

## Комбинированный волоконно-оптический трансформатор напряжения и тока для цифровых измерительных систем

СОКОЛОВСКИЙ А.А., ОТЧЕРЦОВ А.В., МОИСЕЕВ В.В., РУДАКОВ О.В., КУРОВИЧ П.Н.

Приводятся результаты разработки комбинированного оптоэлектронного трансформатора тока и напряжения (КТТН), выполненного на одной изоляционной колонне. Отличительной особенностью разработанного устройства, применяемого для систем учета электроэнергии, является синхронизация измерений в каналах тока и напряжения импульсом, передаваемым по системе оптического питания. Предлагаемая конструкция позволяет снизить стоимость измерительной системы, упростить ее монтаж и обслуживание. Разработанный КТТН обеспечивает измерение напряжения с классом точности 0,2, тока с классом точности 0,2S, выдачу измерительной информации по протоколу МЭК 61850 – 9,2LE, отличается компактными размерами и может найти применение при построении цифровых подстанций напряжения 110 кВ.

Ключевые слова: учет электроэнергии, оптоэлектронный трансформатор тока и напряжения, одноколонная конструкция, цифровая подстанция

Для систем учета электроэнергии перспективным техническим решением представляется выполнение трансформатора тока (ТТ) и напряжения (ТН) на одной изоляционной колонне, что позволяет снизить стоимость измерительной системы, упростить ее монтаж и обслуживание [1]. Комбинированные ТТ и ТН (КТТН) могут быть реализованы на основе оптических трансформаторов тока и напряжения [2, 3], а также на базе гибридных, т.е. питаемых с помощью оптического излучения, систем, использующих традиционные трансформаторы тока низкого класса напряжения (0,66 кВ) и емкостные делители напряжения [4–5].

Основные недостатки комбинированных оптических ТТ/ТН наряду с высокой стоимостью состоят в том, что формирование и обработка сигналов от первичных преобразователей тока и напряжения происходят с различными задержками, что приводит к необходимости применения сложных алгоритмов коррекции фазовой погрешности для удовлетворения требованиям класса 0,2S. Недостаток КТТН [6] – высокая оптическая мощность (2 Вт) для питания электронной схемы при отсутствии измеряемого напряжения и питание от делителя напряжения, с которого снимается также и измерительный сигнал. Такая схема построения КТТН требует высоковольтного конденсатора значительной емкости, чтобы ток емкостного делителя напряжения значительно превышал требуемый ток питания электронной схемы. Практическая реализация такой конструкции сопряжена со значительными техническими проблемами.

Цель настоящей статьи – разработка опытного образца одноколонного комбинированного трансформатора тока/напряжения (КТТН) класса 110 кВ

с питанием измерительного электронного блока, находящегося под высоким потенциалом, оптическим излучением малой (до 100 мВт) мощности. При этом диапазон измеряемых токов определяется типом используемого трансформатора тока класса напряжения 0,66 кВ и класса точности 0,2S и составляет 100–5000 А [7].

Основное внимание в процессе разработки было уделено следующим вопросам:

обеспечению метрологических параметров по классу 0,2S (ток) и 0,2 (напряжение) при минимальном фазовом рассогласовании между измеряемыми током и напряжением;

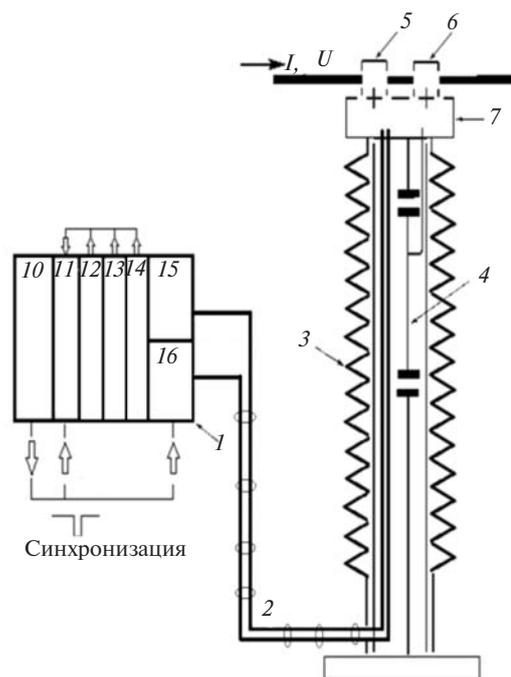


Рис. 1. Схематическое устройство опытного образца КТТН

обеспечению максимального ресурса работы за счет снижения оптической мощности, необходимой для питания электронной схемы КТТН;

связи КТТН с устройствами учета и защиты по протоколу МЭК 61850.

Комбинированный трансформатор тока и напряжения (рис. 1) содержит базовый блок 1, устанавливаемый в операторской зоне и соединенный дуплексным волоконным кабелем 2 с измерительным модулем 7, установленным на высоковольтном фланце высоковольтной колонны 3. Внутри колонны помещен емкостный (или резистивный) делитель 4, в котором нижний вывод высоковольтного конденсатора (500–2000 пФ) заземлен, а верхний вывод измерительного конденсатора (20–80 мкФ для измеряемого напряжения 110 кВ) подключен к измеряемому потенциалу. Волоконный кабель, применяемый в устройстве, содержит (для трехфазной реализации устройства) восемь жил стандартного связного оптического волокна типоразмера 62,5/125 мкм.

В опытном образце КТТН высоковольтное плечо делителя выполнено на основе четырех соединенных последовательно конденсаторов К75-74, каждый из которых имеет номинал 4700 пФ и рабочее напряжение 50 кВ. Низковольтное плечо делителя изготовлено из десяти соединенных параллельно конденсаторов К73-17 номиналом 4,7 мкФ. Коэффициент деления (с учетом погрешностей номинальной емкости) равен 40000.

В дальнейшем предполагается использование емкостного делителя производства СКЗ КВАР, обеспечивающего стабильность коэффициента деления не хуже 0,15% в рабочем диапазоне температур ( $\pm 60^\circ\text{C}$ ).

На высоковольтном фланце изоляционной колонны установлены первичные преобразователи тока 5 и 6 для измерения и защиты, через которые проходит высоковольтная токонесущая шина. В качестве первичного преобразователя для измерения тока применен токовый трансформатор класса 0,2S, его магнитопровод выполнен из аморфного

сплава. Как показано в [8], такие трансформаторы сохраняют высокие метрологические характеристики даже при намагничивании сердечника токами короткого замыкания. Для измерения тока в системе защиты может быть применен трансформатор в виде катушки Роговского [8, 10].

Базовый блок содержит блок синхронизации 10, цифровой модуль МЭК 61850-9-2LE 11, модуль декодирования и нормировки измерительной информации о напряжении 12, модуль декодирования и нормировки токовой измерительной информации 13, модуль декодирования и нормировки токовой защитной информации 14, трехканальный блок фотоприемников 15, трехканальный блок драйверов лазеров 16 для питания и синхронизации измерительных модулей. Выход блока синхронизации 10 соединен со входом драйвера лазера питания 16 и входом синхронизации цифрового модуля МЭК 61850-9-2 11. В каждом из модулей декодирования (12, 13, 14) декодированный измерительный сигнал умножается на масштабный коэффициент первичного преобразователя так, что на вход модуля МЭК 61850-9-2LE поступает цифровой код действительного значения измеренной величины.

Структурная схема измерительного модуля (ИМ), показанная на рис. 2, содержит входной световод 1, подключенный к фотовольтаическому преобразователю 2, который преобразует входную оптическую мощность в электрическую напряжением 1,2 В. Выход преобразователя подключен к повышающему преобразователю напряжения 3 для питания всех элементов измерительного модуля и блоку выделения синхроимпульса 4, выход которого соединен с входом запуска всех АЦП 5, 6, 7, входящих в состав измерительного модуля. Блок выделения синхроимпульсов 4 из провалов напряжения на выходе преобразователя 2 формирует импульсы запуска всех аналого-цифровых преобразователей, имеющих в измерительном модуле. Запуск АЦП осуществляется фронтом импульса синхронизации (длительность 0,2 мкс).

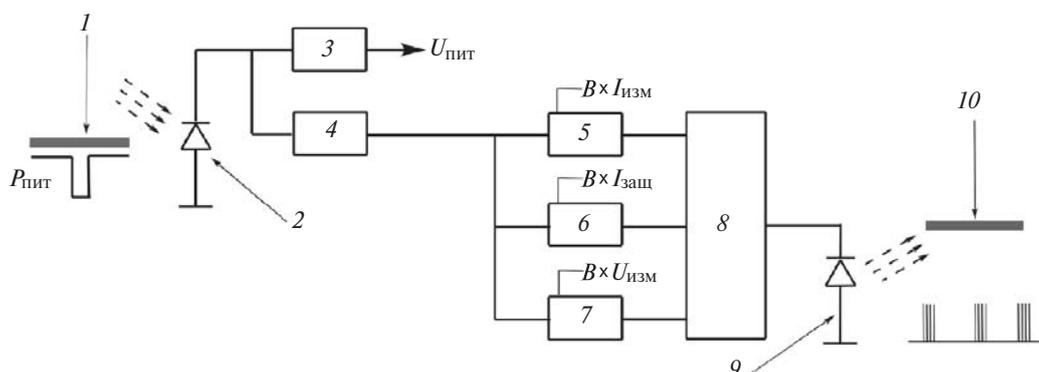


Рис. 2. Структурная схема измерительного модуля

Таким образом, измерения тока и напряжения выполняются одновременно (с точностью до 0,2 мкс), обрабатываются одними электронными компонентами и передаются по одному тракту, вследствие чего все аппаратные задержки по каналам измерения тока и напряжения одинаковы. Это позволяет реализовать измерения с минимальными фазовыми погрешностями между током и напряжением, что обуславливает высокую точность измерения мощности.

На входы АЦП поданы напряжения, пропорциональные (с известным коэффициентом пропорциональности) значениям тока для измерения, тока для защиты, измеряемого напряжения (с выхода емкостного делителя), причем виртуальной «землей» для всех измеряемых сигналов является высоковольтный потенциал. Выходы всех АЦП подключены к цифровому блоку 8, в котором информация кодируется в виде, приемлемом для передачи с помощью излучателя 9 по волокну 10 в блок обработки. Время преобразования и формирования пакета данных АЦП, используемых в ИМ, не превышает 2 мкс, что позволяет реализовать класс точности  $0,2(U)$  и  $0,2S(I)$  без применения каких-либо методов фазовой коррекции. Для работы ИМ в широком температурном диапазоне ( $\pm 60^\circ\text{C}$ ) применяется схема стабилизации пиковой мощности передающего лазера 9 (1300 нм, пороговый ток при  $25^\circ\text{C}$  не более 7 мА), которая обеспечивает изменение его мощности в указанном температурном диапазоне не более чем в 2 раза. Оптимизация схемотехники и алгоритма работы ИМ позволила уменьшить потребляемую модулем электрическую мощность до 10–12 мВт, что повысило надежность его работы.

Некоторые характеристики разработанных и применяемых в ИМ фотовольтаических преобразователей на основе гетероструктур AlGaAs-GaAs приведены на рис. 3.

Преобразователь питается оптическим излучением от лазера с длиной волны 808 нм и номинальной выходной мощностью 1 Вт в стандартном многомодовом волокне 62,5/125 мкм. Для увеличения ресурса работы устройства в рабочем режиме выходная мощность лазера не превышает 150 мВт, а ток накачки в 2–2,5 раза меньше номинального. Учитывая, что ресурс работы лазера при номинальном токе питания превышает  $10^5$  ч, в рабочем режиме ожидаемый ресурс работы лазера, рассчитанный по методике в [11], составит более  $2 \cdot 10^6$  ч.

В базовом блоке 1 блок синхронизации 10 вырабатывает последовательность коротких (0,5–2 мкс) импульсов с частотой повторения 64 кГц. Выбор такой частоты делает возможной выдачу потребителям цифровой информации по стандарту МЭК 61850-9-2-LE в формате как 256, так и 80 выборок

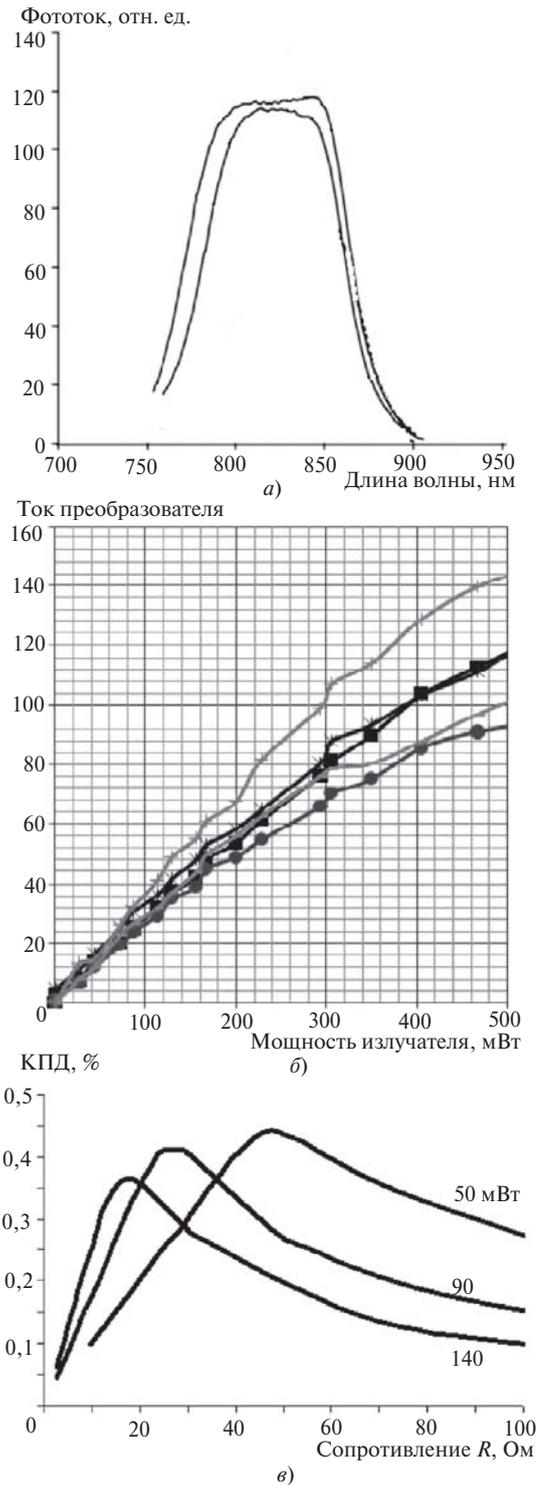


Рис. 3. Типичные характеристики применяемых фотовольтаических преобразователей: а – область спектральной чувствительности (показан диапазон разброса); б – зависимость тока короткого замыкания от входной оптической мощности; в – зависимость КПД от сопротивления нагрузки при трех значениях оптической мощности

на период. Синхроимпульсы поступают на драйвер лазера питания 1б, где на время своего действия прерывают излучение лазера, обеспечивающего питание измерительного модуля 7. Одновременно синхроимпульсы поступают на модуль МЭК

61850-9-2, где осуществляется временная «привязка» поступающих пакетов измерительной информации и формирование выходного пакета данных для потребителей и исполнительных устройств. В составе измерительного модуля может быть два АЦП (5 – ток, 7 – напряжение) для систем учета электроэнергии или (5 – ток измерительный, 6 – ток защитный) для применения в системах измерения тока и токовой защиты. В общем случае таких АЦП три, и КТТН позволяет решать задачи измерения параметров электрической энергии для систем учета, а также выдачи цифровой информации о токе и напряжении для систем защиты.

В зависимости от конфигурации системы вся выходная информация может передаваться как в одной, так и в разных посылках. Пришедшая по оптическому волокну информация с измерительного модуля поступает на фотоприемник оптического модуля 15 (рис. 1), с выхода которого в зависимости от кода, содержащегося в данном пакете посылки, поступает на вход одного из модулей 12, 13, 14 (рис. 1). В этих однотипных модулях сигнал декодируется и умножается на масштабный коэффициент в соответствии с передаточными характеристиками первичных преобразователей 4, 5, 6 (рис. 1). Выходные сигналы модулей 12, 13, 14, являющиеся цифровым кодом измеренных значений токов и напряжений, поступают в модуль 11 (61850), откуда по стандартному протоколу передаются потребителям.

Следует отметить, что модули 12–16 выполнены трехканальными для измерения электрических параметров сразу по трем фазам, причем в каждом канале имеются ЦАП для контроля сигналов в аналоговой форме и подключения измерительных усилителей, обеспечивающих стандартное выходное напряжение  $100/\sqrt{3}$  на нагрузке до 10 В<sub>A</sub> и стандартный выходной ток 1 А. Метрологические характеристики КТТН с использованием измерительных усилителей определялись по стандартным поверочным схемам отдельно для тока и напряжения с прибором сравнения КНТ-05, образцовым делителем напряжения ПВЕ-110, образцовым трансформатором тока ТТИ-5000.5 и источником тока РИТ-500. В качестве источника высокого напряжения использовался трансформатор ИОГ-100. Измерения показали, что работа экранированного измерительного модуля, находящегося под высоким потенциалом, не сопровождается дополнительными погрешностями, а амплитудная и фазовая точность измерений КТТН не выходит за пределы, соответствующие классу точности 0,2 по напряжению и 0,2S по току. Выходной оптический сигнал с модуля МЭК 61850 -9-2 через Ethernet медиаконвертор поступает на сетевой вход RJ-45 компьютера, где обрабатывается программой



Рис. 4. Изоляционная колонна с высоковольтным делителем, трансформатором тока и измерительным модулем

Omicron SVS count, восстановленные измеренные сигналы тока и напряжения индицируются на мониторе.

Разработанный КТТН (изоляция колонна показана на рис. 4) отличается компактными размерами и может найти применение при построении цифровых подстанций напряжения 110 кВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт организации ОАО ФСК ЕЭС СТО 56947007-29.180.080-2011. Типовые технические требования к комбинированным трансформаторам тока и напряжения 110 и 220 кВ, 2011.
2. Sunan Luo, Miaoquan Ye, Yong Zhu, Ying Cui, Yan Xu, Kaicheng Li, Chaolong Ou, Zhiping Chen. 220-kV combined optical voltage and current transformer. – Proc. SPIE 3897, Advanced Photonic Sensors and Applications, 728 (November 11, 1999).
3. Blake J.N. Combination fiber optic current/voltage sensor, US pat. 6,166,816, Dec. 2000.
4. Шульга Р.Н., Змиева К.А., Должикова Е.Ю., Тимофеев Е.М. Измерение токов и напряжений на высоком потенциале с помощью цифровых датчиков. – Электричество, 2012, № 12, с. 13–17.
5. Патент на полезную модель №100284. Устройство измерения и обработки электрических величин в цепях с полной гальванической развязкой/С.И. Марценюк, 10.12.2010.
6. Патент на полезную модель №130132. Устройство для измерения токов, напряжений и передачи данных по цифровому каналу связи/Ю.Б. Лебедев, В.Э. Михеев, В.Н. Бугреев, 10.07.2013.
7. <http://www.czt.ru/transformatorka.html>
8. Раскулов Р. Погрешности трансформаторов тока, влияние токов короткого замыкания. – Новости электротехники, 2005, № 2.
9. Кождович Л.А., Бишоп М.Т. Современная релейная защита на базе катушек Роговского. – 2-я МНТК «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматизации энергосистем» (Москва 7–10 сентября 2009 г.), с. 39–48.
10. <http://www.algodue.ru/supporto/MFC150.pdf>
11. [http://www.jdsu.com/productliterature/cllfw03\\_wp\\_cl\\_ae\\_010506.pdf](http://www.jdsu.com/productliterature/cllfw03_wp_cl_ae_010506.pdf)

*Авторы:* **Соколовский Александр Алексеевич**, окончил физико-технический факультет Харьковского Государственного университета в 1970 г. Докторскую диссертацию защитил в 2009 г. Ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, начальник отдела разработки ЗАО «Профотек».

**Моисеев Владимир Викторович** окончил Рязанский радиотехнический институт в 1976 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1989 г. Ведущий инженер ЗАО «Профотек».

**Отчерцов Андрей Владимирович** окончил Московский энергетический институт в 1984 г. Ведущий инженер Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и ЗАО «Профотек».

**Рудаков Олег Вячеславович** окончил Московский государственный институт электроники и математики в 1995 г. Генеральный директор ЗАО «Профотек».

**Курович Петр Николаевич** окончил факультет специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1997 г. Технический директор ЗАО «Профотек».

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 12, pp. 26–30.*

## A Combined Fiber-Optic Voltage and Current Transformer for Digital Electric Energy Accounting Systems

**SOKOLOV Aleksandr Alekseyevich** (*V.A. Kotel'nikov Institute of Radiotechnics and Electronics (IRE) of the Russian Academy of Sciences (РАН), JSC «Profotek», Moscow, Russia*) – *Leading Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

**OTCHERTSOV Andrei Vladimirovich** (*V.A. Kotel'nikov IRE of the РАН, JSC «Profotek», Moscow, Russia*) – *Leading Engineer*

**MOISEYEV Vladimir Viktorovich** (*JSC «Profotek», Moscow, Russia*) – *Leading Engineer, Cand. Sci. (Eng.)*

**RUDAKOV Oleg Vyacheslavovich** (*JSC «Profotek», Moscow, Russia*) – *General Director*

**KUROVICH Peter Nikolayevich** (*JSC «Profotek», Moscow, Russia*) – *Technical Director*

*The article presents the results from development of a combined optoelectronic current and voltage transformer (CCVT) mounted on a common insulation column. A distinguishing feature of the developed device, which is used for electric energy accounting systems, is that the measurements carried out in the current and voltage channels are synchronized by an impulse transmitted via an optical power supply system. By using the proposed CCVT design it becomes possible to decrease the measurement system cost and to simplify its assembling and maintenance [1]. The developed CCVT makes it possible to measure voltage and current in compliance with accuracy classes 0,2 and 0,2S, respectively, and to produce the measurement information according to the IEC 61850–9.2LE protocol; the device has compact sizes and can find use in designing digital substations for the 110 kV voltage rating.*

*Key words:* electric energy accounting, optoelectronic current and voltage transformer, single-column design, digital substation

### REFERENCES

1. **Standart organizatsii OFO «FSK EES» STO 56947007-29.180.080-2011.** *Tipovye tekhnicheskiye trebovaniya k kombinirovannym transformatoram toka i napryazheniya 110 i 220 kV* (Standard organization JSC «Federal Grid Company of Unified Energy System» STO 56947007-29.180.080-2011. Typical technical requirements combined current and voltage 110 and 220 kV transformers, 2011).
2. **Sunan Luo, Miaoyuan Ye, Yong Zhu, Ying Cui, Yan Xu, Kaicheng Li, Chaolong Ou, Zhiping Chen.** 220-kV combined optical voltage and current transformer. *Proc. SPIE 3897, Advanced Photonic Sensors and Applications*, 728 (November 11, 1999).
3. **Blake J.N.** Combination fiber optic current/voltage sensor, US pat. 6,166,816, Dec. 2000.
4. **Shul'ga R.N., Zmiyeva K.A., Dolzhikova E.Yu., Timofeyev E.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 12, pp. 13–17.
5. **Patent na poleznuyu model' No. 100284.** *Ustroistvo izmereniya i obrabotki elektricheskikh velichin v tsepyakh s polnoi gal'vanicheskoi razvyazkoi* (Useful Model Patent No. 100284. A device for measuring and processing electric quantities in fully galvanically isolated circuits)/S.I. Martsenyuk, 10.12.2010.
6. **Patent na poleznuyu model' No. 130132.** *Ustroistvo dlya izmereniya tokov, napryazhenii i peredachi dannykh po tsifrovomu kanalu svyazi* (Useful Model Patent No. 130132. A device for measuring currents and voltages and for transmitting data via a digital communication channel)/Yu.B. Lebedev, V.E. Mikheyev, V.N. Bugreyev, 10.07.2013.
7. [http://www.czt.ru/transformator\\_toka.html](http://www.czt.ru/transformator_toka.html)
8. **Raskulov R.** *Novosti elektrotekhniki – in Russ. (Electrical Engineering news)*, 2005, No. 2, pp.
9. **Kodzhovich L.A., Bishop M.T.** 2-MNTK «Sovremennye napravleniya razvitiya system releinoi zashchity i avtomatiki energosistem» (Proc. of 2-nd Intern. Scientific and Technical Conf. «Modern trends of development of systems of relay protection and automation of power systems»). Moscow, 7–10 September 2009, pp. 39–48.
10. <http://www.algodue.ru/supporto/MFC150.pdf>
11. [http://www.jdsu.com/productliterature/cllfw03\\_wp\\_cl\\_ae\\_010506.pdf](http://www.jdsu.com/productliterature/cllfw03_wp_cl_ae_010506.pdf)