

Оптические датчики тока и напряжения

Ирина АБРАМЕНКОВА
abramenkova-i@mail.ru
Иван КОРНЕЕВ
Юрий ТРОИЦКИЙ
troickii_yurii@mail.ru

Рассмотрен класс магнитооптических и электрооптических датчиков тока и напряжения, обеспечивающих естественную гальваническую развязку высоковольтной и измерительной части при снижении массо-габаритных показателей, повышении безопасности их эксплуатации и снижении затрат при монтаже. Рассмотрены перспективы использования этих датчиков в металлургической и химической промышленности, а также в судостроении.

Н еослабевающий интерес к волоконно-оптическим датчикам тока, работа которых основана на эффекте Фарадея, и датчиков напряжения, основанных на использовании эффекта Поккельса [1], связан с высокими потенциальными возможностями этих устройств. К ним относятся:

- Широкий динамический диапазон измерений (токов до сотен кА, напряжения до сотен кВ).
- Высокая линейность.
- Широкий частотный диапазон, позволяющий анализировать гармоники напряжения и тока непосредственно в высоковольтной цепи.
- Отсутствие влияния нагрузки вторичных цепей и потерь в них.
- Высокая устойчивость оптоволоконных информационных каналов к внешним электромагнитным помехам.
- Меньшие массо-габаритные показатели.

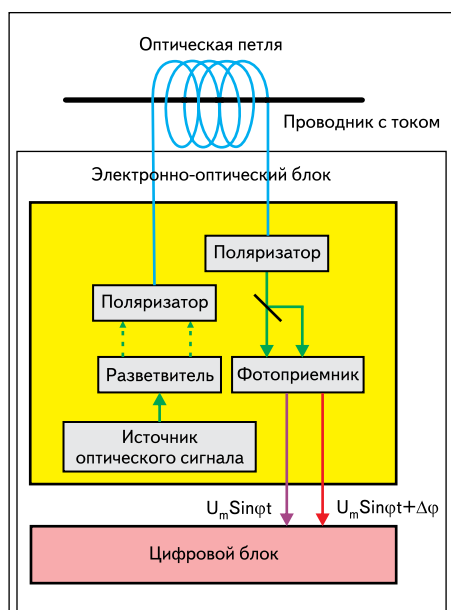


Рис. 1. Структурная схема оптоволоконного датчика тока с электронно-оптическим блоком

• Первичный оптический преобразователь может быть удален от блока электроники на 450–900 м и более.

Применение таких трансформаторов особенно эффективно в высоковольтных и средневольтных электрических сетях, что объясняется тем, что наиболее сложные вопросы обеспечения изоляции, особенно для высоковольтных приложений, решаются автоматически за счет физической природы преобразования, так как элементы оптики оптического волокна изначально являются диэлектриками. Соответственно, легко обеспечивается гальваническая развязка измерительной и высоковольтной цепи, повышается безопасность при эксплуатации данных приборов.

Работа оптического датчика тока

Работа оптического датчика тока основана на эффекте Фарадея, заключающемся в изменении поляризации светового потока под воздействием магнитного поля. Конкретная реализация датчиков, использующих этот эффект, может отличаться и патентуется фирмами-производителями.

Упрощенная структура электронно-оптической схемы датчика тока (рис. 1) содержит источник оптического сигнала. Этот сигнал с помощью разветвителя преобразуется в два право- и левополяризованных сигнала с противоположными направлениями вращения, которые поступают в оптическую петлю, выполненную из N витков оптоволоконка. Магнитное поле, создаваемое током I , протекающим по проводу, в соответствии с эффектом Фарадея замедляет один сигнал и ускоряет другой. Оба сигнала доходят до следующего кругового поляризатора, который преобразует их в линейно поляризованные световые потоки с плоскостями поляризации, сдвинутыми на угол:

$$\Delta\varphi = 4V \times N \times I, \quad (1)$$

где V — постоянная Верде.

Постоянная Верде — величина, характеризующая магнитное вращение плоскости поляризации в веществе. Ее значение зависит от свойств вещества, длины волны и монохроматичности излучения.

Пришедшие световые потоки преобразуются фотоприемником в два напряжения переменного тока с частотой $\omega = 2\pi C/\lambda$ (C — скорость света в оптоволоконке, λ — длина волны оптического излучения). Полученные электрические сигналы поступают на ввод аналого-цифрового преобразователя электронного блока, преобразующего угол $\Delta\varphi$ в цифру с дальнейшей обработкой в DSP-процессоре. Цифровой блок оснащен высокоуровневыми и низкоуровневыми аналоговыми интерфейсами и дополнительным цифровым интерфейсом, поддерживающим стандарт IEC 61850, что открыло пути к созданию полностью цифровой системы защиты и измерения.

Работа оптического датчика напряжения

Работа оптического датчика напряжения основана на эффекте Поккельса, заключающемся в возникновении двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля (рис. 2), что наблюдается у кристаллических пьезоэлектриков:

$$\Delta\varphi = \pi \times L \times K \times E/\lambda, \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля; L — толщина пластины; λ — длина волны; K — электро-оптические коэффициенты.

Эффект находится в прямо пропорциональной зависимости от величины приложенного электрического поля. Напряжение рассчитывается на основании измерения датчиками напряженности электрического поля в нескольких точках колонны.

Разработкой оптических датчиков напряжения и тока занимается целый ряд компаний, среди которых следует отметить канад-

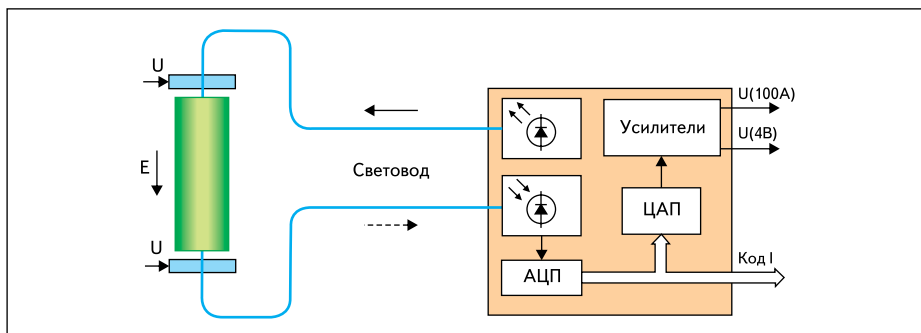


Рис. 2. Упрощенная структурная схема оптического датчика напряжения с электронно-оптическим блоком

Таблица 1. Сравнительные характеристики оптоволоконных датчиков тока различных компаний

Характеристика	NxtPhase	PowerSense	OptiSense	FieldMetrics	ABB	Airak	ООО «УВП»
Номин. ток, кА	0,1–100	5–20	0,003–1	0,6–20	1–3,5	0,003–30	1–450
Класс точности, %	0,25	2	0,2	0,2	0,2	1	0,25
Рабочая частота, Гц	50/60	50/60	–	50/60	50/60	50/60	0–6000
Частотная полоса, Гц	0,01–6000	–	–	до 5000	0–10 000	5–5000	0–9000
Номин. напряжение, кВ	69–765	36	15, 20, 35	11–36	72,5–800	3,6–36	110–750
Масса, кг	49–95	–	9	5–15	50–186	0,028–0,57	от 40
Диапазон рабочих температур, °С	–50...+60	–40...+50	–40...+75	–50...+85	–5...+40	–40...+85	–50...+60

Таблица 2. Сравнительные характеристики оптических датчиков напряжения различных компаний

Характеристика	NxtPhase	OptiSense	FieldMetrics	ABB	Airak	ООО «УВП»
Номин. напряжение, кВ	121–550	35	138	115–550	0,003–5	110
Класс точности, %	0,2/3	0,2	0,3	0,2	1 (5)	0,1
Рабочая частота, Гц	10/3000	–	–	–	50/60	–
Частотная полоса, Гц	0,1–6000	–	5–5000	–	6–5000	–
Масса, кг	132–650	2,5	68	50–186	0,17	98
Диапазон рабочих температур, °С	–40...+50	–40...+50	–40...+70	–5...+40	0...+50	–50...+60

скую компанию NxtPhase T&D Corporation, шведскую фирму PowerSense, американские фирмы OptiSense Network, Inc., ABB, Inc., Airak, Inc., FieldMetrics, Inc. (FMI).

Интерес к разработкам, исследованиям и внедрению этих датчиков проявляется и в России. Впервые в нашей стране оптические преобразователи были продемонстрированы компанией «Пролайн» [2], являющейся эксклюзивным представителем компании NxtPhase T&D Corporation, на выставке «Электрические сети России» в ноябре 2006 года. Уже в 2007 г. установлены и введены в эксплуатацию комбинированные оптические системы NXVCT-220 на подстанции 220 кВ ОАО «РЖД». В апреле 2008 г. с применением оптического трансформатора NXCT-F3 в Сургуте создан опытный полигон для подтверждения его эксплуатационных и метрологических характеристик. В декабре 2008 г. ОАО «ТГК1» с применением оптического трансформатора NXCT-F3 введена точка коммерческого учета.

В 2006 г. в России создана компания ООО «Уникальные волоконные приборы» [3], занимающаяся разработкой и изготовлением отечественных оптоволоконных трансформаторов тока и напряжения, которые, судя по публикуемым техническим характеристикам, не уступают лучшим зарубежным образцам.

Датчики компании NxtPhase T&D Corporation [4] достаточно хорошо известны отечественным специалистам в области автомати-

зации систем контроля и защиты электрических сетей высокого напряжения. Вместе с тем следует сказать, что огромные возможности открывают оптические датчики для средневольтных (MV) и низковольтных (LV) цепей. Малые габариты и вес этих датчиков позволяют разместить измерительный комплекс на их основе на опоре линии электропередачи или подвесить к проводам. В ряде случаев эти датчики выгодно использовать и в сетях низ-

кого напряжения, получая выигрыш по надежности и массо-габаритным показателям.

Некоторые обобщенные сравнительные характеристики оптических датчиков различных компаний приведены в таблицах 1, 2.

Естественно, что в таблицах даются некоторые обобщенные параметры продукции, выпускаемой той или иной компанией, без указания особенностей конкретных марок изделий.

Рассмотрим несколько подробнее некоторые характерные особенности оптических датчиков каждой компании и, соответственно, области их применения.

Компания NxtPhase T&D Corporation выпускает:

- высоковольтные измерительные оптические преобразователи тока NXCT для измерения тока до 4 кА с классом точности 0,5 в сетях 60–750 кВ;
 - высоковольтные измерительные оптические преобразователи напряжения NXVT для измерения напряжения в диапазоне 138–500 кВ с классом точности 0,25;
 - высоковольтные измерительные оптические преобразователи тока и напряжения, совмещенные NXVCT для измерения тока в диапазоне до 4 кА и напряжения до 500 кВ с классом точности 0,25;
 - измерительные оптические преобразователи, трансформируемые NXCT-F3, предназначенные для измерения токов до 100 кА в цепях переменного тока и до 600 кА в цепях постоянного тока, что дает возможность их использования в металлургической и химической промышленности.
- Компания FieldMetrics, Inc. [5] основана в 2001 г. и специализируется на разработке и производстве трех линеек оптоволоконных датчиков для средневольтных (11–36 кВ) энергетических сетей переменного тока: MetPod, Fiber MetPod, MetPod Lite класса 0,2. В линейку MetPod входят комбинированные датчики тока и напряжения (рис. 3а), которые могут крепиться непосредственно



Рис. 3. а) Комбинированный модуль MetPod; б) датчик тока MetPod Lite

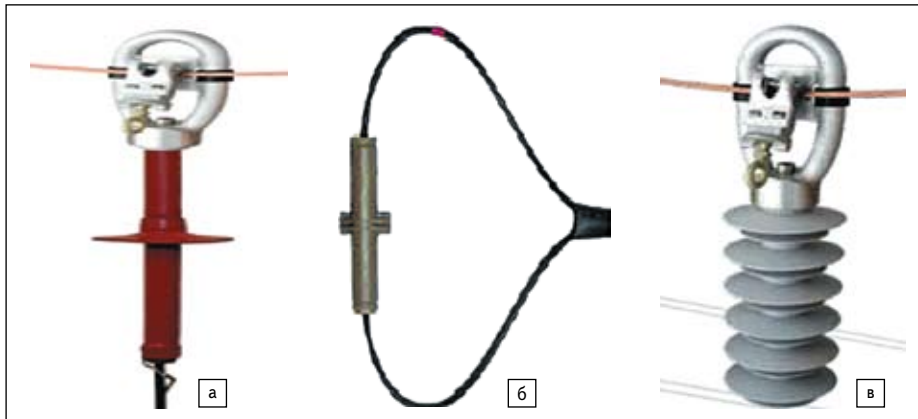


Рис. 4. Датчики фирмы PowerSense: а) тока; б) напряжения; в) комбинированные (тока/напряжения)

на опоре. Электронный блок с автономным блоком питания выполнен в единой конструкции с датчиками. Связь с пунктом сбора и обработки информации осуществляется по радиоканалу мощностью до 1 Вт.

Fiber MetPod предусматривает интегрированное исполнение датчика тока, датчика напряжения и электронного преобразователя оптических сигналов в цифровой код, размещаемых в легком прочном корпусе. Непосредственно на корпусе монтируется радиопередатчик, обеспечивающий беспроводную связь с диспетчерским пунктом.

MetPod Lite — датчик тока класса 0,3, облегченной конструкции, крепится на изолированной штанге, подключаемой между активным проводом и нейтралью (рис. 3б). Датчики имеют более низкую стоимость по сравнению с MetPod.

Помимо оборудования для контроля параметров средневольтовых сетей, фирма активно разрабатывает и внедряет датчики класса 0,3 для высоковольтных приложений. В основе этих датчиков лежит модульный принцип построения, состоящий в использовании опорных модулей на 15 кВ, из которых можно набирать датчики для сетей до 750 кВ.

Компания PowerSense A/S [6], основанная в 2006 году, предложила потребителям линейку энергоизмерительного оборудования Discos, в которую вошли оптоволоконные датчики тока (рис. 4а), напряжения (рис. 4б) и комбинированные датчики тока/напряжения (рис. 4в), предназначенные для работы в сетях до 36 кВ. Диапазон измерения токов — от 5 А до 20 кА с погрешностью 2%, погрешность измерения напряжения — 1%. Сами датчики крепятся на штанге и оптоволоконным соединением с оптическим модулем, размещаемым на опоре.

Компания Optisense Network, основанная в 2001 г., специализируется на производстве высокоточных компактных датчиков тока и напряжения, используемых в сетях с напряжением до 35 кВ.

Компания Airak, Inc. [7] выпускает оптоволоконные датчики, отличающиеся наименьшими массо-габаритными показателями.

Оптоволоконные датчики напряжения этой фирмы вместе с пятиметровыми выводами весят всего 170 г (рис. 5а). Датчик напряжения размещен на специальной платформе, расположенной на опоре. Стандартный диапазон измерения напряжения — 5 кВ (со сменой ячейки Поккельса диапазон может быть расширен до 13,8 кВ). Максимальная приведенная погрешность составляет 5%, типовая — 1%.

Судя по приведенным данным, недостатками датчика являются низкая точность измерения и малый диапазон измеряемых напряжений. Существенным недостатком для его применения в российских условиях является также температурный диапазон — 0...50 °С.

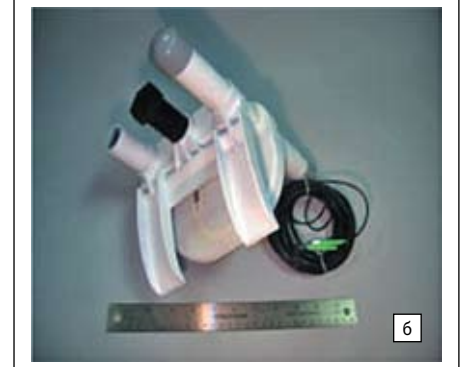
Лучшими показателями обладают датчики тока этой фирмы. Токовый датчик для воздушных линий (рис. 5б) позволяет измерять токи в диапазоне от 3 А до 1 кА (возможны версии до 15 кА) с погрешностью, не превышающей 1%. Он работает в диапазоне температур -40...+85 °С. Вес этих датчиков не превышает 570 г, что позволяет легко смонтировать их прямо на проводах, не прибегая к разъединению линии (рис. 6).

Компактность и малый вес последнего датчика привлекает внимание разработчиков систем контроля и управления энергетическими системами на наземном, морском и воздушном транспорте. В США в рамках программы по модернизации морского флота разрабатываются так называемые «полностью электрические» (all-electric) корабли [8]. Первое такое судно должно быть сдано в эксплуатацию в 2011 г. Для обеспечения мониторинга и управления всеми системами корабля требуется около 10000 электрических датчиков. Такую задачу невозможно решить с использованием традиционных датчиков, включая датчики Холла. В связи с этим на фирме Airak, Inc. специально для этих целей были разработаны сверхминиатюрные оптоволоконные датчики тока и напряжения с погрешностью измерения 1%.

Представляет интерес датчик, предназначенный для измерения тока и напряженности магнитного поля при применении в стационарном оборудовании (рис. 7). Датчик имеет



а



б

Рис. 5. а) оптоволоконный датчик напряжения фирмы Airak, Inc.; б) токовый датчик для воздушных линий



Рис. 6. Размещение датчиков фирмы Airak, Inc. на воздушной линии электропередачи

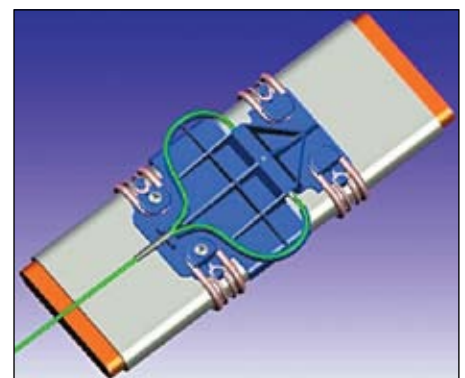


Рис. 7. Датчик тока и напряженности магнитного поля для применения в стационарном оборудовании

вес 28 г и устанавливается на шину 4"×3/4". Токи измеряются в диапазоне от 3 А до 3 кА с погрешностью не более 1%.

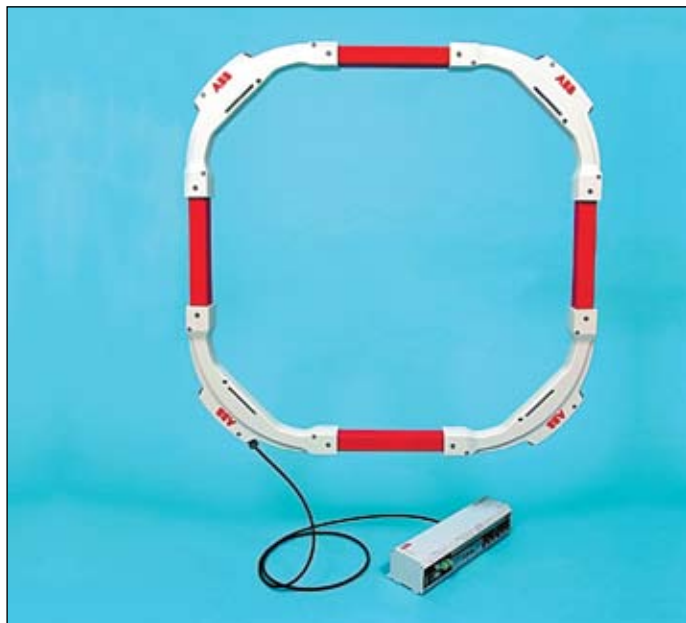


Рис. 8. Оптоволоконный датчик тока FOCS компании ABB, Inc.

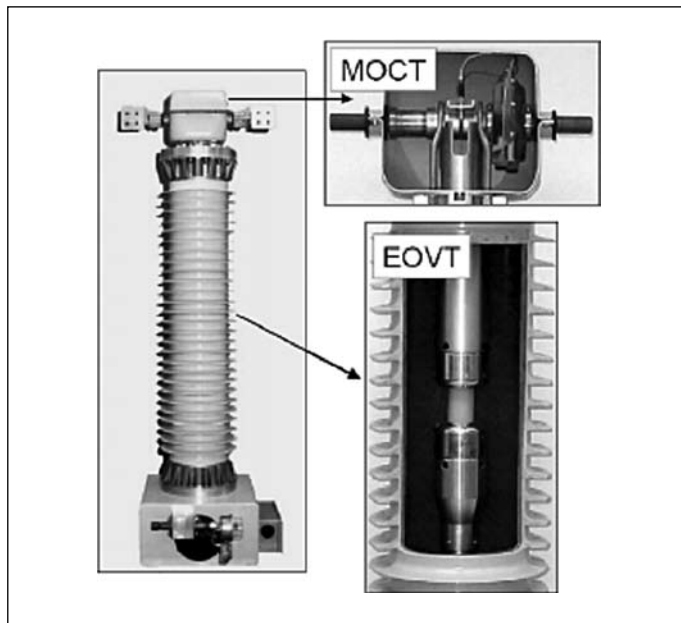


Рис. 10. Датчик напряжения компании ABB, Inc. на базе МОСТ и EOVT

Компания ABB, Inc. [9] известна, прежде всего, по токовым датчикам, используемым в цепях постоянного тока, основанным на эффекте Холла [10]. Преобразователи такого типа хотя и надежны, но очень сложны, а их вес может достигать 2000 кг. При их установке также необходимы сложные процедуры настройки для исключения влияния асимметричного поля и перекрестных наводок с расположенных рядом шин. Для решения этих и других проблем компания ABB разработала новый оптоволоконный датчик тока (Fiber Optic Current Sensor, FOCS) (рис. 8) [11]. По сравнению с датчиками Холла новые датчики имеют следующие преимущества:

- Продолжительность установки и ввода в эксплуатацию измеряется часами, а не днями.
- Резко снижается сложность системы.
- Устройства не подвержены воздействию магнитных полей сложных конфигураций и перекрестным наводкам от соседних шин.
- Повышается точность (до 10-кратного уменьшения погрешности).
- Широкая полоса пропускания обеспечивает быструю реакцию на пульсации и нестабильные токи.
- Датчики обеспечивают измерение постоянных токов как в одном, так и в двух направлениях.

Датчик позволяет измерять токи от 0 до ± 500 кА с погрешностью 0,1% в диапазоне частот от 0 до 4 кГц. Вес одной секции — 5 кг.

Применение таких датчиков в металлургической и химической промышленности может существенно повысить эффективность производства и дать значительный экономический эффект. В производстве алюминия, меди, марганца, цинка, стали и хлора требуются огромные объемы электроэнергии.

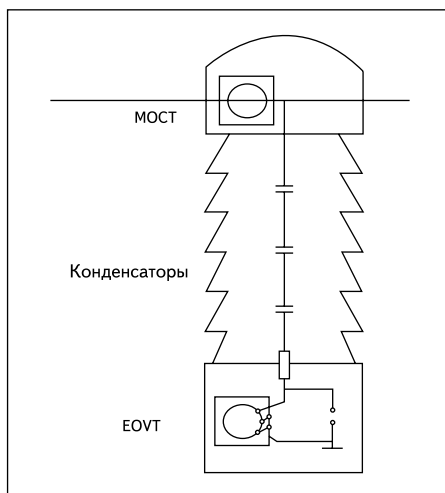


Рис. 9. Эквивалентная схема измерения напряжения с помощью датчика тока

Электролизные ванны для производства алюминия обычно питаются постоянным напряжением 1000 В и потребляют ток до нескольких сот килоампер. Необходимо учесть, что ошибка на 0,1% в измерении тока 500 кА приводит к ошибке учета мощности на 0,5 МВт.

Компания ABB, Inc. считается одним из лидеров в разработке и оптоволоконных датчиков для высоковольтных электроэнергетических приложений. Магнитооптические датчики тока (Magneto-Optic Current Transformer, МОСТ) этой компании (рис. 7) могут использоваться в сетях с напряжением от 72,5 до 800 кВ для измерения токов до 3,5 кА.

Оптоволоконные датчики напряжения обычно имеют более сложную конструкцию. В связи с этим компания ABB для измерения напряжения предложила проводить измерение тока через нагрузку с известным значением сопротивления, подключенную после-

довательно с датчиком МОСТ (рис. 9) [12]. Физически указанная нагрузка реализована с помощью электрооптического трансформатора напряжения EOVT (рис. 10) [13].

Как следует из предложенного обзора, класс оптических датчиков тока и напряжения может занять существенное место в системах мониторинга, контроля и управления в энергетике, металлургической, химической, судостроительной и оборонной промышленности. ■

Литература

1. Окси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Власов М., Сердцев А. Оптические трансформаторы: первый опыт // Энергоэксперт. 2007. № 1.
3. www.ufdgroup.ru
4. www.nxtphase.com
5. www.fieldmetricsinc.com
6. www.sensethepower.com
7. www.airak.com
8. Duncan P., Mastro S. Fiber Optic current und potential sensors for naval shipboard use // A publication of the National Electronics Manufacturing Center of Excellence. April 2005.
9. www.abb.com
10. Чекмарев А. Датчики тока и напряжения ABB. От печатной платы до преобразователей-гигантов // Силовая электроника. 2006. № 3.
11. Бонерт К., Гугенбах П. Новый оптоволоконный датчик FOCS от ABB для электрохимических производств // ABB Ревю. 2005. № 1.
12. Performance Assessment of Advanced Digital Measurement and Protection Systems. PSERC Publication 06–23. August 2006.
13. Bohnert K., Gabus P., Brändle H. Fiber-Optic Current and Voltage Sensors for High-Voltage Substations // Invited paper at 16th International Conference on Optical Fiber Sensors. October 13–17, 2003, Nara Japan Technical Digest.