

УДК 697.921.47

Ахмирова Луиза Раисовна, магистрант
ФГБОУ ВО Уфимский государственный
нефтяной технический университет
Akhmirova Louise Raisovna
Ufa State Petroleum Technological University

**АРХИТЕКТУРА ТРЁХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ
С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОБМЕРЗАНИЯ**
**ARCHITECTURE OF A THREE-LEVEL AUTOMATION SYSTEM FOR A
REGENERATIVE VENTILATION SYSTEM WITH FROST PREDICTION**

Аннотация. В условиях растущих требований к энергоэффективности и надёжности инженерных систем зданий автоматизация процессов вентиляции и утилизации тепла выходит на передний план. Рекуперативные установки, используемые для снижения энергопотребления систем вентиляции, нуждаются в интеллектуальных решениях, способных не только обеспечивать высокую эффективность теплообмена, но и оперативно реагировать на угрозы, такие как обмерзание теплообменных поверхностей. В данной статье представлена структура и функциональные особенности трёхуровневой системы автоматизации рекуперативной установки, охватывающая полевой, контроллерный и операторский уровни. Особое внимание уделено модульности архитектуры, интеграции цифровых датчиков и исполнительных механизмов, применению машинного обучения для прогнозирования рисков, а также обеспечению отказоустойчивости и удалённого мониторинга.

Abstract. With increasing demands on energy efficiency and reliability of building engineering systems, automation of ventilation and heat recovery processes is coming to the fore. Recuperative plants used to reduce the energy consumption of ventilation systems need intelligent solutions that can not only ensure high heat transfer efficiency, but also quickly respond to threats such as freezing of heat exchange surfaces. This article presents the structure and functional features of a three-level automation system for a regenerative plant, covering the field, controller and operator levels. Particular attention is paid to the modularity of the architecture, the integration of digital sensors and actuators, the use of machine learning to predict risks, as well as to ensure fault tolerance and remote monitoring.

Ключевые слова: Автоматизация, рекуперация, обмерзание теплообменника, автоматизация вентиляции, адаптивное управление, прогнозирование обмерзания, ПЛК.

Keywords: Automation, heat recovery, heat exchanger freezing, ventilation automation, adaptive control, freezing prediction, PLC.

Введение. Рекуперативные теплообменные устройства (рекуператоры) широко применяются в современных системах вентиляции для снижения теплопотерь при обмене воздуха. Особенно актуально их использование в климатических зонах с длительными периодами низких температур, где разница температур приточного и вытяжного воздуха может превышать 50 °C [2,3]. Однако эксплуатация рекуператоров влажного воздуха зимой сопряжена с одной критической проблемой – образованием льда на поверхности теплообменных пластин, что приводит к росту аэродинамического сопротивления, снижению эффективности и даже полной блокировке воздушного потока [4,5].

Стандартные подходы к предотвращению обмерзания (например, постоянный байпас или подогрев) сопряжены с потерей энергоэффективности. В связи с этим требуется более интеллектуальная, адаптивная система управления, способная опережающе выявлять угрозу обмерзания и выбирать оптимальную тактику реагирования с минимальным ущербом для



энергобаланса. Такая система может быть реализована на базе многоуровневой архитектуры автоматизации, объединяющей надёжный полевой уровень, автономный контроллерный уровень и гибкий операторский уровень с возможностями анализа и интеграции [6,7].

Основной материал статьи.

В предыдущей статье [1] составлена структурная схема системы автоматизации (рисунок 1).

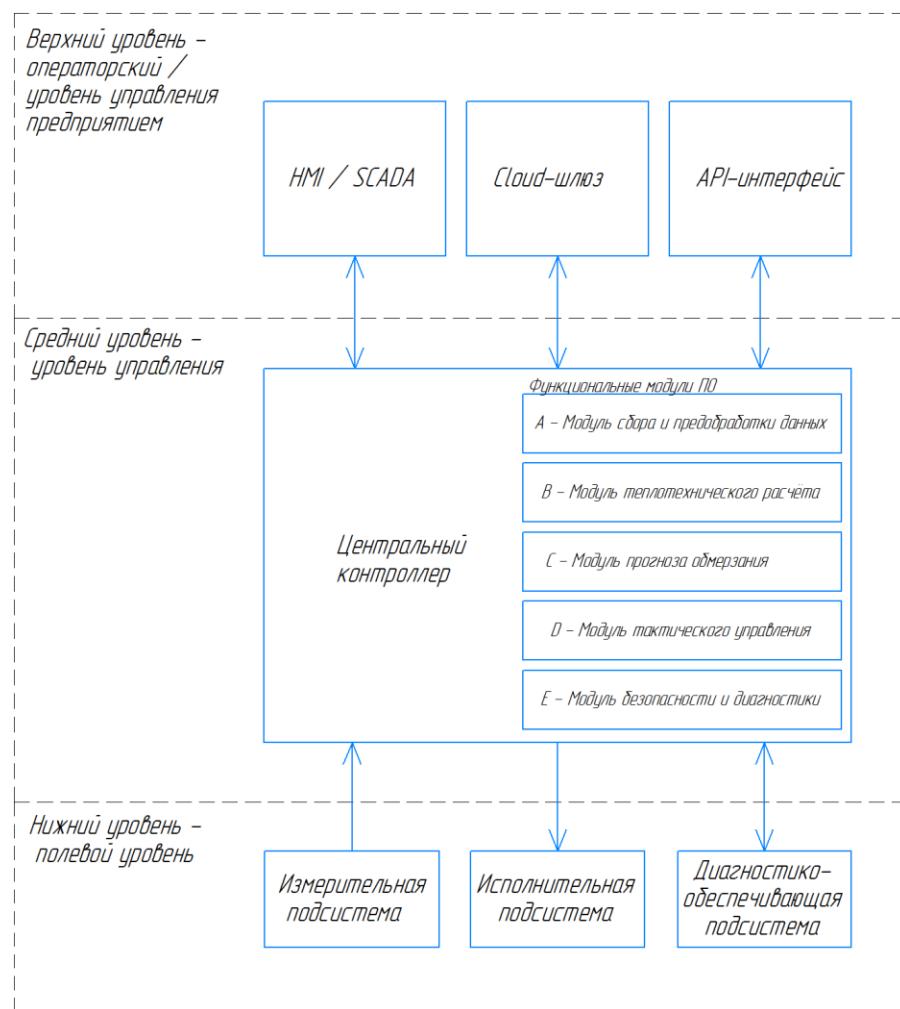


Рисунок 1 – Структурная схема системы автоматизации

Рассмотрим уровни подробнее.

Нижний уровень – полевой уровень (Field Level) обеспечивает непосредственное взаимодействие с технологическим процессом. Его функционирование строится на трёх взаимосвязанных подсистемах: измерительной, исполнительной и диагностико-обеспечивающей.

Измерительная подсистема.

Ключевым условием для эффективного управления рекуперацией и прогнозирования обмерзания является высокая точность и достоверность измерений. В рассматриваемой системе применяются следующие параметры и датчики:

1) Температура наружного (T_1) и вытяжного (T_2) воздуха – измеряются термометрами сопротивления Pt1000 класса А (диапазон $-50\dots+70$ °C), обеспечивающими минимальный дрейф и стабильность в течение всего срока службы.



2) Температура поверхности рекуператора (T_3) – критический параметр для раннего обнаружения локального переохлаждения. Используются миниатюрные тонкоплёночные Pt1000 (например, Negaeus STS010-2B20), установленные непосредственно в фрезерованные пазы (глубина 1 мм) на поверхности крайних пластин. Для обеспечения теплового контакта применяется термопаста с высокой теплопроводностью (Arctic MX-4, $\lambda = 8.5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). Установка двух датчиков в разных точках вводит функцию резервирования и повышает достоверность диагностики.

3) Относительная влажность (ϕ_1, ϕ_2) – измеряется цифровым гигрометром SENSIRION SHT45, обладающим встроенной температурной компенсацией и функцией самоочистки: кратковременный нагрев сенсора до 120 °C позволяет испарять конденсат и предотвращать дрейф показаний во влажной среде.

4) Перепад давления на рекуператоре (ΔP) – измеряется цифровым датчиком BD SENSORS BD11 с точностью 0.5 % от диапазона (0–500 Па). Особое внимание уделено монтажу импульсных трубок: их уклон (3° в сторону дренажных кранов) предотвращает скопление конденсата и искажение показаний.

5) Расходы воздуха (Q_1, Q_2) и индекс загрязнения – косвенные параметры, вычисляемые на контроллерном уровне на основе ΔP , температуры и давления, а также модели аэродинамического сопротивления.

Кабельная инфраструктура спроектирована с учётом требований электромагнитной совместимости: экранированные кабели управления и связи прокладываются отдельно от силовых трасс (расстояние $\geq 300 \text{ мм}$), экраны заземляются со стороны шкафа.

Исполнительная подсистема.

Управляющие воздействия реализуются через следующие механизмы:

1) Байпасный клапан с электроприводом – поворотный клапан ($\varnothing 200 \text{ мм}$) с приводом LM24-A-S-TP (5 Н·м, 150 с хода, 0–10 В). Наличие концевых выключателей позволяет контролировать фактическое положение и диагностировать заливание.

2) Частотные преобразователи вентиляторов (Danfoss FC102) – обеспечивают плавную регулировку производительности (с ограничением минимума 20 % от номинала) и интеграцию в промышленные сети (Modbus RTU, PROFIBUS DP).

3) Электрический подогреватель (ТЭН) – мощностью 1–1.5 кВт, включается точечно при угрозе обмерзания. Регулирование реализуется либо импульсно (ШИМ, 0.1 Гц), либо фазово (симисторные реле). Обязательна защита по температуре (отключение при превышении 80 °C).

4) Заслонка подмеса тёплого воздуха из помещения – используется в комбинации с байпасом для снижения энергозатрат на подогрев.

Все исполнительные механизмы оснащаются ручными дублёрами, что обеспечивает возможность обслуживания при отключении автоматики.

Диагностико-обеспечивающая подсистема.

Надёжность системы повышается за счёт внедрения цифровых диагностических средств:

1) IO-Link Master (например, ifm AL1332) позволяет подключать «умные» датчики (SHT45, BD11) и получать не только измеренные значения, но и диагностические флаги: обрыв, КЗ, выход за диапазон, износ сенсора.

2) Блок бесперебойного питания (Mean Well RSP-200-24) гарантирует работу системы не менее 30 минут при пропадании сетевого питания, передавая соответствующий сигнал в ПЛК.

3) Молниезащита и УЗИП класса II на всех линиях (питание 24 В, RS-485) обеспечивают устойчивость к импульсным перенапряжениям.

Таким образом, полевой уровень сочетает в себе высокую точность измерений, модульность исполнительных устройств и расширенную диагностику – всё это создаёт основу для принятия обоснованных управляющих решений.



Средний уровень – уровень управления является «мозгом» системы. Он реализован на базе промышленного программируемого логического контроллера (ПЛК) и функционирует автономно – даже при потере связи с операторским уровнем.

Обработка данных и расчёт параметров.

ПЛК обеспечивает:

- 1) Фильтрацию и валидацию входных сигналов (например, отбраковка резких скачков T_3 при отсутствии корреляции с φ_1 и ΔP).
- 2) Компенсацию измерений по барометрическому давлению и высоте установки.
- 3) Расчёт ключевых технологических показателей:
 - эффективность рекуперации:

$$\eta = \frac{T_{2,out} - T_1}{T_2 - T_1}$$

где $T_{2,out}$ может измеряться напрямую или оцениваться:

$$T_{2,out}^{\text{est}} = T_1 + \eta_{\text{est}} \cdot (T_2 - T_1), \quad \eta_{\text{est}} = 0,8 \dots 0,85;$$

– температура точки росы – по формуле Бака (точность $\pm 0,1$ °C);

– минимальная температура поверхности рекуператора:

$$T_{\text{surf,min}} \approx T_2 - \eta_{\text{est}} \cdot (T_2 - T_1)$$

Эти расчёты позволяют оценить, насколько близко система подошла к границе конденсации и замерзания.

Диагностика и прогнозирование обмерзания.

Риск обмерзания оценивается на основе трёх уровней анализа:

Пороговые правила (например: если $T_{\text{surf}} < 0$ °C и $\varphi_1 > 65\%$, то риск – «средний»).

Динамические признаки (рост $\Delta P > 15\%$ за 10 минут; снижение $T_3 < -0,5$ °C при стабильных T_1 и φ_1 – свидетельствует о начале локального обледенения).

Машинно-обученная модель – бинарный классификатор (формат ONNX), обученный на исторических данных по T_1 , T_2 , T_3 , φ_1 , φ_2 , ΔP и фактическим событиям обмерзания. Модель может быть развернута даже на Raspberry Pi 4 в связке с CODESYS и RT-Preempt ядром.

На основе оценки риска система переходит в один из трёх режимов:

- 1) NORMAL – максимальная эффективность, $\eta \approx 80\text{--}85\%$.
- 2) PREVENT – профилактика: байпас 20–30 %, снижение Q на 15 %, возможный лёгкий подмес тёплого воздуха.
- 3) DEFROST – аварийная защита: байпас 50–70 %, ТЭН включён, Q снижена до 50 %, возможна пауза на 5–10 минут для разморозки.

Переходы между режимами реализуются с плавным «разгоном» (ramping) – для исключения гидравлических ударов и резких скачков нагрузки на вентиляторы.

Верхний уровень – операторский не управляет процессом напрямую, но обеспечивает полную прозрачность работы, поддержку принятия решений и долгосрочную оптимизацию.

Визуализация реализуется через промышленные HMI или ПК с SCADA-системами:

- 1) Siemens WinCC Advanced – для предприятий, использующих экосистему TIA.
- 2) Ignition SCADA – кроссплатформенное решение с веб-доступом и мощными аналитическими инструментами.
- 3) ОВЕН СКАДА – экономичный вариант для совместимости с отечественным ПЛК.
- 4) Grafana + InfluxDB – open-source альтернатива для бюджетных проектов.

Функционал включает:

- 1) Анимированную мнемосхему с отображением потоков, клапанов, статусов.
- 2) Тренды в реальном времени и из архива (ΔP , T_3 , Risk_Index, η).
- 3) Цветовую карту рисков обмерзания по зонам рекуператора.
- 4) Ручное вмешательство (только в сервисных режимах и с двойным подтверждением).



Заключение

Представленная архитектура демонстрирует современный подход к автоматизации рекуперативных установок – от «железа» до облачной аналитики. Её ключевые преимущества:

1) Многоуровневость и автономность – уровень 2 способен работать без подключения к уровню 3 до 72 часов, что критично для объектов с нестабильной сетевой инфраструктурой.

2) Прогнозирующая защита – сочетание физических моделей и машинного обучения позволяет предотвращать обмерзание, а не реагировать на него постфактум.

3) Энергооптимизация – адаптивный выбор тактик (байпас, подмес, подогрев) минимизирует потери при обеспечении безопасности.

4) Открытость и масштабируемость – поддержка open-source решений (Grafana, InfluxDB, Raspberry Pi) снижает ТСО и позволяет легко масштабировать систему на парк установок.

5) Цифровая трансформация – интеграция с ERP, BMS и облаком превращает вентиляционную установку из «энергозатратного оборудования» в элемент цифрового энергоучёта и устойчивого развития.

Реализация подобной системы уже сегодня возможна на российском и международном оборудовании и открывает путь к созданию «умных» инженерных систем нового поколения – энергоэффективных, отказоустойчивых и управляемых на основе данных.

Список литературы:

1. Ахмирова Л.Р. Система адаптивной автоматизации рекуперативных установок с прогнозированием обмерзания / Л.Р. Ахмирова // Флагман науки: научный журнал. Ноябрь 2025. – СПб., Изд. ГНИИ "Нацразвитие" – 2025. №11 (34).
2. Кирсанов В.В., Способ повышения эффективности рекуперации теплоты в условиях инеообразования // АгроЭнергия. 2017. №4 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-povysheniya-effektivnosti-rekuperatsii-teploty-v-usloviyah-ineeobrazovaniya> (дата обращения: 11.11.2025).
3. Проценко В. П. Энергетическая эффективность систем утилизации теплоты вентиляционных выбросов с помощью тепловых насосов // Промышленная энергетика. 1986. №11. С. 45-48.
4. Печенегов Ю.Я. Технико-экономический анализ и методика расчета оптимизированных пластинчатых теплоплоутилизаторов// Промышленная энергетика. 2012. №3. С.46-49.
5. Степаненко, М.Н., Шелгинский А.Я. Анализ эффективности использования теплоты вентиляционных выбросов в системах вентиляции здания // Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности: Тез. 4 МНПК. –СПб. 2013. С. 117 – 123.
6. СП 60.13330.2020. Актуализированная редакция СНиП 41–01–2003. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Введ. 2021– 07 –01. – М.: Минрегион России, 2020. – 115 с.
7. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов: ГОСТ Р 59795-2021. – Введ. с 30.04.2022. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 27 с.

