

УДК 621.317

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ТОКА С РАЗОМКНУТЫМ НЕКОЛЬЦЕВЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Семыкина Ирина Юрьевна,

докт. техн. наук, доцент, дир. института энергетики . E-mail: [siyu.eav@kuzstu.ru](mailto:siyu.eav@kuzstu.ru)

Григорьев Александр Васильевич,

кандидат техн. наук, зав. кафедрой . E-mail: [grigav84@mail.ru](mailto:grigav84@mail.ru)

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

**Аннотация:** В статье описывается принцип создания датчиков тока изолированных на эффекте Холла с разомкнутым некольцевым магнитопроводом для измерения токов в диапазоне до 5000 А. Приводятся исследования магнитной индукции, создаваемой токопроводящей шиной прямоугольного сечения, результаты которых определяют конструктивные параметры датчика и используются при настройке и тарировании. Описаны лабораторные эксперименты, подтверждающие заявленные точностные характеристики датчиков тока изолированных и приведены сведения об их промышленных испытаниях и внедрении.

**Ключевые слова:** Датчик тока изолированный, эффект Холла, магнитная индукция, точность измерений.

### Введение

При современном развитии промышленности практически ни один технологический процесс не обходится без использования силовых электротехнических либо электромеханических установок. Для их эффективной и надежной эксплуатации, как правило, применяются системы управления либо системы защиты и диагностики, обеспечивающие изменение потоков подводимой электрической энергии либо диагностирование неблагоприятных факторов, например, плохого качества питающего напряжения, и защиту от возможных аварийных ситуаций, таких как перегрузка, обрыв фазы, короткое замыкание и т.д.

Неотъемлемым элементом как систем управления, так и систем защиты и диагностики электротехнического оборудования являются датчики тока, предоставляющие информацию о состоянии оборудования. Такая информация может применяться в том числе обособленно, например, в системах диспетчеризации.

Датчики тока могут иметь различный принцип работы [1, 2]. Для цепей переменного тока наиболее распространены резистивные датчики, трансформаторные датчики и датчики на основе эффекта Холла. Последние можно назвать наиболее функциональными, поскольку они подходят как для измерения переменного, так и для измерения постоянного тока, обеспечивают гальваническую развязку и высокую точность.

Как правило, датчики тока на основе эффекта Холла оборудованы кольцевым магнитопроводом [3-5], однако для измерения больших токов, свыше 100 А, наличие кольцевого магнитопровода существенно увеличивает габаритные размеры

датчика тока и, соответственно, его стоимость. Существуют альтернативные методы измерения высоких токов не требующие кольцевого магнитопровода и отличающиеся малыми габаритами, например, оптические датчики тока [6], однако областью их применения являются цепи постоянного тока. В то же время датчики тока на эффекте Холла могут быть выполнены и без кольцевого магнитопровода [7]. По принципу действия датчики тока на эффекте Холла могут быть построены с разомкнутым и замкнутым контуром. Существует мнение, что датчики на эффекте Холла с разомкнутым контуром имеют невысокую точность и узкий диапазон рабочих частот [8], однако на рынке присутствуют датчики разомкнутого типа [9], которые обеспечивают погрешность ниже 1 % и время отклика менее 5 мкс.

Обобщая вышесказанное, существует элементная база и конструкционные приемы, позволяющие обеспечить достаточно высокую точность измерения больших токов при помощи датчиков тока на эффекте Холла с некольцевым магнитопроводом. Примером может служить датчик тока для применения в аэронавтике [10] или датчик тока изолированный [11] для применения в электротехнических установках. Датчик [11] предназначен для измерения тока в шинах, измерение тока выполняется бесконтактным способом при помощи чувствительного элемента Холла, а конструкция предусматривает пластиковый корпус, крепящийся непосредственно на токопроводящий шинопровод. Этот датчик не имеет замкнутого магнитопровода, однако погрешность его измерений не превышает 5 % от номинального значения измеряемого тока.

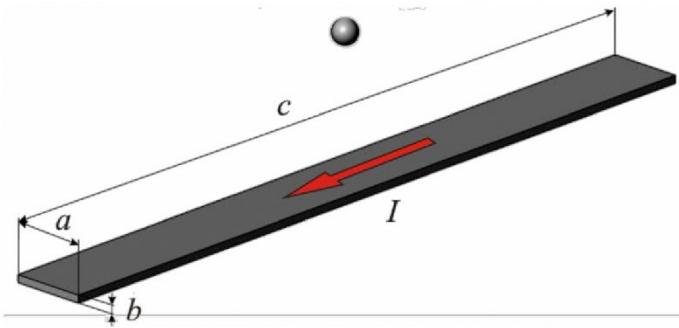


Рис. 1. Шина и точка, в которой вычисляется магнитная индукция

### Принцип функционирования

Традиционно к недостаткам датчиков тока на эффекте Холла разомкнутого типа относят низкое быстродействие вследствие использования массивного сердечника и высокую стоимость вследствие высокой стоимости элемента Холла на большие значения магнитной индукции. Все эти недостатки обусловлены наличием сердечника в конструкции датчиков, однако при измерении больших токов наличие сердечника не является обязательным, поскольку магнитное поле проводника с током будет достаточно сильным. В качестве доказательства рассмотрим зависимость индукции магнитного поля от удаленности от проводника с током при отсутствии сердечника с высокой магнитной проницаемостью. Для примера, расчет этой зависимости выполним для диапазона измеряемых токов 1400 А.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля, создаваемая проводниками с током, находится по следующему выражению:

$$B = \int \frac{\mu_0 I [\mathbf{dl} \times \mathbf{r}]}{4\pi r^3},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  – магнитная проницаемость вакуума;  $I$  – сила тока, протекающего по проводнику;  $r$  – расстояние от проводника с током до точки, в которой вычисляется значение магнитной индукции;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор, вектор связывающий точку, в которой вычисляется магнитная индукция и элемент проводника с током  $dI$ .

Проводник с током, в рассматриваемом случае шина, представляет собой параллелепипед шириной  $a$ , высотой  $b$  и длиной  $c$  (рис. 1). Поскольку ширина шины может составлять 100 мм при длине участка более 2000 мм, т.е.  $c$  значительно больше  $a$ , для определения индукции можно считать проводник бесконечно-длинным, а его индукция, согласно закону Био-Савара-Лапласа, находится по выражению:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Учитывая принятые допущения, задача поиска индукции, созданной шиной прямоугольного се-

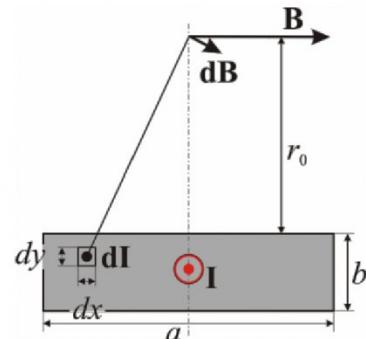


Рис. 2. Поперечное сечение проводника

чения, сводится к задаче на плоскости поперечного сечения проводника (рис. 2). Индукцию в заданной точке над шиной можно определить путем интегрирования элементарных магнитных индукций  $d\mathbf{B}$ , созданных элементарными проводниками с током  $dI$ , образующими шину:

$$B = \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_0^b \frac{\mu_0 I (r_0 + y)}{2\pi ab ((r_0 + y)^2 + x^2)} dy.$$

Отсюда следует выражение для вычисления магнитной индукции, создаваемой токоведущей шиной, в заданной точке:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi ab} \int_{-a/2}^{a/2} \left( \ln((r_0 + b)^2 + x^2) - \ln(r_0^2 + x^2) \right) dx = \\ = \frac{\mu_0 I}{2\pi ab} \left[ \begin{array}{l} a \left( \ln \left( (r_0 + b)^2 + \frac{a^2}{4} \right) - \ln \left( r_0^2 + \frac{a^2}{4} \right) \right) - \\ - \frac{a}{2} - (r_0 + b) \arctan \left( \frac{a/2}{r_0 + b} \right) + \\ + 4 \left( \frac{a}{2} - r_0 \arctan \left( \frac{a/2}{r_0} \right) \right) \end{array} \right]. \quad (1)$$

Полученная в результате зависимость индукции магнитного поля  $B$  от удаленности чувствительного элемента от шины  $r_0$  показана на рис. 3, где  $I = 1400$  А,  $a = 50$  мм,  $b = 5$  мм. Корректность этой зависимости подтверждается сходимостью результатов со схожими исследованиями [12].

Рис. 3 позволяет сделать вывод, о количественном значении снижения магнитной индукции при удалении чувствительного элемента от проводника и может использоваться как инструмент для тарировки датчиков тока изолированных.

Дополнительно из полученного графика определяются конструктивные параметры размещения чувствительного элемента относительно токопроводящей шины. Так, если в основу датчика положен элемент Холла с линейным диапазоном измерения  $\pm 50$  мТл, для обеспечения достаточной точности изменения тока в диапазоне до 1400 А чувствительный элемент следует размещать в непосредственной

близости от поверхности шины, а если выбрать менее дорогостоящий элемент Холла с диапазоном  $\pm 7.5$  мТл, ту же точность изменения можно достичь за счет размещения чувствительного элемента на высоте установки 30 мм.

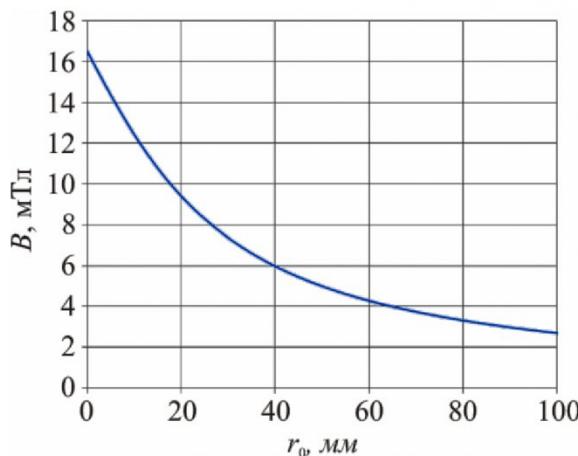


Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля от удаленности чувствительного элемента

Описанный принципложен в основу функционирования датчиков тока изолированных [11]. Корпус такого датчика, изготовленный из материалов, обладающих хорошими диэлектрическими свойствами, устанавливается непосредственно на токопроводящую шину и для обеспечения неподвижности и надежной фиксации крепится с помощью резьбового крепежного элемента. При протекании тока вокруг шины создается магнитное поле, которое будет фиксироваться чувствительным элементом Холла. В зависимости от диапазона измеряемых токов датчик тока изолированный может как включать в свой состав разомкнутый некольцевой магнитопровод, так и работать без магнитопровода (рис. 4). Исходя из этого принципиальным моментом для эксплуатации такого датчика является размещение корпуса датчика нашине. Варианты установки датчика показаны на рис. 5, при этом следует отметить, что обеспечение корректной установки не требует дополнительных затрат на монтаж.

#### Техническая реализация

Датчик тока изолированный, работающий на описанном принципе, может использоваться как

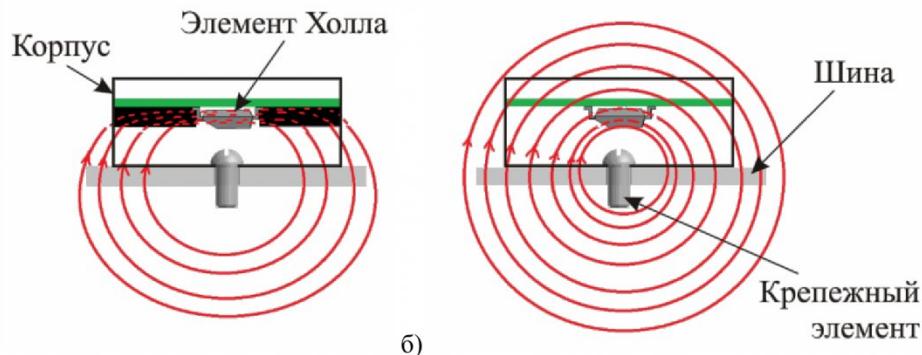


Рис. 4. Датчик тока изолированный, установленный на шину:  
а) с магнитопроводом; б) без магнитопровода

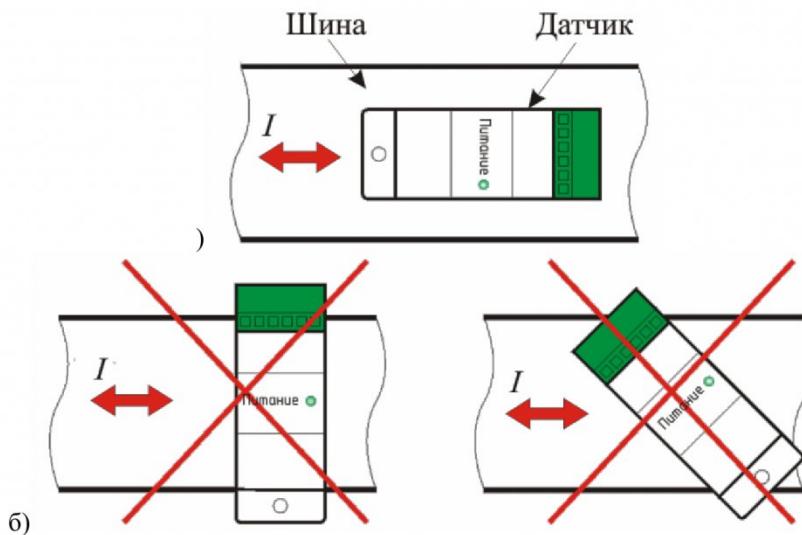


Рис. 5. Варианты установки датчика тока изолированного на токопроводящий шинопровод: а) правильная установка; б) неправильная установка

для получения информации о мгновенном значении измеряемого тока, так и о его действующем значении. Для каждой из этих задач применяются собственные схемотехнические решения, общим для которых является использование чувствительного элемента Холла, а также линейного стабилизатора напряжения и импульсного источника питания. В качестве чувствительного элемента выбран датчик [13], поскольку в сравнении с [14, 15] имеет существенно меньшую стоимость при допустимых технических характеристиках.

Для измерения действующего (среднеквадратического) значения переменного тока необходимо переменный сигнал с выхода датчика Холла преобразовать в постоянный сигнал, для чего в модификацию датчика среднеквадратичного значения тока вводится выпрямляющий усилитель, смещающий делитель напряжения, фильтр низких частот и преобразователь напряжение-ток для формирования выходного унифицированного токового сигнала 4..20 мА.

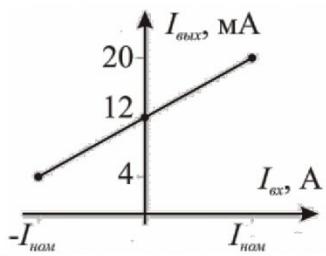


Рис. 6. Внешняя характеристика модификации датчика мгновенного значения тока

В схеме модификации датчика мгновенного значения тока не требуется наличие выпрямляющего усилителя, вместо которого использована схема на операционных усилителях, позволяющая регулировать сдвиг и усиление сигнала датчика тока, делитель напряжения для снижения напряжения при отсутствии тока измеряемой цепи, инвертирующий усилитель со смещением, а также преобразователь напряжение-ток, который в данной модификации обладает активным токовым выходом. Внешняя характеристика модификации датчика мгновенного значения тока показана на рис. 6, а сам датчик, в отличие от модификации датчика среднеквадратического значения тока, может измерять также и постоянные токи.

### Экспериментальные исследования

Для настройки и тарирования датчика токов изолированных были разработаны и изготовлены испытательные стенды.

Первый лабораторный стенд (рис. 7 а), создавший максимальные токи на шине до 300 А, был использован для исследования характера выходных характеристик и исследования зависимости диапазона измеряемых токов датчика от расстояния между шиной и чувствительным элементом. Данный стенд имеет невысокую точность измерения, но использовался в работе на предварительных этапах отладки экспериментальных образцов датчиков тока изолированных.

Второй лабораторный стенд (рис. 7 б) с максимальным током до 5000 А подготовлен для окончательной настройки и тарирования датчиков. Оба стенда построены на базе понижающих регулируемых автотрансформаторов и в качестве эталонного средства измерения включают в свой состав датчики тока производства компании LEM серии L, включенные в государственный реестр средств измерения под № 54786.

Тарирование датчиков тока изолированных производилось путем регулировки выходного тока датчика. Результаты измерений, проведенные на стенде с максимальным током до 300 А, представлены в таблице 1, а результаты на стенде до 5000 А – в таблице 2. В ходе проведения испытаний была разработана методика калибровки датчиков тока изолированных в модификации измерения среднеквадратического значения тока, а вычисленная относительная погрешность составила менее 1.5 %.

Также с использованием лабораторного стендса максимальным током до 5000 А был выполнен ряд экспериментов, направленных на исследование влияния размеров шины на показания датчика тока изолированного.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние толщины шины на показания датчика тока. Для наращивания толщины шины были изготовлены отрезки шины исходного размера 50×5 мм, которые затем укладывались в два и в три слоя. Положение датчика тока относительно верхней поверхности сборной шины во всех экспериментах оставалось постоянным. На рис. 8 а-в

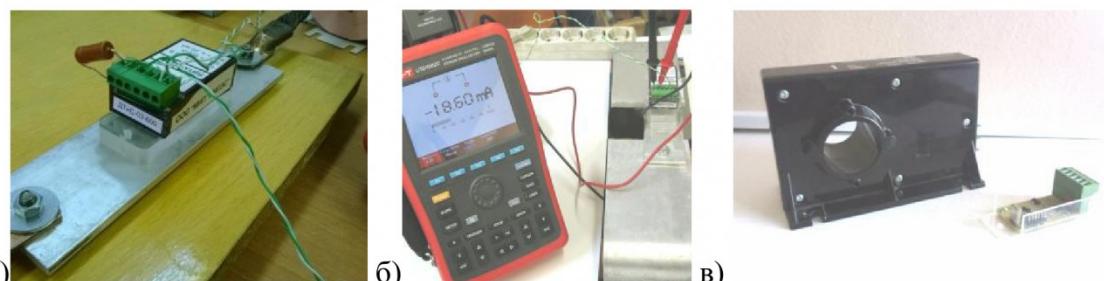


Рис. 7. Датчик тока изолированный с диапазоном измерения 1400 А:  
а) испытания на стенде до 300 А; б) на испытательном стенде до 5000 А; в) сопоставление с датчиком LEM

Таблица 1 -Результаты испытаний на стенде с максимальным током до 300 А

	Снято			Вычислено		
	$U_{dm}$ , В	$I_{mm}$ ,	$I_{dm.real}$ , мА	$I_{real}$ , А	$U_{dm.theor}$ , В	$I_{dm.theor}$ , мА
Эксперимент 1	1.533	0	3.997392438	0	1.534	4
	2.099	0.5	5.47327249	60	2.1476	5.6
	2.709	1	7.063885267	120	2.7612	7.2
	3.314	1.5	8.641460235	180	3.3748	8.8
	3.979	2	10.37548892	240	3.9884	10.4
	4.559	2.5	11.88787484	300	4.602	12
	Снято			Вычислено		
Эксперимент 2	$U_{dm}$ , В	$I_{mm}$ ,	$U_{dm}$ , В	$I_{mm}$ ,	$U_{dm}$ , В	$I_{mm}$ ,
	1.534	0	4	0	1.534	4
	1.677	0.15	4.372881356	18	1.71808	4.48
	1.803	0.27	4.701434159	32.4	1.865344	4.864
	2.123	0.53	5.535853977	63.6	2.184416	5.696
	2.734	1	7.129074316	120	2.7612	7.2
	3.315	1.45	8.644067797	174	3.31344	8.64
	4.032	2.01	10.5136897	241.2	4.000672	10.432
	4.597	2.45	11.98696219	294	4.54064	11.84

представлены экспериментальные и теоретические данные о зависимости показаний датчика при токе 1400 А от расстояния до токоведущей шины при толщине шины от 5 до 15 мм соответственно. Из графиков видно, что увеличение толщины шины приводит к снижению индукции при том же расстоянии до токоведущей шины, а увеличение толщины шины в 3 раза привело к снижению показаний чувствительного элемента Холла на 8.5 %.

Вторая серия экспериментов проводилась для

исследования влияния ширины шины на показания датчика тока при фиксированном расстоянии до чувствительного элемента. В ходе эксперимента отрезки шины соединялись и укладывались горизонтально. Результаты измерений, приведенные на рис. 8 г, позволяют сделать вывод, что увеличение ширины шины также приводит к снижению показаний датчика.

Таким образом, была установлена степень влияния конструктивных размеров шины на показания датчика тока изолированного, учитываемая

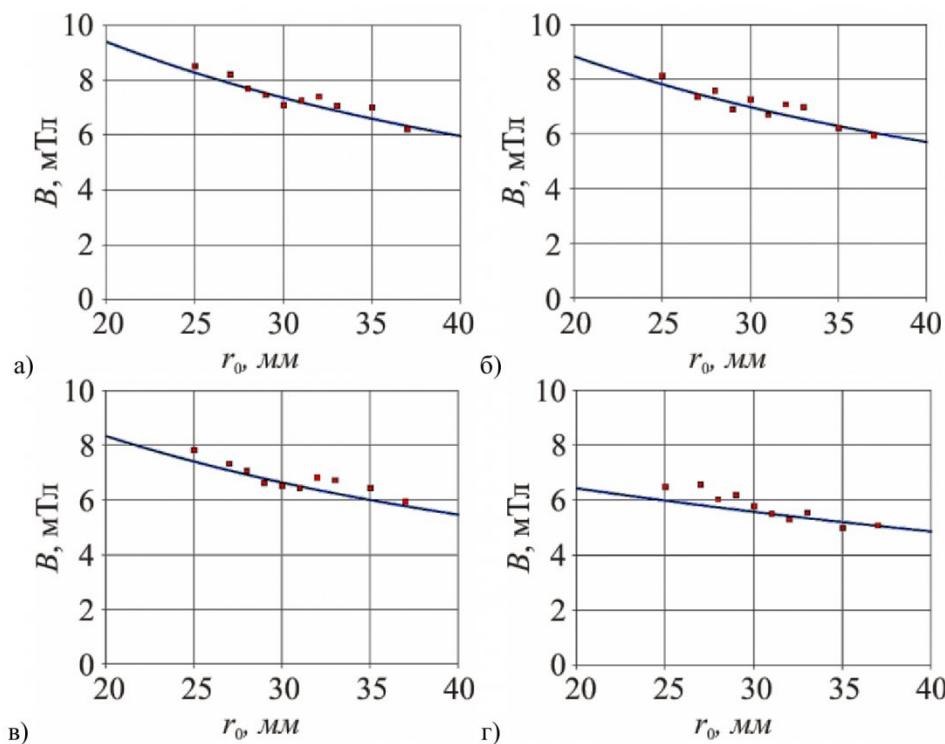


Рис. 8. Зависимость индукции от расстояния до шины и параметров шины, сплошная линия – расчетная зависимость, точки – экспериментальные данные, размер шины: а) 50×5 мм; б) 50×10 мм; в) 50×15 мм; г) 100×5 мм

Таблица 2 - Результаты испытаний датчика тока на 1400 А

$I_{peak}$ , А	$I_{dt}$ , мА	$I_{dt.изм}$ , А	Приведенная погрешность, %
0	4	0	0
101.14	5.11	97.125	0.286786
405.72	8.6	402.5	0.23
705.7	12.03	702.625	0.219643
1039.6	15.96	1046.5	0.492857
1400	19.92	1393	0.5

при выборе параметров элементов схемы при изготовлении и тарировании конкретного датчика, либо исключаемая конструкционными решениями. В качестве такого конструкционного решения предложено комплектовать датчики тока изолированные подкладками, толщина которых рассчитывается исходя из типоразмера шины (рис. 9), где толщина подкладки определяется линейным диапазоном измерения чувствительного элемента Холла из (1). Рассчитанные толщины подкладок для датчика тока изолированного на 1400 А в зависимости от типоразмеров шин приведены в таблице 3.

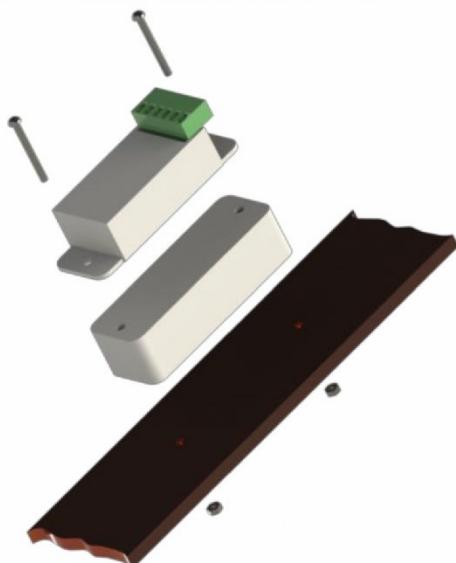


Рис. 9. Установка датчика тока изолированного с подкладкой

Описанные исследования позволили изготавливать и провести испытания экспериментальной серии датчиков тока изолированных в модификации измерения среднеквадратического тока. Основная задача этой работы заключалась в оценке повторяемость характеристик этих датчиков и выявлении проблемных операций при их мелкосерийном изготовлении. В результате лабораторных

исследований повторяемость характеристик была подтверждена, а вычисленные относительные погрешности образцов составили не выше 1.068 %.

Помимо лабораторных, описанные образцы датчиков тока изолированных прошли промышленные испытания на насосной станции водоканала в г. Березовский Кемеровской области, внешний вид места установки показан на рис. 10 а. В ходе промышленных испытаний датчики тока надежно функционировали, изменения технических характеристик датчиков не выявлено. Измененные значения тока на протяжении всего периода промышленных испытаний соответствовали значениям контрольных приборов с допустимой погрешностью (рис. 10 б).

#### Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования доказали, что с использованием научного подхода датчики тока на эффекте Холла с разомкнутым некольцевым магнитопроводом [11] в диапазоне до 5000 А могут обладать сопоставимыми точностными характеристиками с датчиками тока, оборудованными кольцевым магнитопроводом. При этом цена такого датчика для измерения высоких токов оказывается меньшей на величину от 2 тыс. руб., габариты ниже более чем в 7.6 раз, а трудозатраты на установку незначительны, что подтверждается специалистами насосных станций водоканала в г. Березовский и г. Юрга Кемеровской области, где внедрены такие датчики.

Изготовленные по [11] датчики тока имеют степень защиты не ниже IP20 по ГОСТ 14254-96, климатическое исполнение и категория размещения УХЛ 4 по ГОСТ 15150-69, и, следовательно, могут быть использованы в качестве средства получения информации в устройствах управления, защиты, диагностики или диспетчеризации на большинстве промышленных предприятий России и рекомендуются к применению для таких машин и механизмов как электродвигатели насосов, компрессоров и т.п.

Таблица 3 - Подкладки для датчика тока изолированного на 1400 А в зависимости от типоразмеров шин, мм

Ширина шины (a)	40	50	60	80	100	100	120
Толщина шины (b)	4	5	6	8	8	10	10
Толщина подкладки	28	25	22	13	2	1	0



*Рис. 10. Промышленные испытания датчиков тока изолированных среднеквадратичных: а) установка в блоке преобразователя частоты; б) показания тока, измеренного промышленным преобразователем частоты, и показания датчиков тока изолированных в настраиваемом пользовательском интерфейсе SCADA системы*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 541 с.
2. Roman M. Instrumentation and Measurement in Electrical Engineering. – USA: Brown Walker Press, 2011. – 244 p.
3. Датчики тока, промышленное исполнение. – ТВЕЛЕМ. – URL: <http://www.lem.com/ru/ru/content/view/478/882/> (дата обращения: 05.08.2015).
4. Current Sensors. Product Range Guide. – Honeywell International Inc. – 2010. – 12 p. – URL: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-current-range-guide-005918-3-en.pdf> (дата обращения: 05.08.2015).
5. Датчики постоянного и переменного тока. – НИИ Электромеханики. – URL: [http://www.niem46.ru/current\\_sensors/](http://www.niem46.ru/current_sensors/) (дата обращения: 05.08.2015).
6. Bohnert K. A revolution in high dc current measurement / K. Bohnert, P. Guggenbach // ABB Review. – 2005. – № 1 – Р. 6-10.
7. Foletto A. Analysis of a Hall-Effect System With Two Linear Sensor ICs for 30 mm Displacement / A. Foletto, A. Friedrich, S. Gupta. – Allegro MicroSystems, LLC. – 2013. 8 p. – URL: <http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Hall-Effect-System-With-Two-Linear-Sensor-ICs.aspx> (дата обращения: 05.08.2015).
8. Чекмарев А. Датчики тока и напряжения ABB – от печатной платы до преобразователей-гигантов // Силовая электроника. – 2006. – № 9. – С. 56-57.
9. Tamura Open Loop Hall Effect Current Sensors. – Tamura Corporation of America. – 2009. – 20 p. – URL: <http://www.tamuracorp.com/uploads/currentsensor/OpenloopPDF.pdf> (дата обращения: 05.08.2015).
10. Babinet C. Next generation of current sensor for aeronautics: preliminary designs. – A Thesis for the Degree Master of Science in Mechanical Engineering. – Georgia Institute of Technology, 2008. – 116 p.
11. Датчик тока изолированный: пат. 2531040 Рос. Федерация: МПК7 G01R19/00 / В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина, А.В. Григорьев, Д.Е. Татаринов, Е.А. Мерзлякова; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева". – 2013125419/28; заявл. 31.05.2013; опубл. 20.10.2014, бул. № 29.
12. Aiello O. Investigation on the Susceptibility of Integrated Current Sensors to EMI / O.Aiello, F. Fiori. // EMC Compo. – 2009. – Р. 33-37.
13. CSA-1V Current Sensor. Preliminary Review. – Sentron AG. – 2008. – 6 p. – URL: <http://www.melexis.com/Asset/Datasheet-CSA-1V-DownloadLink-5313.aspx> (дата обращения: 05.08.2015).
14. Bilotti A. Monolithic Magnetic Hall Sensor ICs Using Dynamic Quadrature Offset Cancellation / A. Bilotti, G. Monreal, R. Vig // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1997. – Vol. 32. – № 6. – 9 p.
15. Magnetic Sensors. Line Guide. – Honeywell International Inc. – 2014. – 15 p. – URL: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-magnetic-sensor-line-guide-005894-16-en.pdf> (дата обращения: 05.08.2015).

Поступило в редакцию 11.08.2015

UDC621.317

## ENSURING ACCURACY CHARACTERISTICS OF CURRENT SENSORS WITH OPEN MAGNETIC CIRCUIT NEKOL'CEVYM

Semykina Irina Yu.,

Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor . E-mail: [siyu.eav@kuzstu.ru](mailto:siyu.eav@kuzstu.ru)

Grigoryev Aleksandr V.,

C. Sc. (Engineering), . E-mail: [grigav84@mail.ru](mailto:grigav84@mail.ru)

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Abstract:** The article describes the principle of creation of the isolated current sensors using the Hall effect with an open non-annular magnetic circuit to measure the current in the range up to 5000 A. The authors tell about research of the magnetic induction created by bus bar with rectangular cross section. The obtained results determine the design parameters of the sensors and are used when setting up and calibrating. The final part describes the laboratory experiments confirming the claimed accuracy characteristics of the isolated current sensors, and it provides information about their industrial testing and implementation.

**Keywords:** Current sensor, Hall Effect, magnetic induction, measurement accuracy.

### REFERENCES

1. Afonskij A.A., D'jakonov V.P. Izmeritel'nye pribory i massovye jeklektronnye izmerenija. – M.: SOLON-PRESS, 2007. – 541 s.
2. Roman M. Instrumentation and Measurement in Electrical Engineering. – USA: Brown Walker Press, 2011. – 244 p.
3. Datchiki toka, promyshlennoe ispolnenie. – TVELEM. – URL: <http://www.lem.com/ru/ru/content/view/478/882/> (data obrashhenija: 05.08.2015).
4. Current Sensors. Product Range Guide. – Honeywell International Inc. – 2010. – 12 p. – URL: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-current-range-guide-005918-3-en.pdf> (data obrashhenija: 05.08.2015).
5. Datchiki postojannogo i peremennogo toka. – NII Jelektromehaniki. – URL: [http://www.niem46.ru/current\\_sensors/](http://www.niem46.ru/current_sensors/) (data obrashhenija: 05.08.2015).
6. Bohnert K. A revolution in high dc current measurement / K. Bohnert, P. Guggenbach // ABB Review. – 2005. – № 1 – P. 6-10.
7. Foletto A. Analysis of a Hall-Effect System With Two Linear Sensor ICs for 30 mm Displacement / A. Foletto, A. Friedrich, S. Gupta. – Allegro MicroSystems, LLC. – 2013. 8 p. – URL: <http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Hall-Effect-System-With-Two-Linear-Sensor-ICs.aspx> (data obrashhenija: 05.08.2015).
8. Chekmarev A. Datchiki toka i naprjazhenija AVV – ot pechatnoj platy do preobrazovatelej-gigantov // Silovaja jeklektronika. – 2006. – № 9. – S. 56-57.
9. Tamura Open Loop Hall Effect Current Sensors. – Tamura Corporation of America. – 2009. – 20 p. – URL: <http://www.tamuracorp.com/uploads/currentsensor/OpenloopPDF.pdf> (data obrashhenija: 05.08.2015).
10. Babinet C. Next generation of current sensor for aeronautics: preliminary designs. – A Thesis for the Degree Master of Science in Mechanical Engineering. – Georgia Institute of Technology, 2008. – 116 p.
11. Datchik toka izolirovannyj: pat. 2531040 Ros. Federacija: MPK7 G01R19/00 / V.M. Zav'jalov, I.Ju. Semykina, A.V. Grigor'ev, D.E. Tatarinov, E.A. Merzljakova; patentobladatel' Federal'noe go-sudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Kuz-basskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet im. T.F. Gorbacheva". – 2013125419/28; zayavl. 31.05.2013; opubl. 20.10.2014, bjul. № 29.
12. Aiello O. Investigation on the Susceptibility of Integrated Current Sensors to EMI / O.Aiello, F. Fiori. // EMC Compo. – 2009. – P. 33-37.
13. CSA-1V Current Sensor. Preliminary Review. – Sentron AG. – 2008. – 6 p. – URL: <http://www.melexis.com/Asset/Datasheet-CSA-1V-DownloadLink-5313.aspx> (data obrashhenija: 05.08.2015).
14. Bilotti A. Monolithic Magnetic Hall Sensor ICs Using Dynamic Quadrature Offset Cancellation / A. Bi-lotti, G. Montreal, R. Vig // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1997. – Vol. 32. – № 6. – 9 p.
15. Magnetic Sensors. Line Guide. – Honeywell International Inc. – 2014. – 15 p. – URL: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-magnetic-sensor-line-guide-005894-16-en.pdf> (data obrashhe-nija: 05.08.2015).

Received: 11.08.2015