

Хобин В.А., Мазур А.В., Степанов М.Т.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
СРЕДСТВАМИ ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ**

Процессы тепловой обработки составляют значительную часть технологий производства и хранения пищевых продуктов. Являясь весьма энергоемкими, они в значительной степени определяют себестоимость продукции. Важным резервом энергосбережения, не требующего значительных капиталовложений, является ведение технологических процессов (ТП) в энергосберегающих режимах. Однако их практическая реализация сдерживается весьма важным обстоятельством – как правило, энергосбережение возрастает по мере приближения технологических режимов к предельно-допустимым. При этом нарушения границ допусков на изменения регламентированных режимных параметров приводит к потерям, которые могут весьма существенно превышать экономический выигрыш от реализации энергосберегающих режимов. Таким образом, возникает противоречие между выигрышем от энергосбережения и потерями, возникающими из-за нарушений регламентов ведения ТП. Искать компромисс между ними, основываясь на экономических критериях, бесперспективно, т.к. появление нарушений и их экономические последствия не обладают статистической устойчивостью и, кроме того, они могут быть сопряжены с резко негативным влиянием на здоровье людей – потребителей продукции, а также потерей позиций предприятия на рынке.

Разрешить это противоречие, по крайней мере, максимально его сгладить, возможно, совершенствуя системы автоматического управления (САУ) технологическими агрегатами (ТА). При этом главным направлением такого совершенствования должна стать реализация в САУ новой функции – функции гарантированного соблюдения ограничений регламента. Кроме того, для получения максимального эффекта одновременно целесообразно повысить качество реализации традиционной функции САУ – функции регулирования. Она обеспечивает стабилизацию регламентированных параметров процесса, точность которой будет влиять на степень близости рабочих режимов к предельно-допустимым, а, следовательно, и величину энергосбережения.

В качестве примера теплового ТП для демонстрации решения поставленной задачи рассмотрим процесс пастеризации и охлаждения молока в пастеризационно – охлаждающей установке (ПОУ). Для него регламентированы и имеют ограничения следующие технологические переменные:

а) температура пастеризации ( $\theta_n$ ) – ограничение «снизу» – 75 °С. При «недогреве» молока включается его рециркуляция, что приводит к дополнительным затратам энергоносителя, снижению производительности ПОУ и качества готовой продукции;

б) температура охлаждения ( $\theta_o$ ) – ограничение «сверху» – 6 °С. При «недоохлаждении» молока резко сокращаются сроки его хранения.

В традиционных САУ – системах автоматического регулирования (САР) эти переменные поддерживаются в окрестностях фиксированных заданных значений, удаленных от границ на такие расстояния, чтобы при вариациях условий ведения процессов вероятность нарушения ограничений была бы незначительной, такой, чтобы эти нарушения существенно не снижали эффективность процесса.

Целесообразным путем повышения динамической точности стабилизации ре-

гламентированных (регулируемых) переменных, который показал свою эффективность на практике, является путь использования в алгоритмах САУ дополнительной информации о ходе процессов. Она позволяет обеспечить упреждающую реакцию управляющего устройства на возмущения. Для тепловых процессов, оборудование которых представляет собой распределенные в пространстве теплообменники, получение такой информации принципиальных трудностей не вызывает. В зависимости от того, информация о каких переменных используется, САУ строится на основе принципов инвариантности, автономности или каскадности. Так, в САУ рассматриваемой здесь ПОУ целесообразно ввести корректирующие связи, обеспечивающие инвариантность температуры пастеризации от температур молока на входе секции пастеризации горячей воды.

Следует подчеркнуть, что энергетическая эффективность тепловых процессов при прочих равных условиях определяется близостью их рабочих тепловых режимов к предельно-допустимым. Однако по мере приближения рабочих режимов к предельно-допустимым возрастает не только энергетическая эффективность процесса, но одновременно возрастает и вероятность нарушения регламентированными переменными установленных регламентами ограничений. Это противоречие в условиях работы реальных объектов (а не их моделей) в рамках САУ, реализующих только функцию стабилизации, разрешено быть не может. В реальных, изменяющихся непредсказуемым образом условиях работы ПОУ, выполнить требование гарантированного соблюдения установленных регламентом ограничений без введения в САУ функции гарантирования невозможно. САУ, реализующие функцию гарантирования, были названы системами гарантирующего управления (СГУ) [1].

Среди возможных альтернатив построения СГУ в качестве наиболее целесообразного к практическому применению выбран принцип построения СГУ с расчетом допустимого заданного значения  $y^{зд}(t)$  контуру регулирования непосредственно по модели нарушения регламента, в которой математическое ожидание  $m_y(t)$  регламентированной переменной  $y(t) = m_y(t) + \tilde{y}^o(t)$  рассматривается как нестационарная, априори неизвестная функция времени. Для таких условий в общем виде текущее допустимое заданное значение рассчитывается из выражения (имя регламентированной переменной « $y(t)$ » формальное, для взятого примера ТП (ПОУ)  $y(t) \rightarrow \theta_n(t)$  и  $\theta_o(t)$ ):

$$y^{c\ddot{a}\ddot{a}\pm}(t) = y^{\ddot{a}\ddot{a}\pm} \mp \mp \sigma_y(t) \left\| \sqrt{2 \ln \left| \frac{T \sigma_{\dot{y}}(t)}{2\pi \sigma_y(t) \ln P_{\bar{s}}^{\ddot{a}}(y^{\ddot{a}\ddot{a}\pm}, T)} \left\{ \exp \left( -\frac{m_{\dot{y}}^2(t)}{2\sigma_{\dot{y}}^2(t)} \right) \mp \frac{\sqrt{2\pi} m_{\dot{y}}(t)}{\sigma_{\dot{y}}(t)} \hat{O} \left( \frac{m_{\dot{y}}(t)}{\sigma_{\dot{y}}(t)} \right) \right\} \right|} \right\|, \quad (1)$$

где  $P_{\bar{s}}^{\ddot{a}}(y^{\ddot{a}\ddot{a}\pm}, T)$  – наперед заданное (гарантируемое) значение вероятности отсутствия нарушений ограничений  $y^{\ddot{a}\ddot{a}\pm}$  на интервале времени  $T$ ;  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{\dot{y}}$  – оценки среднеквадратических отклонений центрированной случайной составляющей  $\tilde{y}^o(t)$ , вычисляемые на скользящем интервале времени  $T_{кст} \leq T$  ( $T_{кст}$  – интервал квазистационарности – минимальный интервал  $T$ , для которого еще выполняется гипотеза о квазистационарности  $\tilde{y}^o(t)$  на этом интервале времени).

$$\sigma_y = \frac{1}{T_{\dot{e}\ddot{n}o}} \int_t^{t+T_{\dot{e}\ddot{n}o}} (y(t) - m_y)^2 dt ; \quad \sigma_{\dot{y}} = \frac{1}{T_{\dot{e}\ddot{n}o}} \int_t^{t+T_{\dot{e}\ddot{n}o}} (\dot{y}(t) - m_{\dot{y}})^2 dt, \quad (2)$$

где  $m_y(t)$ ,  $m_{\dot{y}}(t)$  – оценки изменяющегося математического ожидания и его первой производной, вычисляемые на скользящем интервале времени  $T_m \ll T_{кст}$ :

$$m_y = \frac{1}{T_{\text{энб}}} \int_t^{t+T_{\text{энб}}} y(t)dt, \quad m_{\dot{y}} = \frac{1}{T_{\text{энб}}} \int_t^{t+T_{\text{энб}}} \dot{y}(t)dt. \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) определяют структурную схему СГУ. При этом, по сути, разработанные на предыдущем этапе структурные схемы САУ повышенной динамической точности наращиваются модулями оценки вероятностных характеристик (МОВХ), реализующих выражения (2) и (3), и расчета допустимого заданного значения (МРЗД), реализующих выражение (1). Количество указанных модулей соответствует количеству регламентированных переменных процесса. Структурная схема СГУ рассматриваемым тепловым процессом, реализующая функцию регулирования (с повышенной динамической точностью) и функцию гарантирования приведены на рис. 1.

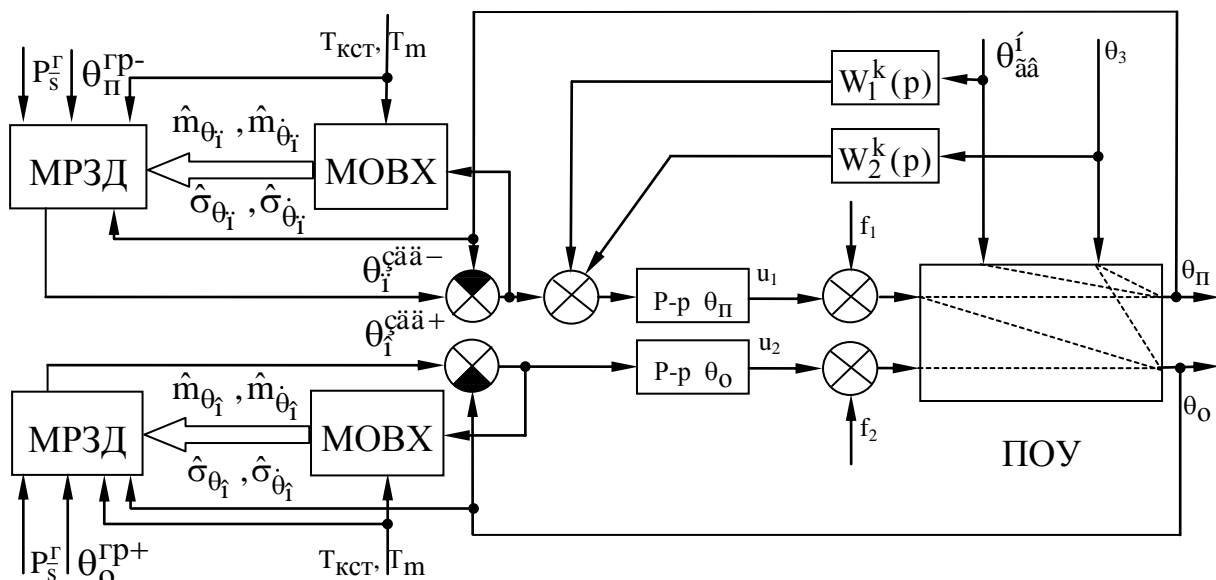


Рисунок 1 – Структурная схема СГУ процессами пастеризации и охлаждения молока в ПОУ ( $\theta_3$  – температура молока на входе секции пастеризации;  $\theta_{\text{аа}}^i$  – температура греющей воды)

Табл. 1 и рис. 2 иллюстрируют некоторые результаты исследований энергетической эффективности процессов в ПОУ с различными вариантами САУ, проведенные методами имитационного моделирования [2]. Они показали, что при управлении тепловыми процессами на основе СГУ, за счет повышения динамической точности функции регулирования и целенаправленного непрерывного перерасчета текущих заданных значений – реализации функции гарантирования, удастся получить предельно-достижимую (в текущих условиях) энергетическую эффективность процесса при гарантированном соблюдении ограничений, установленных его регламентами

Анализ большого числа других ТП пищевых производств, относящихся к классу тепловых, позволяет сделать вывод об общности задачи совершенствования САУ тепловыми ТП, как эффективного пути повышения их энергетической эффективности. Эта общность обуславливается:

а) общими особенностями тепловых процессов пищевых производств, в частности: наличием взаимозависимости тепловых режимов в различных частях тепловых аппаратов из-за контуров утилизации и наличием ограничений на регламентированные переменные при тепловой обработке сырья;

б) общностью природы ограничений на регламенты ведения процессов, обусловленных, прежде всего, биологическими изменениями в пищевых продуктах при тепловой обработке;

в) общностью путей совершенствования САУ этими процессами, которые сводятся к максимально допустимому приближению регламентированных переменных к своим ограничениям при гарантировании ненарушения этих ограничений с наперед заданной вероятностью.

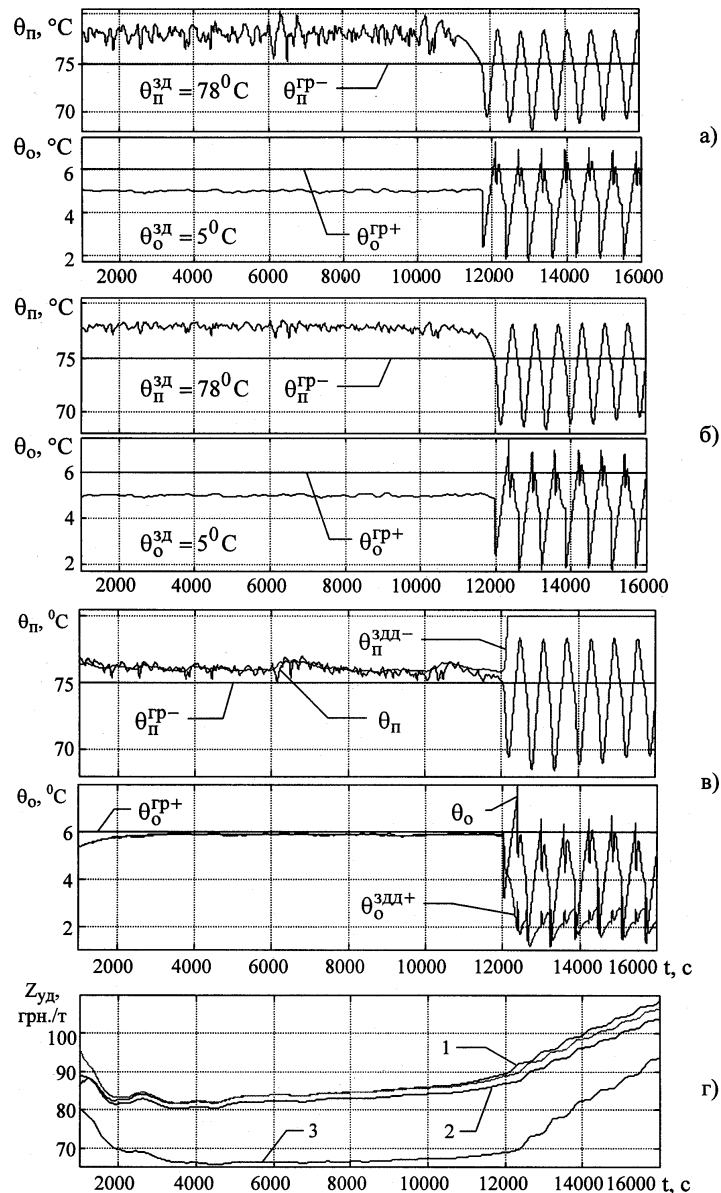


Рисунок 2 – Фрагменты моделирования различных вариантов САУ ПОУ:

- а) САУ простейшей структуры; б) САУ инвариантная к  $\theta_3$  и  $\theta_{aa}^i$ ; в) СГУ с САУ по п. б); г) динамика изменения удельных энергозатрат на пастеризацию и охлаждение молока для различных вариантов САУ

Таблица 1 – Результаты сравнительного исследования энергетической эффективности пастеризации и охлаждения молока для различных вариантов САУ (см. \*)

Вид САУ	Кол-во обработанного молока, кг	Расход энергоносителей и затраты на них						Затраты на пастеризацию		Снижение удел. энергозагр., %
		пар		вода		рассол		общие, грн.	удельные, грн./т	
		кг	грн.	кг	грн.	кг	грн.			
	25018	2364	478	56258	113	70952	2129	2717	108,7	0
	25038	2301	465	56192	112	69562	2087	2664	106,4	2,1
	25120	2208	446	56118	112	59625	1789	2347	93,4	14,1

\* 1. САУ простейшей структуры.

2. САУ инвариантная относительно  $\theta_3$  и  $(\theta_{aa}^i)$ .

3. СГУ с САУ по п. 2, гарантирование по переменным  $\theta_{II}$  и  $\theta_0$ .

#### Литература

1. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления: научные основы // Автоматизация виробничих процесів. – К., 2004. – № 2(19). – С. 62–69.

2. Мазур О.В., Степанов М.Т. Моделирование процесів управління пастеризаційно-охолоджувальною установкою у середовищі MATLAB // Наук. пр. ОДАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2001. – Вип. 22. – С. 124–128.

УДК 664.046 : 65.011.46

Хобін В.А., Мазур О.В., Степанов М.Т.

### **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАСОБАМИ ГАРАНТУЮЧОГО УПРАВЛІННЯ**

Розглядаються нові можливості підвищення енергетичної ефективності теплових процесів з обмеженнями в технологічних регламентах за рахунок застосування для управління процесами систем гарантуючого управління.