $DA2$ вторичный ток преобразуется в напряжение. Если каскад на $DA2$ не ставить, то датчик будет с токовым выходом.

В чем же разница между предлагаемым датчиком и измерительным трансформатором тока? Она заключается в том, что изменяющийся во времени магнитный поток сердечника в описываемой схеме создается принудительно, вне зависимости от процессов, происходящих в первичной обмотке. Ток I_1 может отсутствовать, но производная индукции не должна быть равна нулю. Для того чтобы добиться этого, необходимо, чтобы один из сердечников всегда был не насыщен или в обмотку на этом сердечнике подавалось отличное от нуля напряжение.

Датчик построен так, что один из сердечников всегда входит в насыщение раньше другого. Это обеспечивается разной скоростью перемагничивания. Каскад на $DA1$ служит для определения момента входа в насыщение и изменения полярности напряжения на вторичных обмотках. В результате на них формируется прямоугольное двуполярное напряжение.

В схеме рис. 2 реализованы две обратные связи: положительная и отрицательная. Сердечник, с которого поступает положительная обратная связь, перемагничивается быстрее. Это происходит вследствие неравномерного распределения напряжения между вторичными обмотками. При этом схема работает в автоколебательном режиме и сама выбирает частоту переключения в зависимости от напряжения питания и уровня измеряемого тока. Элементы R_3 и C_1 предназначены для стабильного запуска схемы независимо от начальных условий.

В соответствии с описанным принципом работы в среде OrCad была разработана модель датчика, представленная на рис. 3. Кроме элементов, присутствующих на функциональной схеме, добавлены усилительные каскады на комплементарных МОП-транзисторах $VT1$, $VT2$, $VT3$ и $VT4$. Сопротивления $R11$, $R22$ и индуктивности $L11$, $L22$ имитируют соответствующие параметры вторичных обмоток. Операционные усилители питаются от двуполярного источника ± 15 В. Число витков вторичных обмоток 1000. Коэффициент передачи датчика 0,1 В/А.

Для реализации описываемого устройства является принципиальным применение аморфных нанокристаллических сплавов с максимально узкой прямоугольной петлей гистерезиса. Элементы $K32$ и $K33$ представляют собой библиотечные модели сердечников Kbreak с параметрами материала ГМ43ДС, выпускаемого ООО НПП «Гаммамет» для тороидального сердечника с размерами $25 \times 20 \times 5$ мм ($D \times d \times h$). Петля гистерезиса и параметры модели приведены на рис. 4.

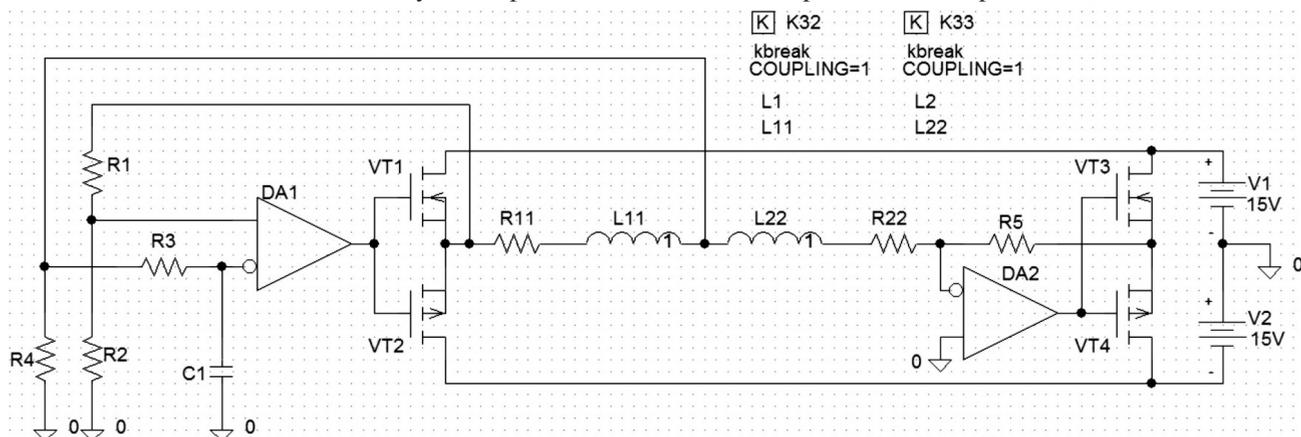


Рис. 3. Модель трансформаторного датчика тока с одной вторичной обмоткой на сердечнике в среде OrCad

Parameters						
Param	Value	Minimum	Maximum	Default	Active	Fixed
LEVEL	2	1	2	2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
GAP	0	0	1e+030	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MS	800000	1	1e+030	1000000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
A	2	1	1e+030	1000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
C	0.1	0.01	1e+030	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
K	2	1	1e+030	500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
AREA	0.065	1e-006	1e+030	0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PATH	7.5	1e-006	1e+030	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PACK	1	1e-006	1e+030	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 4. Параметры модели сердечника Kbreak в среде OrCad

На рис. 5,а–в приведены результаты моделирования схемы датчика в среде OrCad. На каждом рисунке показаны осциллограммы тока в первичной

обмотке (измеряемая величина), напряжения на выходе датчика (выходной сигнал) и значений магнитной индукции в сердечниках. Приведены результаты измерения постоянного (рис. 5,а), синусоидального (рис. 5,б) и прямоугольного (рис. 5,в) токов. Важно отметить, что в случаях, показанных на рис. 5,б и 5,в, измеряемый сигнал имеет постоянную составляющую. Результаты моделирования подтверждают правильность теоретических предположений и демонстрируют отличные динамические характеристики прибора.

На осциллограммах хорошо виден недостаток трансформаторных датчиков тока – наличие пуль-

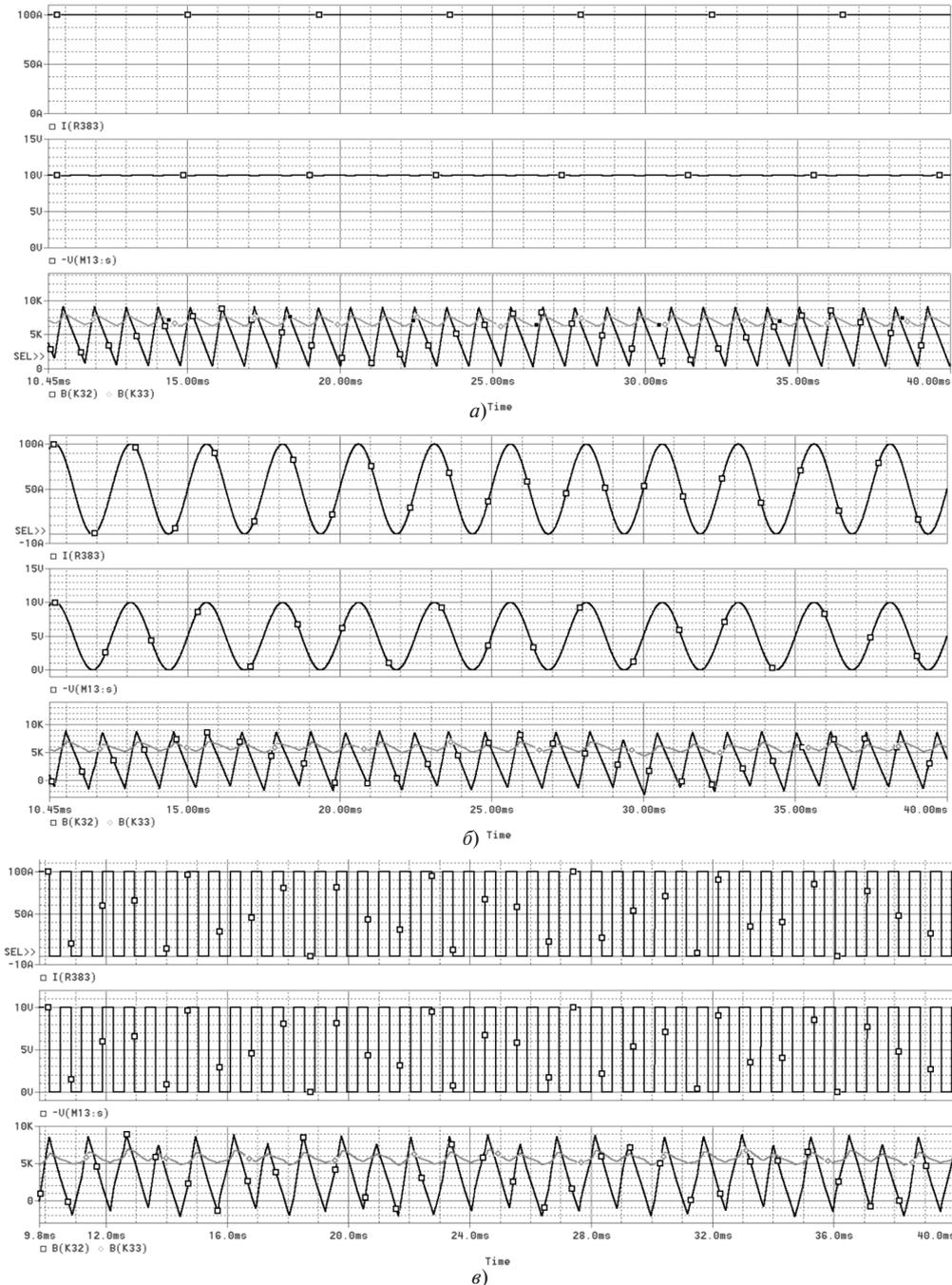


Рис. 5. Результаты моделирования трансформаторного датчика тока с одной вторичной обмоткой на сердечнике в среде OrCad

саций выходного сигнала. Они возникают как следствие процесса перемагничивания сердечников. Их амплитуда прямо пропорциональна ширине петли гистерезиса (коэрцитивной силе) сердечника и обратно пропорциональна числу витков вторичной обмотки. При оптимизации параметров датчика можно свести пульсации к значению, допустимому для данного класса приборов. Кроме того, необходимо отметить, что достоинством данной схемы является наличие всего лишь одной вторичной обмотки на каждом сердечнике трансформатора.

С помощью имитационного компьютерного моделирования было исследовано влияние разброса параметров на работоспособность схемы. Результаты показали очень сильную чувствительность модели к технологическому разбросу параметров сердечника и числа витков вторичных обмоток. Эта особенность усложняет производство и повышает себестоимость изделия.

Трансформаторный датчик тока с двумя вторичными обмотками на сердечнике. Меньшей чувствительностью к технологическому разбросу параметров обладает схема, представленная на рис. 6. Каждый сердечник имеет две вторичные обмотки, одна из которых «измерительная», другая — «управляющая». «Управляющие» обмотки предназначены для организации обратных связей (положительной и отрицательной) при формировании автоколебательного режима.

Элементы R_4 и C_1 предназначены для стабильного запуска схемы независимо от начальных условий.

В соответствии с приведенной функциональной схемой была разработана модель датчика в среде OrCad (рис. 7). Кроме элементов, показанных на функциональной схеме, добавлены усилительные каскады на комплементарных МОП-транзисторах $VT1$, $VT2$, $VT3$ и $VT4$. Сопротивления $R11$, $R22$ и индуктивности $L11$, $L22$ имитируют соответствующие параметры вторичных обмоток. Операционные усилители питаются от двуполярного источ-

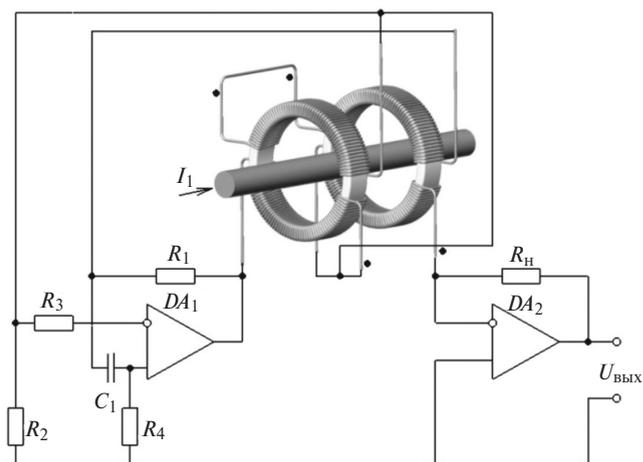


Рис. 6. Функциональная схема трансформаторного датчика тока с двумя вторичными обмотками на сердечнике

ника напряжения ± 15 В. Диоды $VD1$ и $VD2$ предназначены для ограничения на допустимом уровне дифференциального входного напряжения ОУ $DA1$. Число витков вторичных обмоток 1000. Коэффициент передачи датчика 0,1 В/А.

На рис. 8,а–в приведены результаты моделирования схемы датчика в среде OrCad. На каждом рисунке, как и в предыдущем случае, показаны осциллограммы тока в первичной обмотке (измеряемая величина), напряжения на выходе датчика (выходной сигнал) и значений магнитной индукции в сердечниках. В случаях, показанных на рис. 8,б–в, измеряемый сигнал имеет постоянную составляющую. Результаты моделирования подтверждают правильность теоретических предпосылок и демонстрируют отличные динамические характеристики прибора. Кроме того, достоинством данной схемы по сравнению с предыдущей является малое время выхода на режим.

Результаты моделирования обеих схем показывают, что при использовании сердечника с узкой петлей гистерезиса относительная погрешность, обусловленная наличием пульсаций выходного сигнала, не превышает 0,2% при максимальном уровне измеряемого тока.

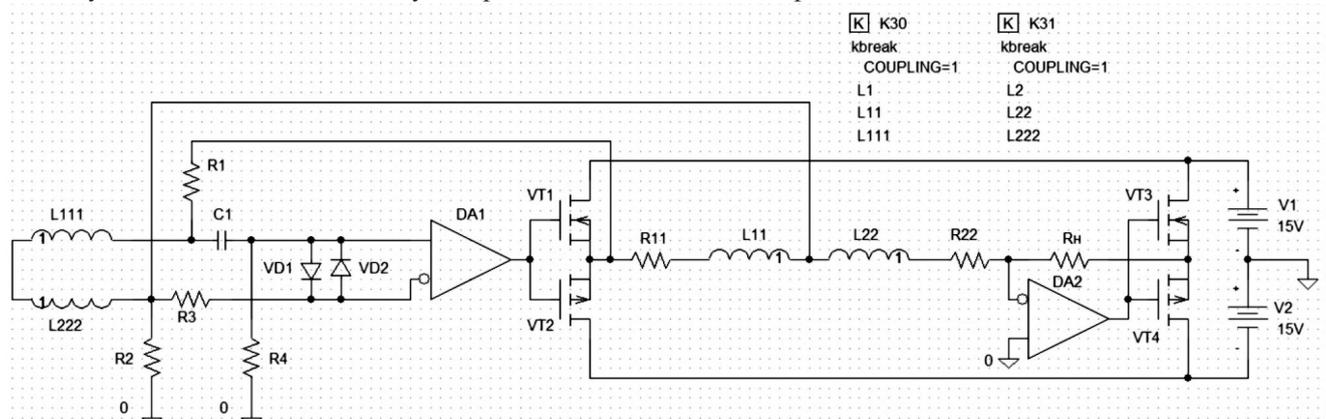


Рис. 7. Модель трансформаторного датчика тока с двумя вторичными обмотками на сердечнике в среде OrCad

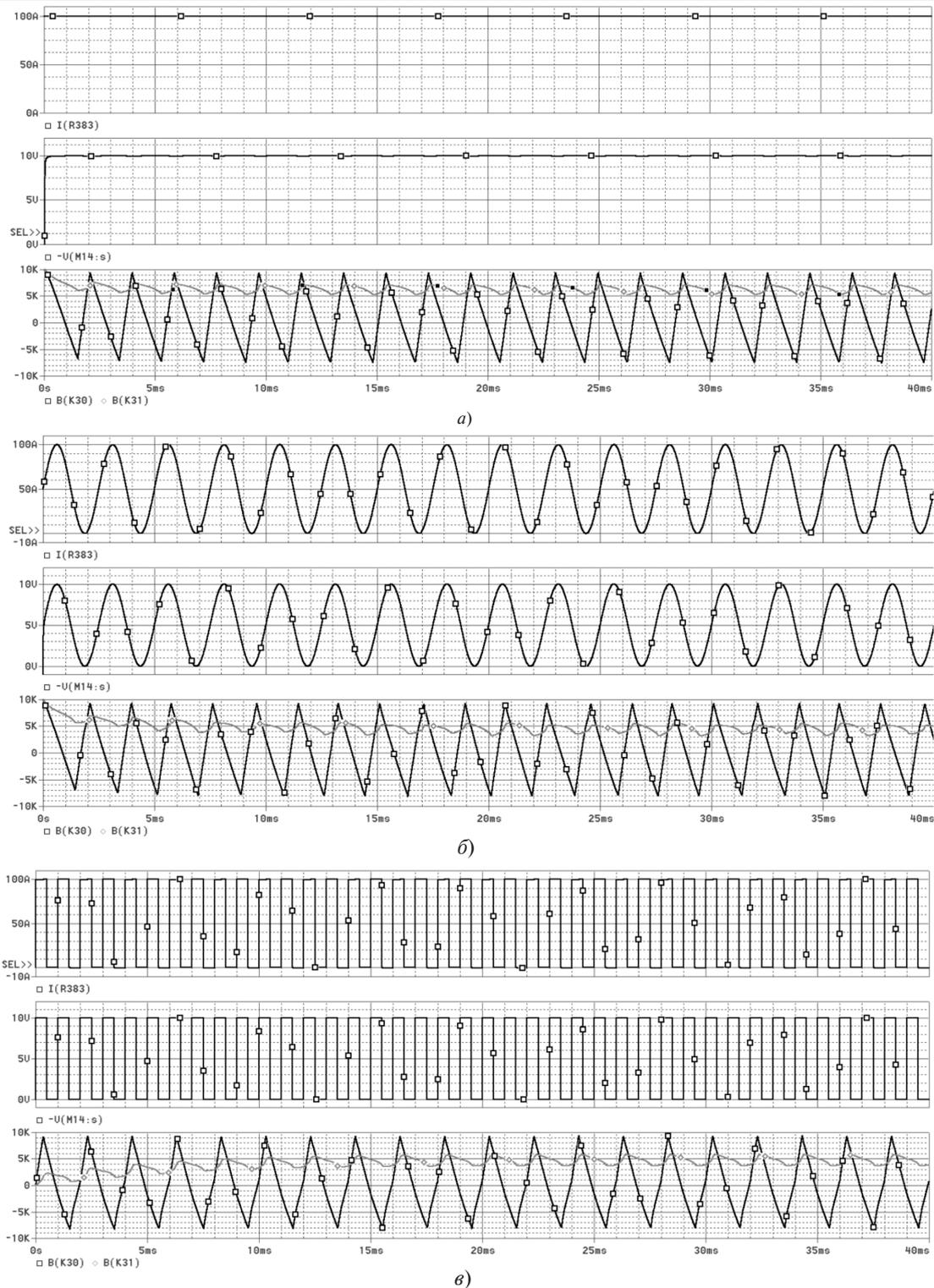


Рис. 8. Результаты моделирования датчика №2 в среде OrCad

Заключение. Достоинства предложенных авторами трансформаторных датчиков тока:

- наличие гальванической развязки;
- способность измерения постоянного тока, а также переменного и импульсного тока произвольной формы;
- характеристики материала сердечника и полупроводниковых компонентов позволяют использо-

- вать датчик тока в широком диапазоне температур ($-60 \div +125 \text{ }^\circ\text{C}$);
- хорошая линейность во всем диапазоне температур (нелинейность не превышает 2%);
- простота и технологичность конструкции (по сравнению с датчиками тока на основе элементов Холла);
- широкая полоса пропускания (не менее 2 МГц);

малое время выхода на режим;
 малая чувствительность к технологическому разбросу параметров (для второй схемы);
 малая чувствительность к несимметрии питающего напряжения;
 малая чувствительность к внешним магнитным полям.

Конечно же, как и всякое техническое устройство, датчики не лишены недостатков. Их основной и, пожалуй, единственный недостаток — наличие пульсаций выходного сигнала. Однако при оптимизации параметров датчика можно свести пульсации к значению, допустимому для данного класса приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silvio Ziegler, Robert C. Woodward, Herbert Ho-Ching Lu. Current Sensing Techniques. — IEEE Sensors Journal, 2009, vol. 9, No. 4.

2. Колпаков А., Карташов Е. Резистивные токовые шунты для применений высокой мощности. — Компоненты и технологии, 2010, № 3, с. 84—88.

3. Ланге Э. Датчики тока компенсационного типа. — Силовая электроника, 2014, № 3, с. 42—44.

4. Nong Wang, Zhonghua Zhang, Zhengkun Li, Qing He, Feipeng Lin, and Yunfeng Lu. Design and Characterization of a Low-Cost Self-Oscillating Fluxgate Transducer for Precision Measurement of High-Current. — IEEE Sensors Journal, 2016, vol. 16, No. 9.

[17.04.2019]

А в т о р ы: Сухов Дмитрий Викторович — старший преподаватель Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт» (НИУ «МАИ»).

Шевцов Даниил Андреевич — профессор НИУ «МАИ».

Шишов Дмитрий Михайлович — доцент НИУ «МАИ».

Сотников Иван Александрович — магистрант НИУ «МАИ».

Elektrichestvo, 2019, No. 9, pp. 50–56

DOI:10.24160/0013-5380-2019-9-50-56

Design Principles of Transformer Sensors for Measuring Direct, Alternating, and Impulse Currents

SUKHOV Dmitry V. (National Reserch University «Moscow Aviation Institute» — NRU «MAI», Moscow, Russia) — Senior Lecturer

SHEVTSOV Daniil A. (NRU «MAI», Moscju, Russia) — Professor

SHISHOV Dmitry M. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Associate Professor

SOTNIKOV Ivan A. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Undergraduate

Power electronics includes a number of key elements without which it is impossible to construct static electric energy converters. A current sensor is one of such elements. An ideal current sensor must have a number of features: it must provide galvanic isolation; it must have good linearity, and it must be able to operate in a wide range of temperatures. It must be able to measure direct, alternating, and impulse current with arbitrary shape, and have the maximally wide pass band. The most widely used technologies do not make it possible to construct a device that would satisfy all these requirements. In this connection, it is necessary to find alternative ways of solving this problem. The lack of domestically produced current sensors with galvanic isolation that are permitted for use in special-purpose devices and able to measure direct and alternating current with arbitrary shape is a state-scale problem. In addition, the task of ensuring the replacement of imported components for electric power control, conversion, and distribution devices has been set forth. The article proposes two versions of transformer current sensors, presents the functional diagrams, computer models, and simulation results confirming the correctness of the theoretical device operation principles.

Key words: *power electronics, current sensor, transformer current sensor, current sensor with transformer isolation, functional diagrams, computer models*

REFERENCES

1. Silvio Ziegler, Robert C. Woodward, Herbert Ho-Ching Lu. Current Sensing Techniques. — IEEE Sensors Journal, 2009, vol. 9, No. 4.

2. Kolpakov A., Kartashov Ye. *Komponenty i tekhnologii* — in Russ. (Components and Technologies), 2010, No. 3, pp. 84—88.

3. Lange E. *Silovaya elektronika* — in Russ. (Power Electrical Engineering), 2014, No. 3, pp. 42—44.

4. Nong Wang, Zhonghua Zhang, Zhengkun Li, Qing He, Feipeng Lin, and Yunfeng Lu. Design and Characterization of a Low-Cost Self-Oscillating Fluxgate Transducer for Precision Measurement of High-Current. — IEEE Sensors Journal, 2016, vol. 16, No. 9.

[17.04.2019]