

УДК 681.2

## ТЕПЛОСЧЁТЧИК ДЛЯ АСКУЭ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ В АСУ ТП ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

©2011 В. В. Бирюк, Г. И. Леонович, Н. А. Ливочкина

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Промышленные автоматизированные системы контроля и учёта энергии (АСКУЭ) должны надёжно и устойчиво функционировать в сложных условиях, характерных для автоматизированных технологических процессов на предприятиях авиакосмической отрасли. К критическим эксплуатационным факторам относятся: электромагнитные и акустические помехи, перепады давления и температуры, пыль, влажность, утечка и искажение учётных данных и др. Предложен вариант структурной схемы и принцип работы теплосчётчика в составе АСКУЭ, который строится на основе тепловычислителя с волоконно-оптическим интерфейсом и волоконно-оптических каналов передачи данных от периферийных датчиков температуры, давления и расхода теплоносителя.

*АСКУЭ, теплосчётчик, волоконно-оптический канал связи, датчики, помехоустойчивость.*

Теплосчётчиками (ТС) на промпредприятиях принято измерять не только тепловую энергию, потреблённую на отопление и обеспечение теплового режима технологического процесса, как это принято во всём мире, но и тепловую энергию, потреблённую на подогрев горячей воды в централизованных циркуляционных системах горячего водоснабжения (ГВС) технологических процессов, разобранную горячую воду из системы ГВС, а также разобранную холодную воду из системы холодного водоснабжения (ХВС). В состав типового ТС для технологических процессов (ТП) входят преобразователи расхода теплоносителя (целевой расход, циркуляция, утечка, несанкционированный отъём и др.), термопреобразователи для измерения абсолютного значения температуры теплоносителя в точках учёта, а также разности температур в системе отопления и циркуляционной системе, датчики давления в различных точках учёта, определяемых топологической схемой АСКУЭ. Иногда дополнительно устанавливаются преобразователи избыточного давления. В результате в ТС используется более десятка датчиков. Использование такой сложной измерительной системы, учитывая возможные проблемы метрологического ка-

чества и эксплуатационной надёжности преобразователей, качество их монтажа, а также нередко несоответствие режимов ресурсоснабжения расчётным, во многих случаях приводит к тому, что ТС часто показывают результаты измерений, отличные от ожидаемых [1-5].

Технически серийно выпускаемые ТС традиционно классифицируются по методу измерения расхода теплоносителя:

- расходомерами переменного перепада давления (метод устарел и применяется крайне редко);
- крыльчатыми (турбинными) расходомерами (наиболее дешёвые, но имеют ряд характерных недостатков);
- ультразвуковыми расходомерами (одни из самых точных и надёжных);
- электромагнитными расходомерами (по качеству находятся приблизительно на одной ступени с ультразвуковыми).

Значительная часть серийно выпускаемых расходомеров имеет класс точности (приведённую погрешность) 1-1,5%. Если принять, что измерения преимущественно проводятся в середине шкалы, относительная погрешность этих измерений составляет 2-3%. С учётом же влияния различных дестабилизирующих фак-

торов действительная погрешность будет ещё больше.

В настоящее время для эффективно-го управления технологическими процессами в промышленности, энергетически и транспортными установками, для учётных операций требуется точность измерений расхода не хуже 0,1-0,3%.

Начат выпуск расходомеров, основанных на лазерной доплеровской интерферометрии, которые используются в основном в качестве средств метрологического обеспечения поверки других расходомеров. Их основные достоинства: высокая точность и широкий диапазон измерений скорости (от 0,03 до 0,5 % в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  м/с), помехоустойчивость, отсутствие контакта с контролируемой средой.

Для измерения температуры в основном используются стандартные термометры сопротивления, преобразующие изменение температуры в изменение электрического сопротивления проводников или полупроводников (ТС, ТСМ, ТСП, ТСМУ, ТСПУ и др.) Абсолютная погрешность измерения в зависимости от материала и схемы составляет от 0,01 до  $1^{\circ}\text{C}$  [3].

Современные счётчики могут хранить данные за период времени до года и/или передавать по каналам связи в АСКУЭ, которые на современных промышленных предприятиях интегрируются в общую автоматизированную систему управления технологическими процессами производства (АСУ ТП, SCADA). Помимо поддержания бесперебойного цикла работ АСУ ТП должна обладать высокой степенью информационной безопасности [6-9].

С целью повышения эффективности, надёжности и информационной безопасности ТС в составе АСУ ТП необходимо решать две основные задачи:

1) иметь точные данные о состоянии ключевых элементов, чтобы принять решение об исправности ТС и достоверности выдаваемой информации для организации последующих мероприятий;

2) обеспечивать защиту физических и виртуальных каналов передачи данных от датчиков к вычислителю и далее к серверу АСУ ТП, а также команд управления в обратном направлении.

Для успешного решения первой задачи требуется:

- наличие дополнительных сенсоров или функций, позволяющих определять исправность и достоверность данных от датчиков (расхода, давления, температуры);

- наличие цепей и функций встроенного контроля тепловычислителя (ТВ);

- оснащение интерфейсами датчиков и ТВ, позволяющими осуществлять функциональное резервирование компонентов ТС другими устройствами АСУ ТП.

Ряд известных приборов имеет или позволяет вводить в них встроенную систему контроля вплоть до уровня полевой сети датчиков [2]. Схемные решения в других ТС обеспечивают извлечение требуемой информации путём анализа косвенных параметров. В отличие от непосредственно измеряемых величин, погрешность которых однозначно определяется погрешностью измерительного тракта, определение точности расчётных параметров (по некоторой формуле, увязывающей косвенные параметры с интересующей характеристикой) является, как правило, сложной вычислительной задачей.

На точность формально вычисляемых параметров оказывают влияние три основных фактора [1]:

- погрешности первичных измерительных преобразователей, устройств вторичного преобразования и сопряжения, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, устройств телеметрии, коммутаторов, мультиплексоров и демультимплексоров и т.д.;

- вычислительные погрешности, связанные с погрешностью представления исходных данных в ЭВМ, погрешности округления результатов математических операций;

- апертурные погрешности, обусловленные асинхронностью съёма измеряемых параметров и различным временем первичной обработки этих параметров до поступления на ЭВМ.

Существуют универсальные методики, позволяющие после небольших доработок осуществлять единообразное описание и учёт непосредственно и косвенно (расчётным путём) измеренных параметров [1, 5].

В работах [2, 4] анализировались результаты измерений массы воды, потребляемой на ГВС, различными типами ТС. Выявлено систематическое занижение результатов косвенных (по разности расходов в подающем и обратном трубопроводе) относительно непосредственных измерений массы воды, потребляемой на ГВС в системе с открытым разбором. Поскольку температура теплоносителя в подающем трубопроводе всегда больше, то и её влияние на результаты измерений массы воды в нём всегда более существенно (в сторону занижения), чем в обратном трубопроводе.

В частности, материал преобразователя, образующий проходное отверстие, с ростом температуры расширяется, что, как правило, никак не регламентировано в документации на преобразователи. Если это нержавеющая сталь со средним коэффициентом линейного расширения 1,65-10, то увеличение сечения составит 0,0033% на 1°C, но это 0,33% на 100°C повышения температуры. В этом случае дорогостоящие ультразвуковые расходомеры класса 1 и более точные при эксплуатации выходят за рамки установленных допусков в сторону занижения объёма теплоносителя. Если рассмотреть электромагнитные преобразователи с футеровкой, например, из фторопласта, то результаты влияния температуры на фактор площади могут быть ещё более внушительными.

Влияние температуры на скорость потока имеет свои особенности для различных типов расходомеров.

1. Механические расходомеры: с ростом температуры увеличивается трение в

подшипниках, что замедляет скорость вращения подвижных элементов.

2. Электромагнитные расходомеры: относительное увеличение сопротивления меди катушки магнитной системы составляет порядка 0,4% на 1°C.

3. Ультразвуковые расходомеры: два фактора - изменение скорости ультразвука в воде и вязкости воды при изменении её температуры.

4. Вихревые расходомеры: изменение геометрии тела обтекания и вязкости воды при изменении её температуры. И тот и другой факторы влияют на процесс вихреобразования. Кроме того, здесь определяется средняя скорость по диаметру, а не по сечению.

Для решения задачи повышения точности необходимо либо внедрять температурную автокоррекцию, либо вносить поправки в результаты измерений по результатам контроля. Некоторые ТВ (например, ВКТ-5 и ВКТ-7) дают возможность автоматически учитывать поправки на температурное влияние.

Успешному решению второй задачи – информационной безопасности - посвящено множество трудов, ориентированных на корпоративные сети, и очень незначительно число исследований - на сети полевого уровня.

Для корпоративных сетей, подключаемых к Internet или использующих беспроводные технологии передачи данных, эффективными способами защиты (кроме полной изоляции) являются [4, 7]:

- межсетевые экраны;
- применение технологии VPN;
- сегментирование сети и использование буферных участков;
- многоуровневая идентификация и аутентификация.

В сложноструктурированных сетях крупных предприятий необходимо учитывать потенциальные угрозы от внутренних компонент корпоративной интегрированной информационной системы. Таким образом, следует разграничивать сеть АСУ ТП от остальных сегментов локальной сети посредством использования дополни-

тельных межсетевых экранов или специализированных серверов в качестве шлюзов, имеющих исключительное право на взаимодействие с сетью АСУ ТП. Это позволит предотвратить доступ внешних программных средств.

Минимизировать вероятность реализации угроз и информационные риски можно за счёт более простой архитектуры сети, уменьшения количества сегментов, связываемых друг с другом. Также следует организовывать минимально необходимое число точек удалённого доступа и непосредственного взаимодействия АСКУЭ с элементами и оборудованием АСУ ТП. В случае применения модемного соединения целесообразно предоставлять централизованный доступ с возможностью аутентификации и автоматической регистрации действий абонентов.

Из физических каналов наименее подвержены опасности несанкционированного доступа волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [9, 11]. Это предопределяет поиск новых схмотехнических решений на уровне полевой сети, в частности, применение датчиков и контроллеров (вычислителей) с волоконно-оптическим интерфейсом (ВОИ). При этом наиболее перспективны волоконно-оптические датчики (ВОД) расхода и тем-

пературы с закрытым оптическим каналом [13, 14]. Любое подключение к ВОЛС возможно идентифицировать как наличие канала утечки. В работах [10, 11] предложены методы защиты ВОЛС, основанные на передаче по световодам отдельных фотонов.

Пример ТС на трёх ВОД, решающего две вышеуказанные задачи в составе АСКУЭ, интегрированной в АСУ ТП, представлен на рис.1 [12]. ТС оснащён основными и резервными датчиками, волоконно-оптическими каналами передачи информации, элементами встроенного контроля. Тепловычислитель подключен к аналогичным датчикам, относящимся к другим подсистемам АСУ ТП, что позволяет поддерживать требуемую работоспособность счётчика при выходе из строя собственных периферийных чувствительных элементов или каналов связи. При отказе ТВ датчики подключаются к резервному контроллеру АСУ ТП, который конфигурируется с сервера под решение конкретной задачи. Для визуализации показаний можно комплектовать ТС встроенным дисплеем или подключать к удалённому ПК через интерфейсы RS-232 или USB, радиointерфейсы Bluetooth (IEEE 80215) или WiFi (IEEE 80211).

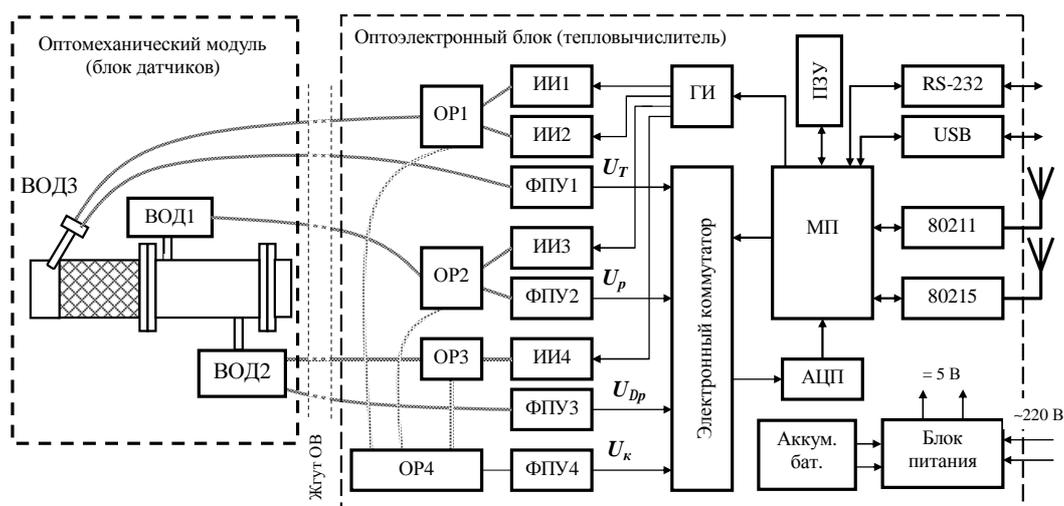


Рис. 1. Структурная схема теплосчетчика (вариант на 3 датчика):  
 ГИ - генератор импульсов; ИИ - источник излучения; ФПУ - фотоприёмное устройство;  
 ОР - оптический разделитель; МП-микروпроцессор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПЗУ –  
 постоянное запоминающее устройство; ВОД – волоконно-оптический датчик

Особенностью ТС является использование ВОД давления и температуры, а также типового времяимпульсного ультразвукового расходомера в сочетании с волоконно-оптическим датчиком ультразвуковых колебаний. Все датчики имеют закрытый оптический канал.

Датчики с закрытым каналом базируются на рециркуляционном принципе. Часть контура рециркуляции – оптическая, часть – электрическая. В системе используются лавинные фотодиоды или PIN-фотодиоды. Основной причиной изменения оптического пути, т. е. периода и частоты рециркуляции сигнала, является изменение коэффициента преломления и удлинение сенсорного участка оптического волокна (ОВ) вследствие воздействия измеряемого параметра на волокно или нанесённое на него кондуцирующее покрытие. Структура позволяет вводить опорный канал, реализовывать дифференциальные измерительные схемы, форми-

ровать сложные оптические контуры с волновым мультиплексированием для измерений разных величин, использовать отрезки специальных ОВ в качестве сенсоров и др. В результате возможно достижение высокой стабильности измерений, разрешающей способности, зависящей от ширины импульса и длины ОВ, большого динамического диапазона, определяемого коэффициентом деформации волоконно-оптического световода (ВОС).

Для формирования мультисенсорной сети наиболее эффективным представляется спектрально-временное разделение ВОС в общем контуре рециркуляции (рис.2). Каждый измерительный контур по параметру  $\alpha_i$  функционирует на индивидуальной длине волны  $I_i$  (наборе волн), для чего сформирован блок источников излучения (БИИ), согласованных с узкополосными интерференционными фильтрами (УИС) сенсоров.

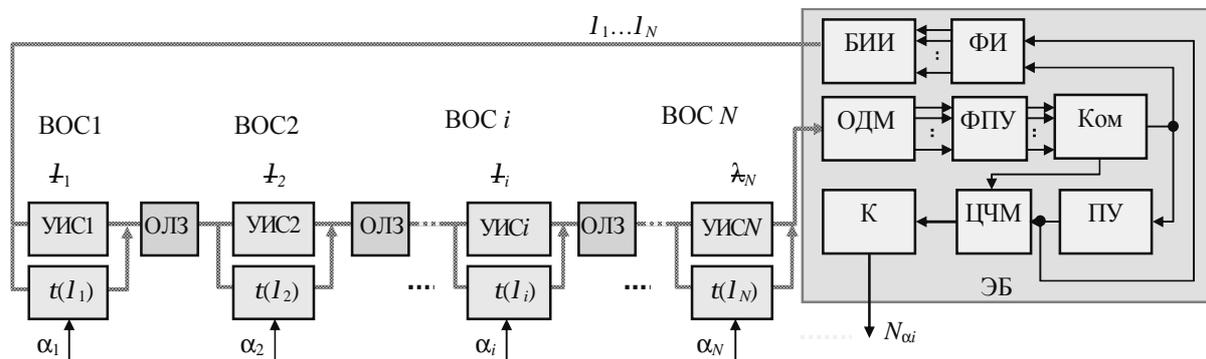


Рис. 2. Рециркуляционная мультисенсорная структура на основе ВОД с закрытым оптическим каналом: ФИ – формирователь импульсов; БИИ – блок источников излучения; УИС – узкополосный интерференционный светофильтр; ОЛЗ – оптическая линия задержки;  $t(I_i)$  – функция пропускания сенсора на длине волны  $I_i$ ; ОДМ – оптический демультиплексор; ФПУ – фотоприёмное устройство; Ком – коммутатор; ЦЧМ – цифровой частотомер; ПУ – пороговое устройство; К – контроллер

Для надёжного разделения импульсов во времени между ВОС вводятся оптические линии задержки (ОЛЗ). Задержанные на разное время импульсы через оптический демультиплексор (ОДМ) направляются на фотоприёмное устройство (ФПУ), с выхода которого электрические импульсы через коммутатор и пороговое устройство (ПУ) поступают на цифровые частотомеры (ЦЧМ) и формирователь им-

пульсов (ФИ) для соответствующих источников излучения. В контроллере формируются цифровые коды измеряемых величин. Такая структура позволяет формировать высоконадёжные полевые сети, измеряющие разнообразные физические величины. Применение ОВ для передачи сигналов предполагает функциональное резервирование каналов для последовательно-параллельного соединения senso-

ров, функционирующих в различных участках спектра светового потока осветителя. Это означает, что в спектре имеются ряд резервных спектральных поддиапазонов и временных каналов, которые могут использоваться для снятия информации от двух и более сенсоров, обслуживающих один ТС. Кроме того, при таком разделении каналов существенно снижаются межканальные помехи.

Типовые ультразвуковые расходомеры содержат пьезоэлемент, формирующий и воспринимающий отражённую в потоке жидкости акустическую волну с частотой  $f = 0,100-20$  МГц. При этом регистрируются изменения параметров сигнала, вызываемые потоком.

Пьезоэлемент может устанавливаться как в непосредственном контакте со средой, так и на стенке трубы (рис.3).

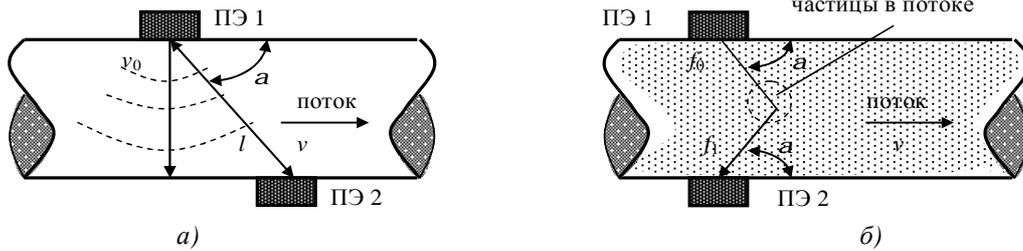


Рис. 3. Типы ультразвукового измерения расхода теплоносителя:  
 а - времяимпульсное измерение; б - доплеровское измерение  
 (ПЭ – пьезоэлемент)

Доплеровское измерение (рис.3, б) использует эффект изменения частоты волны при её отражении от движущегося объекта. В случае потока газа или жидкости отражающими объектами служат примеси или участки с измененной плотностью (пузырьки воздуха).

Если измеряющий луч распространяется в потоке под углом  $a$  со скоростью  $V$  и частотой  $f_0$ , то при отражении звука от частиц примесей, находящихся в потоке скорости  $v$ , частота звука изменяется: если поток движется навстречу лучу, то частота увеличивается, если против луча - уменьшается в соответствии с формулой

$$f_1 = f_0 \frac{1}{1 \pm \frac{v}{V \sin a}} \quad (2)$$

Ультразвук распространяется со скоростью  $V_0$  под углом  $a$  к стенкам трубы в осевом сечении. Расстояние между электроакустическими преобразователями равно  $l$ .

При движении потока со скоростью  $v$  разница между временем прохождения сигнала в разные стороны составляет (времяимпульсный метод, рис.3, а)

$$\Delta t = \frac{l}{V_0 - \Delta V} - \frac{l}{V_0 + \Delta V}, \quad (1)$$

где  $\Delta V = \frac{v}{\sin a}$

Измерение разности времен, проводимое в интервалах времени, измеряемых микросекундами, позволяет вычислять скорость потока.

Измерение частоты отражённого сигнала позволяет вычислить скорость потока. Если при времяимпульсном измерении наличие инородных частиц и пузырьков нежелательно, так как они рассеивают измерительный луч, то доплеровский тип, наоборот, требует наличия примесей и пузырьков. Некоторые расходомеры совмещают в себе оба типа измерения, расширяя диапазон применения.

Приёмник и передатчик образуют измерительный луч. В большинстве ультразвуковых расходомеров реализовано несколько измерительных лучей (до восьми). Многолучевое измерение потока даёт возможность корректировать показания, а также проводить самодиагностику.

Вместо воспринимающего пьезоэлемента в представленном расходомере используется ВОД в форме овальной катушки из нескольких десятков оптических волокон. Внутренний слой витков соприкасается со стенкой трубопровода. Внешний слой - опорный, который предназначен для реализации дифференциального метода измерения.

Под действием механических деформаций ОБ, переносимых звуковой волной с частотой  $f_a$ , возникает пространственная модуляция оптических свойств среды, обусловленная упруго-оптическим, или фотоупругим, эффектом [14].

В результате в сердцевине и оболочке происходит формирование участков с измененными значениями коэффициента преломления:

$$n_{1a} = n_1 [1 + k_1 A \sin(2p f_a + f_a)]; \quad (3)$$

$$n_{2a} = n_2 [1 + k_2 A \sin(2p f_a + f_a)],$$

где  $A$  – амплитуда (мощность) акустической волны;  $k_1, k_2$  – коэффициенты преобразования амплитуды акустической волны в изменение коэффициента преломления материала сердцевины ( $n_{1a}$ ) и оболочки ( $n_{2a}$ ) ОБ;  $f_a$  - фаза акустической волны.

Изменение коэффициента преломления ведёт к изменению частоты рециркуляции импульсов, что в конечном итоге позволяет оценивать скорость потока теплоносителя. Введение нескольких ВОД ультразвуковых колебаний помимо определения скорости потока теплоносителя позволяет осуществлять контроль состояния трубопровода на предмет локализации мест развития каверн и трещин (метод акустического нагружения) [15].

#### Библиографический список

1. <http://www.abok.ru> / [Электронный ресурс].
2. <http://www.businessmonitor.ru> / [Электронный ресурс].

3. <http://www.izmerenie.ru> [Электронный ресурс].

4. <http://www.tsoft.ru/ru/press/article/index.php?id4=872> [Электронный ресурс].

5. <http://www.case.korusconsulting.ru> / [Электронный ресурс].

6. Understanding SCADA system security vulnerabilities, Riptech, Inc. 2001 January. - P. 126.

7. Астахов, А. Реалии и мифы кибертерроризма [Текст] / А. Астахов // Открытые Системы. - 2003. - № 5. - С. 24-30.

8. [www.automation.com/sitepages/pid1608.php](http://www.automation.com/sitepages/pid1608.php) [Электронный ресурс].

9. Quantum Cryptography//Photonics Spectra. 1994. V.28. № 9. - P. 4850.

10. Fietcher P. Light pulses sent over optical fibers creat "Invulnerable" encryption [Text] P. Fietcher // Electron Des. 1995. V.43. № 26. - P. 3840.

11. <http://www.opticalfibersensors.org> / [Электронный ресурс].

12. Бирюк, В. В. Промышленный теплосчетчик на основе волоконно-оптических датчиков физических величин [Текст] / В.В. Бирюк, Г.И. Леонович, С.А. Надешкин // Информационный вестник Самарской области. Энергосбережение. – Самара, 2008. - №10. -С. 24-30.

13. Леонович, Г. И. Мультисенсорные волоконно-оптические преобразователи транспортных систем [Текст] / Г. И. Леонович, В. М. Гречишников, А. С. Лукин [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН. Спец. вып.: Перспективы и направления развития транспортной системы. Самара, 2007. - С. 95-99.

14. Леонович, Г. И. Сенсорные сети на основе волоконно-оптических датчиков с рециркуляцией оптических импульсов [Текст] / Г.И. Леонович, Н.А. Ливочкина // Фотон-экспресс: тез. всерос. конф. по волоконной оптике. – М.-Пермь, октябрь 2009. - 6(78). - С.239-240.

15. <http://www.powerelectronics.ru> [Электронный ресурс].

## **HEAT METER FOR ASECM, INTEGRATED INTO TP MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

©2011 V. V. Biryuk, G. I. Leonovich, N. A. Livochkina

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

Industrial automated systems of energy control and metering are to operate in a reliable and stable way under challenging conditions typical for automated processes at aerospace enterprises. Among critical operation factors are electromagnetic and acoustic noise, pressure and temperature drops, dust, moisture content, metering data loss or distortion etc. We propose a version of the block diagram and the working principle of a heat meter integrated into ASECM which is based on a heat calculator with a fiber-optical interface and fiber-optical channels of data transmission from peripheral sensors of temperature, pressure and heat flow rate.

*AMR, heat meter, fiber optic channel, sensors, noise immunity.*

### **Информация об авторах**

**Бирюк Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Леонович Георгий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Ливочкина Наталья Александровна**, инженер ЦСКБ «Прогресс». Область научных интересов: теплотехнические измерения.

**Biryuk Vladimir Vasilyevich**, Dr. Sci. Tech., professor, deputy head of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named by academician S.P. Korolyov, [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru), area of research: heat-and-mass transfer, thermodynamics.

**Leonovich Georgiy Ivanovich**, Dr. Sci. Tech., professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named by academician S.P. Korolyov, [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru), area of research: heat-and-mass transfer, thermodynamics.

**Livochkina Natalia Aleksandrovna**, post-graduate student, area of research: heat-engineering measurements.