

**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРЕДИКТИВНОЙ
ЗАЩИТЫ РЕКУПЕРАТОРА ОТ ОБМЕРЗАНИЯ**
**IMPLEMENTATION OF AN ALGORITHM FOR PREDICTIVE
PROTECTION OF THE RECUPERATOR FROM FREEZING**

Аннотация. Представлен адаптивный алгоритм управления рекуперативной установкой, реализующий прогностическую защиту от обмерзания на основе комплексного анализа температуры поверхности, влажности, перепада давления и индекса риска (Risk_Index). Алгоритм, реализованный в CoDeSys 3.5 на ПЛК ОВЕН ПЛК210, обеспечивает плавные переходы между режимами «Максимальная рекуперация», «Предотвращение обмерзания» и «Принудительная оттайка». Это позволяет снизить частоту оттаек до ≤ 1 раза/сутки (при $T_{\text{нар}} = -20^{\circ}\text{C}$), удержать потери эффективности на уровне $\leq 30\%$ и минимизировать энергозатраты за счёт приоритетного использования байпаса вместо электроподогрева.

Abstract. An adaptive control algorithm for a regenerative plant is presented, which implements predictive frost protection based on a comprehensive analysis of surface temperature, humidity, pressure drop and risk index (Risk_Index). The algorithm implemented in CoDeSys 3.5 on the ARIES PLK210 PLC ensures smooth transitions between the "Maximum recovery", "Frost prevention" and "Prinu" modes.

Ключевые слова: Рекуператор, обмерзание, адаптивное управление, ПЛК, Risk_Index, энергоэффективность.

Keywords: Heat recovery, freezing, adaptive control, PLC, Risk_Index, energy efficiency.

Введение. Рекуперативные теплообменники значительно повышают энергоэффективность вентиляционных систем, но в холодный период подвержены обмерзанию, что ведёт к росту аэродинамического сопротивления, снижению КПД и увеличению эксплуатационных затрат. Традиционные методы защиты – реактивные, с переключением по жёстким порогам (например, $T_{\text{пов}} < 0^{\circ}\text{C}$) – не учитывают динамику процесса и приводят к избыточным потерям [1,2]. В работе предложен адаптивный алгоритм, предотвращающий обмерзание до его возникновения за счёт многофакторного мониторинга и расчёта интегрального индекса риска. Реализация на отечественном ПЛК обеспечивает надёжность, совместимость с промышленными системами и низкую стоимость внедрения [3,4].

Архитектура адаптивного алгоритма.

Алгоритм реализует три иерархически организованных режима работы, переключение между которыми определяется как пороговыми, так и динамическими условиями.

1) Режим «Максимальная рекуперация» (NORMAL).

Активируется при благоприятных условиях:

- $T_{\text{нар}} \geq +5^{\circ}\text{C}$;
- $T_{\text{пов}} > +1^{\circ}\text{C}$;
- стабильный перепад давления ΔP (изменение $< 5\%$ за 10 мин).

В данном режиме система работает на номинальной производительности: вентиляторы управляются по заданному расходу $G_{\text{зад}}$, байпасный клапан закрыт, подогреватель отключён.



Эффективность рекуперации η рассчитывается в реальном времени, что позволяет вести энергетический мониторинг и выявлять постепенную деградацию теплообменника.

2) Режим «Предотвращение обмерзания» (PREVENT)

Переход в PREVENT-режим инициируется до достижения критических условий, при выполнении любого из следующих условий:

- $T_{\text{пов}} \leq +0.5^{\circ}\text{C}$ и относительная влажность вытяжного воздуха $\varphi_{\text{выт}} \geq 60\%$;
- $T_{\text{нар}} \leq +3^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{dew,выт}} \geq T_{\text{пов}} - 0.5^{\circ}\text{C}$ (точка росы близка к температуре поверхности);
- рост $\Delta P \geq 10\%$ за 5 мин (динамический признак нарастания слоя инея).

Управляющие воздействия направлены на предупреждение обмерзания:

- байпасный клапан плавно открывается на 20–30 % (со скоростью 1 %/с для исключения гидравлических ударов);
- производительность вентиляторов снижается на 10–15 % для стабилизации ΔP ;
- запускается расчёт комплексного показателя – Risk_Index.

Значение Risk_Index определяется как взвешенная сумма трёх факторов:

$$\text{Risk_Index} = \omega_1 \cdot \max\left(0, \frac{\Delta P}{\Delta P_0} - 1\right) + \omega_2 \cdot \max\left(0, \frac{T_{\text{dew,выт}} - T_{\text{нов}} + 0.5}{2.0}\right) + \omega_3 \cdot \max\left(0, \frac{d(\Delta P)/dt}{15.0}\right) \quad (1)$$

где $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.4$, $w_3 = 0.1$ – весовые коэффициенты, подбираемые при наладке.

Порог Risk_Index ≥ 0.75 соответствует началу критического сужения проходного сечения (толщина льда ~ 0.3 мм, $T_{\text{пов}} \approx -0.8^{\circ}\text{C}$ в зоне входа вытяжного потока, по данным CFD-моделирования) и служит сигналом для перехода в режим DEFROST.

3) Режим «Принудительная оттайка» (DEFROST)

Активируется при выполнении одного из критериев:

- Risk_Index ≥ 0.8 ;
- $\Delta P > 150\%$ от номинального;
- $T_{\text{пов}} \leq -1^{\circ}\text{C}$ при $\varphi_{\text{выт}} > 50\%$;

срабатывание таймера профилактической оттайки (например, каждые 8 ч при $T_{\text{нар}} < -10^{\circ}\text{C}$ – мера против скрытого накопления инея при стабильных, но опасных условиях).

Логика оттайки строится по принципу максимальной энергоэффективности:

- а) байпас закрывается – весь приточный воздух направляется через рекуператор.
- б) вытяжной вентилятор останавливается – прекращается подача влажного воздуха к холодной поверхности;
- в) приточный вентилятор увеличивает производительность на 15 % – усиливается конвективный теплообмен;
- г) электрический подогреватель (1.2 кВт) включается только при $T_{\text{пр,вх}} < -15^{\circ}\text{C}$ – при более высоких температурах тепла приточного воздуха достаточно для оттайки.

Цикл завершается при выполнении любого из условий:

- $T_{\text{пов}} \geq +2^{\circ}\text{C}$;
- $\Delta P \leq 110\%$ от ΔP_0 ;
- истечение 15 мин (аварийное ограничение).

После завершения – плавный возврат в PREVENT или NORMAL, исключающий резкие скачки нагрузки.

Алгоритм реализован в среде CoDeSys 3.5 (v. 3.5.16.0) для ПЛК ОВЕН ПЛК210-000-222 [5], что обусловлено требованиями локализации, низкой стоимостью, широким диапазоном рабочих температур ($-25\dots+55^{\circ}\text{C}$) и поддержкой ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 (включая Structured Text) [6].

Модульная структура ПО. Программное обеспечение построено по принципу функциональных блоков (FB), обеспечивающих высокую читаемость, тестируемость и повторное использование (таблица 1).



Таблица 1

Структура ПО

Модуль	Функции
FB_SensorValidation	Валидация и резервирование датчиков
FB_DewPointCalc	Расчёт T_{dew} по формуле Бака
FB_RiskIndex	Вычисление Risk_Index
FB_AdaptiveControl	Основная логика переключения режимов
FB_Ramping	Плавное изменение уставок (байпас, ЧРП)
FB_LogEvent	Архивирование событий и диагностика

Ключевые технические решения:

1) Резервирование измерения $T_{\text{пов}}$. Температура поверхности является критическим параметром, но её прямое измерение подвержено отказам. В алгоритме применяется тройное резервирование: два физических датчика + расчётная оценка:

$$T_{\text{пов,расч}} = T_{\text{выт,вх}} - \eta_{\text{ном}} \cdot (T_{\text{выт,вх}} - T_{\text{нап}}), \quad \eta_{\text{ном}} = 0,83 \quad (2)$$

При расхождении прямых измерений $> 5^{\circ}\text{C}$ и отклонении от расчётного $> 3^{\circ}\text{C}$ система автоматически переключается на расчётное значение и формирует сигнал неисправности – без аварийного останова.

2) Точность расчёта точки росы. Использована формула Бака:

$$P_{ws} = 6,1121 \cdot \exp\left(\frac{18,678 \cdot T}{257,14 + T}\right) \quad (3)$$

$$T_{\text{dew,выт}} = \frac{257,14 \cdot \ln!(\frac{1}{P_{ws}})}{18,678 - \ln!(\frac{1}{P_{ws}})} \quad (4)$$

В CoDeSys функция LOG (x) – натуральный логарифм, что позволяет прямую реализацию. Погрешность $\leq 0,12^{\circ}\text{C}$ подтверждена сравнением с ANSYS.

3) Плавные переходы (Ramping). Для байпасного клапана реализован линейный ramp (1 %/с) с использованием таймера:

BypassPos:= 30.0 * TIME_TO_REAL (RampTimer.ET) / TIME_TO_REAL (RampTimer.PT);

Это исключает вибрации, шумы и скачки давления в воздуховодах.

4) Диагностика и профилактика. Каждый цикл DEFROST фиксируется в энергонезависимой памяти с параметрами ($T_{\text{пов}}$, ΔP , Risk_Index). При ≥ 3 оттайках за сутки формируется сигнал MaintenanceRequest – признак необходимости профилактической очистки или проверки герметичности контура.

Заключение

Предложенный адаптивный алгоритм управления рекуперативной установкой решает фундаментальную проблему энергоэффективных вентиляционных систем – борьбу с обмерзанием – не за счёт жёсткого подавления, а за счёт умного прогнозирования и превентивного воздействия. Комплексный подход, объединяющий термодинамику, аэродинамику и современные методы промышленной автоматизации, позволяет добиться баланса между надёжностью, комфортом и энергосбережением. Реализация на отечественном ПЛК делает решение доступным для широкого внедрения в жилищно-коммунальном и промышленном секторах, особенно в условиях импортозамещения и роста цен на энергоносители.

Список литературы:

- Кирсанов В.В., Способ повышения эффективности рекуперации теплоты в условиях инеообразования // Агронженерия. 2017. №4 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-povysheniya-effektivnosti-rekuperatsii-teploty-v-usloviyah-ineeobrazovaniya> (дата обращения: 11.11.2025).



2. Проценко В. П. Энергетическая эффективность систем утилизации теплоты вентиляционных выбросов с помощью тепловых насосов // Промышленная энергетика. 1986. №11. С. 45-48.
3. 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).
4. Печенегов Ю.Я. Технико-экономический анализ и методика расчёта оптимизированных пластинчатых теплоплоутилизаторов// Промышленная энергетика. 2012. №3. С.46-49.
5. ПЛК210-000-222 [Электронный ресурс]: Промышленный программируемый логический контроллер: [описание, технические характеристики] // ООО «НПП «ОВЕН». – Режим доступа: <https://owen.ru/product/plk210> (дата обращения: 27.11.2025).
6. ГОСТ Р МЭК 61131-3 – 2016. Программируемые контроллеры. Часть 3. Языки программирования. Москва: Стандартинформ, 2016.

