



САМОНАСТРАИВАЮЩАЯСЯ СИСТЕМА КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПНЕВОТРАНСПОРТА КАТАЛИЗАТОРА В РЕАКЦИОННО-РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.Г. Нагиев, С.А. Халилов, У.Х. Агаев,

А.С. Гусейнова (Сумгаитский государственный университет)

Предложен метод построения системы контроля скорости циркуляции катализатора на установках с циркулирующим мелкодисперсным катализатором, характеризующийся наличием самонастраивающейся калибровки. Показано, что надежную самонастройку можно осуществить при помощи непрерывного сбора самообучающейся выборки статистических данных о динамике перераспределения катализатора между реактором и регенератором.

Ключевые слова: самонастраивающаяся система, автоматизация реакционно-регенерационных установок, косвенное измерение, скорость циркуляции катализатора.

Постановка задачи

В нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности широко распространены гетерогенно-каталитические процессы, осуществляющиеся в циркуляционных системах реактор-регенератор. Процессы каталитического крекинга тяжелых остатков нефти, дегидрирования различных углеводородов нефтяного происхождения являются типичными примерами таких производств. Непрерывная циркуляция катализатора между реакторами и регенераторами, в которых, как правило, создаются условия псевдооживления пылевидных катализаторов, выдвигают на передний план оперативный контроль скорости циркуляции катализатора. Несмотря на заметные достижения в области автоматизации контроля и управления данного класса процессами, к настоящему времени по ряду нерешенных технических проблем скорость циркуляции катализатора все еще определяют косвенно. Используют перепад давления на транспортной линии и суммарный расход воздуха и водяного пара в подъемном стояке. Физической предпосылкой к этому является существование четкой функциональной связи стационарного перепада давления на транспортной линии со всеми названными параметрами пневмотранспорта. Среднюю плотность дисперсной фазы определяют по перепаду давления, затем, пользуясь приближенной оценкой коэффициента скольжения (КС), рассчитывают линейную, а следовательно, и массовую скорости катализатора, вводимого в линию пневмотранспорта [1, 2]. Точность данной методики зависит от точности оценки КС. Этой теме посвящены многочисленные экспериментальные исследования [3].

Несмотря на повышенный исследовательский интерес, данный вопрос к настоящему времени все еще не нашел исчерпывающего ответа. Коэффициент скольжения при пневмотранспорте, который опреде-

ляется как отношение линейных скоростей твердой и газовой фаз, зависит от слишком многих факторов, влияющих на режим пневмотранспорта. Вязкость транспортирующей среды является функцией большого числа физических величин, таких как температура, давление, состав газового потока и т.п. Учет влияния этих факторов для конкретных производственных условий затруднен сложностью взаимосвязей между названными параметрами.

В связи с этим разработана методика, позволяющая осуществить идентификацию КС с использова-

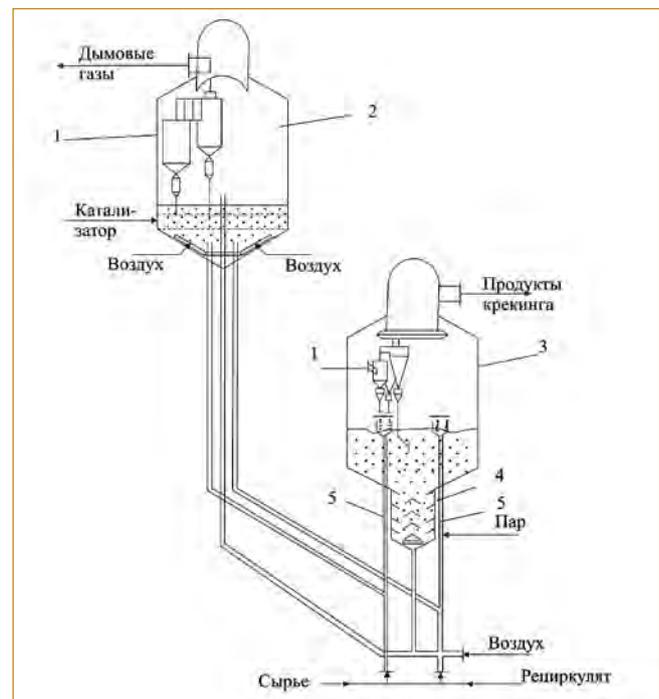


Рис. 1. Схема установки каталитического крекинга с тремя линиями транспорта катализатора, где 1) циклоны; 2) регенератор; 3) реактор-сепаратор; 4) отпарная зона; 5) лифт-реакторы



Рис. 2. Функциональная структура системы косвенного измерения скорости пневмотранспорта с самонастраиванием

нием данных, формирующихся в темпе протекания процессов, где применен пневмотранспорт сыпучего материала, в частности, пылевидного или мелкодисперсного катализатора. Настоящая задача адаптивного оценивания была сформулирована для установки каталитического крекинга, осуществляющей деструктивное превращение тяжелых остатков первичной переработки нефти в компонент высокооктанового бензина.

Реакционно-регенерационная система этой установки имеет три системы пневмотранспорта, осуществляющие циркуляцию катализатора между аппаратами. Реакторно-регенераторный блок, который использован авторами для внедрения разрабатываемой системы контроля, характеризуется вводом катализатора по двум линиям восходящего потока, а также возвратом отработанного катализатора в регенератор на воздушном потоке. Схема такой системы циркуляции катализатора показана на рис. 1.

На рис. 2 показана функциональная структура системы косвенного измерения скорости потока катализатора с адаптивной подстройкой КС.

Значения давления из датчиков D1 – D4 поступают в формирователь небаланса (невязки), который запрограммирован в вычислительном блоке посредством дифференциального уравнения динамики изменения уровня псевдооживленного слоя катализатора в регенераторе. Такое изменение может произойти в результате небаланса скоростей вводимого количества отработанного катализатора для регенерации и извлекаемых количеств для ввода в реактор по двум линиям. Этот небаланс четко связан со скоростью изменения уровня катализатора в псевдооживленном слое в регенераторе. Вычислительное устройство минимизации, устанавливая балансировку, меняет принятые ранее для расчета скорости пневмотранспорта КС, чем обеспечивается точность измерения.

Основные уравнения для настройки КС

Для реализации данной системы запишем уравнения баланса катализатора в системе циркуляции:

$$S \frac{dh}{dt} = \lambda_1 V_1 - \lambda_2 V_2 - \lambda_3 V_3, \quad (1)$$

где h – уровень псевдооживленного слоя катализатора в регенераторе; $V_i, i = 1, 3$ соответственно объемные расходы транспортирующих потоков в линии ввода отработанного катализатора в регенератор, а также ввода в реактор свежего катализатора по двум соответствующим линиям; λ_i – коэффициенты скольжения; S – площадь поперечного сечения регенератора.

Учитывая необходимые поправки по температуре и давлению, объемные расходы транспортирующих агентов по массовым расходам можно вычислить по формуле Клапейрона-Менделеева:

$$V_i = \frac{m_i}{M_i} \frac{RT_i}{P_i} = n_i \frac{RT_i}{P_i}, \quad (2)$$

где индексы $i = 1, 3$ соответствуют номерам транспортных линий, n_i – мольные расходы транспортирующих агентов по трем линиям, T_i, p_i – значения температуры и давления на линиях.

Основываясь на аддитивности физических характеристик газовых смесей, общий мольный расход газовой смеси можно выразить суммой составляющих:

$$n_i = \sum_j n_{ij}, \quad (3)$$

где индекс j выражает компоненты, составляющие смесь.

Сформулированная постановка задачи идентификации, направленная на оптимальное оценивание неизвестных коэффициентов λ_i , может быть расширена на аппроксимацию неизвестных зависимостей $\lambda_i(T_i, n_i)$ по статистическим наблюдениям или по данным целенаправленного эксперимента.

Рассмотрим некоторую выборку входных статистических данных, состоящих соответственно из: объемных расходов транспортирующих газов $V_i, i = 1, 3$; значений температуры $T_i, i = 1, 3$ и давления $P_i, i = 1, 3$; а также соотношений

$$\varepsilon_i = \frac{n_{1i}}{n_{1i} + n_{2i}}, i = \overline{1, 3},$$

где n_{1i} – основное, а n_{2i} – вспомогательное транспортирующие газообразные вещества. Вспомогательным транспортирующим веществом является водяной пар на аэрацию для улучшения режима пневмотранспорта.

Предположим, ищутся линейные зависимости КС с вышеназванными параметрами:

$$\lambda_i(T_i, \varepsilon_i) = a_i T_i + b_i \varepsilon_i + c_i; i = 2, 3. \quad (4)$$

При этом влияние параметров ε_i, T_1 на величину λ_1 пренебрежительно малы.

Тогда невязка в задаче статистического оценивания будет иметь вид:

$$F(\lambda_1, a_i, b_i, c_i) = \sum_{j=1}^N \left(S \frac{dh}{dt} - \lambda_1 V_{1j} - (a_2 T_2 + b_2 \varepsilon_2 + c_2) V_{2j} - (a_3 T_3 + b_3 \varepsilon_3 + c_3) V_{3j} \right)^2; \quad (5)$$

Таблица 1. Регламентированные значения параметров, использующихся в задаче идентификации коэффициента скольжения

Параметры	Обозначения	Мин. значение,	Среднее значение	Макс. значение
Скорость изменения уровня псевдоожигенного слоя в регенераторе, м/ч	dh/dt	0	0,41	2,4
Объемная скорость воздуха в I тр. линию, м ³ /ч	V_1	12000	14000	20000
Объемная скорость тр. агента во II тр. линию, м ³ /ч	V_2	4600	5500	6500
Объемная скорость тр. агента во III тр. линию, м ³ /ч	V_3	4800	6000	7000
Температура в II тр. линии, °С	T_2	300	340	370
Температура в III тр. линии, °С	T_3	300	350	370
Доля вод. пара во II тр. линии, об/об	ε_2	0,14	0,20	0,24
Доля вод. пара во III тр. линии, об/об	ε_3	0,14	0,18	0,22

где $a_i, b_i, c_i, i = 2, 3$ – идентифицирующие параметры; $\frac{dh}{dt}, T_2, T_3, \varepsilon_2, \varepsilon_3, V_1, V_2, V_3$ – входы для задачи статистического оценивания. Параметр λ_1 является заданным.

Использование параметра λ_1 в качестве заданной (известной) величины в данной постановке задачи идентификации является принципиальным. Иначе, если включить этот параметр в ряд идентифицирующихся, то задача минимизации функции (5) не имеет единственного решения. Идея данного принципа самонастраивания основывается на том, что на одной из перечисленных линий пневмотранспорта условия стабильны, то есть λ_1 не меняется от температуры или других параметров режима. Для его оценивания может быть использован отдельный эксперимент, в частности, могут быть использованы данные литературных источников. Более эффективным является использование переходных режимов реакционно-регенерационных систем при их пуске или останове. В режиме останова прикрыты задвижки вывода катализатора из регенератора, то есть $V_2 = 0; V_3 = 0$, следовательно:

$$\lambda_1 = \frac{S dt}{V_1 dh} \approx S \frac{\Delta t}{V_1 \Delta h} \quad (6)$$

Исходя из сделанных предположений, было определено значение: $\lambda_1 = 2.2$. Очевидно, оптимальные значения идентифицируемых параметров соответствуют минимуму невязки (5).

Задача решена по данным промышленной установки каталитического крекинга модели 1 А-1 М. Средние значения режимных параметров, составляющих статистический материал, приведены в табл. 1.

Таблица 2. Исходные данные и результаты вычислений по оценке точности метода

Параметры	Расчетные значения	
	Вычисленные по найденным коэффициентам	Вычисленные по коэффициентам, использующимся на практике
τ , мин	150	150
θ , мин	5	5
$h^p(\tau)$	3,62	3,94
$h^E(\tau)$	3,43	3,43
δ_m , %	5,5	–
δ_0 , %	–	14,8
Параметры настройки	$a_2 = 0.0024; a_3 = 0.0028;$ $b_2 = 0.98; b_3 = 1.21;$ $c_2 = 0.61; c_3 = 0.43;$	$a_2 = 0; a_3 = 0;$ $b_2 = 0; b_3 = 0;$ $c_2 = 1.8; c_3 = 1.92;$

Таким образом, найдены базовые значения КС, которые соответствуют режимам работы названной установки: $\lambda_1 = 2.2; \lambda_2 = 1.8; \lambda_3 = 1.92$. Две из этих величин подлежат к адаптивной подстройке путем минимизации функции (5) в РВ функционирования установки и определения параметров $a_i, b_i, c_i, i = 2, 3$ в формуле (4).

Промышленное испытание метода и оценивание точности

Оценивание точности, достигающейся с применением метода самонастройки, было проведено экспериментально с использованием интегрального критерия. Сущность эксперимента заключалась в определении погрешности, допущенной в течение некоторого периода контроля τ , показателем которого является интеграл приращения высоты псевдоожигенного слоя катализатора в регенераторе. Началу эксперимента предшествовала настройка коэффициентов $a_i, b_i, c_i, i = 2, 3$. Процедура настройки выполнялась в темпе протекания ТП по критерию достижения минимума функции (5). Значения названных коэффициентов в качестве исходных данных для задачи контроля погрешности наряду с промежуточно-расчетными величинами приведены в табл. 2.

О качестве выполненной процедуры идентификации названных параметров можно судить по характеру процесса сходимости минимизирующей последовательности. Процесс идентификации осуществлен дважды по двум достаточно отличающимся друг от друга начальным приближениям. Итерационные процессы сошлись к единому минимуму (табл. 2).

На рис. 3. приведен график одного из переходных процессов настройки системы, который характеризует темп затухания функции рассогласования. Время достижения минимума в разных вариантах решения задачи идентификации длилось 6...12 ч.

В начальный момент эксперимента по установлению точности метода, то есть при $t = 0$ была зафиксирована высота псевдоожигенного слоя катализатора

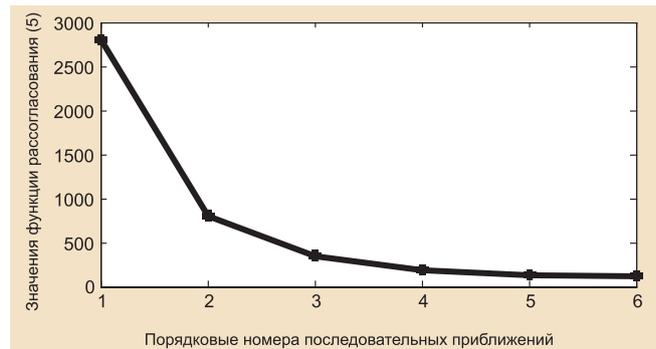


Рис.3. Диаграмма сходимости при идентификации параметров

в регенераторе $h(0) = h^*$. Далее осуществлялся сбор показаний всех датчиков с постоянным шагом дискретизации θ ($t = \theta k; k = 1, 2, 3, \dots$) и вычислялись параметры, приведенные в табл. 1. Затем вычислялась интегральная сумма:

$$h^p(\tau) = h^* + \sum_{k=1}^K \frac{\rho S}{\theta} \Delta h_k^p; K = \frac{\tau}{\theta},$$

где расчетная величина приращения высоты псевдооживленного слоя Δh_k^p имела следующий вид:

$$\Delta h_k^p = \lambda_1 V_{1j} - (a_2 T_{2k} + b_2 \varepsilon_{2k} + c_2) V_{2k} - (a_3 T_{3k} + b_3 \varepsilon_{3k} + c_3) V_{3k}.$$

Далее вычислялось средне взвешенное относительное отклонение:

$$\delta_m = \frac{h^p(\tau) - h^E(\tau)}{h^E(\tau)} \cdot 100\%,$$

где $h^p(\tau), h^E(\tau)$ – соответственно расчетное и фактическое значения высоты псевдооживленного слоя катализатора в регенераторе по истечению времени τ .

Полученная величина δ_m сравнивалась с величиной δ_0 , получающейся из расчетов, проводившихся по аналогичному порядку вычислений, но с коэффициентами $\lambda_{0i}; i = 1, 3$, используемым в практике управления установкой. Из табл. 2 видно, что с применением данного метода достигнуто более чем двукратное снижение уровня погрешности в определении скорости циркуляции катализатора.

Структура системы контроля

Технические средства, реализующие измерение по предлагаемому принципу, должны удовлетворить ряду требований, в частности:

- по быстродействию – временной сдвиг между измерением давления на входе/выходе транспортной линии не может превышать 5% времени пневмотранспорта катализатора;
- по сглаживанию пульсаций – в начальном участке линии пневмотранспорта, вблизи захватного сооружения возникают высокочастотные изменения давления за счет подаваемого на аэрацию водяного пара или других компонентов, способствующих улучшению режима пневмотранспорта;

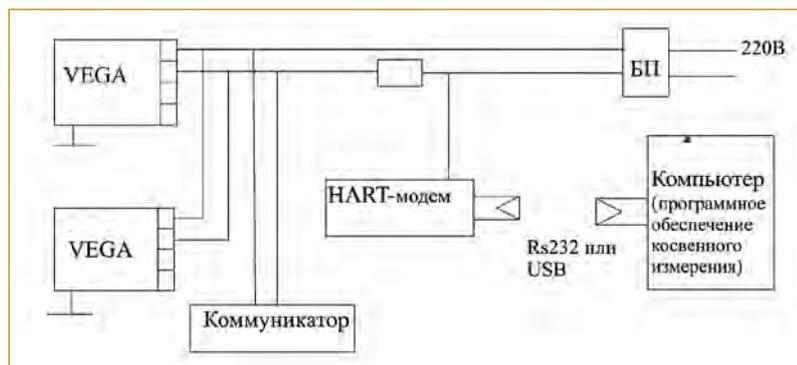


Рис. 4. Функционально-техническая структура системы косвенного измерения скорости ввода катализатора в реактор-подъемник

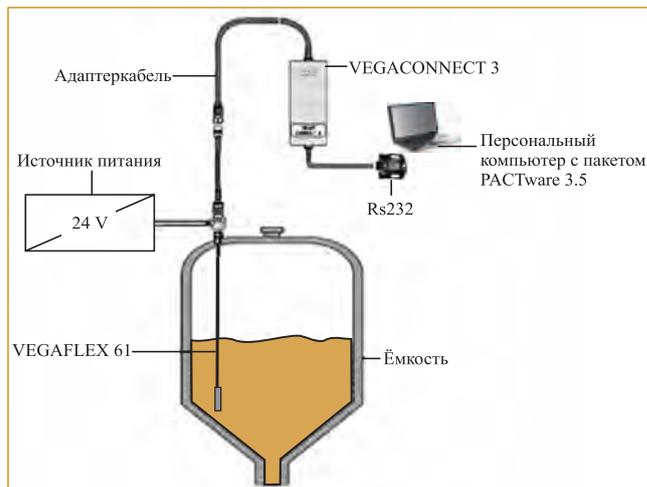


Рис. 5. Функциональная схема измерения уровня сыпучих твердых материалов в емкости

– по достаточности степени интеллектуализации средств контроля – необходимость в сложных вычислениях связанных с определением искомой величины.

Эти требования полностью выполнимы в силу внедрения новой технологии цифрового контроля и коммуникации измерительных сигналов, совместимых с цифровым протоколом HART (Highway Addressable Remote Transducer – адресуемый дистанционный магистральный преобразователь).

Данная технология освоена многими производителями современных приборов и систем управления. В настоящее время имеется большая номенклатура датчиков и средств контроля и автоматизации, функционирующих на основе этого протокола [4, 5].

HART протокол использует принцип частотной модуляции для обмена данными на скорости 1200 Бод, что обеспечивает необходимое быстродействие. Поскольку HART протокол характеризуется наличием двух управляющих устройств (управляющая система и коммутатор), то осуществление адаптации с использованием накопленных данных пассивного наблюдения не представляет технической сложности.

Так как к одной паре проводов может быть подключено до 15 датчиков, то возможна обработка сигналов от всех датчиков измерения параметров вычислительной системой верхнего уровня без дополнительных затрат на коммуникации.

Система может быть построена по принципу мультиплексирования входных каналов (рис. 4). Все датчики в таком режиме имеют свой уникальный адрес. Датчики передают измерительную информацию по токовому выходу 4...20 мА, а их конфигурация может быть изменена с одного цифрового выхода управляющей системы. Связь мультиплексора с системой управления осуществляется по интерфейсам RS-485/232, которые могут осуществить высокоскоростную передачу сигналов.

Для испытания работоспособности предложенной технической системы проводились лабораторные исследования оценки КС при различных выборках данных. Функциональная схема системы приведена на рис. 5.

Преимуществом данной системы является возможность архивации показаний параметров протекания ТП в динамике. Для реализации такой функции в системе предусмотрено выполнение специальной команды Trend. На рис. 6 приведена диаграмма, фиксирующая осциллирующее поведение сигнала перепада давления на транспортной линии.

Заключение

Альтернативное решение проблемы измерения скорости пневмотранспорта катализатора в реакционно-регенерационных системах, основывающихся на прямом измерении, имеет малую перспективу. Использование строгой функциональной зависимости данного параметра с перепадом давления и плотностью потока катализатора приводит к неточности, так как сопряжено с высокой чувствительностью к температуре и составу транспортирующих агентов коэффициента скольжения. Непрерывное уточнение этого параметра, основанное на балансировке в динамике перераспределения катализатора между реактором и регенератором, обладает основным достоинством систем с обратной связью: адаптивностью и самонастраиванием.

Нагиев Али Гасан оглы – д-р техн. наук, проф., **Халилов Сабир Агакиши** – канд. техн. наук, доцент, **Агаев Улдуз Хейрулла** – канд. техн. наук, доцент, **Гусейнова Афет Судеф** – ст. преподаватель Сумгаитского государственного университета.
Контактный телефон 994-50-339-68-36.
E-mail: nashfn@hotmail.ru

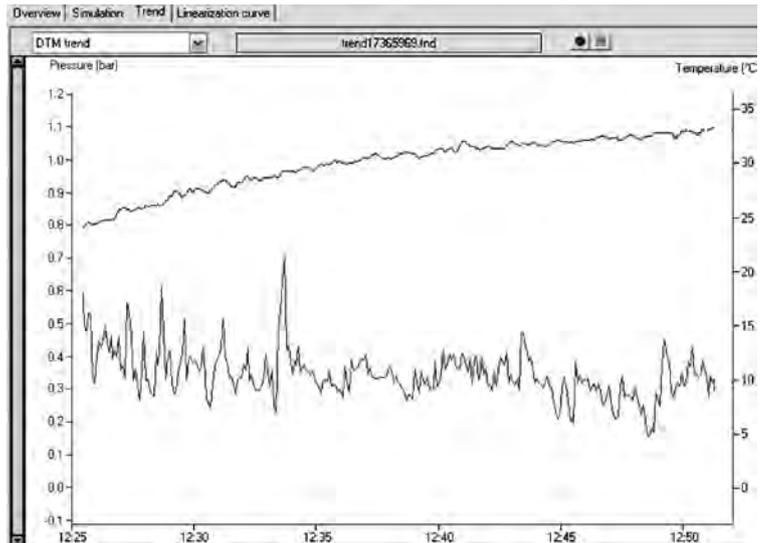


Рис. 6. Осциллирующее поведение сигналов с датчиков перепада давления на одной из транспортных линий катализатора (нижний график) и температура линии.

Список литературы

1. Weber M. Friction of the air and the air-solid mixture in pneumatic conveying//Bulk solids handling. 1991. V. 11.
2. Li H., Tomita Y. An experimental study of swirling flow pneumatic conveying system in horizontal pipeline//Translations of the ASME. 1996. V. 118.
3. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М., Химия. 1972.
4. Westers T. The door to two worlds. Mannheim: Pepperl+Fuchs PA, 2001.
5. Winter H. Prozessleittechnik in Chemieanlagen, Verlag Europa – Lehrmittel. Nourney. 2007.

Компания РТСофт завершила проект по созданию АСДТУ для инновационного ЦУС Вологодского ПМЭС

Компания РТСофт завершила проект по созданию инновационного центра управления сетями (ЦУС) на базе Вологодского предприятия магистральных электрических сетей (Вологодского ПМЭС), филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Центра.



Выступив генеральным подрядчиком, компания РТСофт разработала проект, создала и сдала в промышленную эксплуатацию автоматизированную систему диспетчерско-технологического управления (АСДТУ) для ЦУС Вологодского ПМЭС. В рамках выполненных работ были подготовлены помещения, смонтированы инженерные системы, обеспечена диспетчерская и технологическая связь, созданы основные и резервные каналы связи с объектами управления, реализована функция передачи телеметрической информации.

Работая над созданием ЦУС, специалисты РТСофт широко применяли инновационные решения и новейшее высокотехнологичное оборудование, среди которого, например, видеостена отображения информации, система спутниковой связи VSAT, системы гарантированного электропитания и автоматического пожаротушения.

Для автоматизации функций оперативного управления подведомственными ЦУС Вологодского ПМЭС объектами электрических сетей создан оперативно-информационный комплекс на базе современного ПТК. ПТК ЦУС реализован на основе программной платформы СК-2007 разработки ЗАО «Монитор Электрик» и выполняет роль узла сети сбора и отображения в масштабе РВ оперативной информации о процессах, происходящих на удаленных энергетических объектах. Комплекс специализированных программно-аппаратных средств осуществляет прием и передачу телеметрической информации, ее предварительную обработку и отображение на АРМ оперативного персонала ЦУС, реализующего функции управления объектами ЕНЭС.

ЦУС Вологодского ПМЭС охватил функции оперативно-технологического управления сорока энергообъектами, в том числе и 10 ПС, являющимися собственностью других компаний (ЗАО «Вологодский подшипниковый завод», ОАО «Агро-Череповец», ОАО «Череповецкий Азот», ОАО «Северсталь»). Его работа значительно повысит скорость принятия решений и уровень контроля над оперативным управлением распределительным сетевым комплексом, что будет способствовать сокращению потерь в ЕНЭС.

[Http://www.rtssoft.ru](http://www.rtssoft.ru)