

Более общую модель электромагнитного поля можно получить при вращении ротора с переменной скоростью $\omega(t)$.

Таким образом, если на вращающемся роторе установить несколько электродов, заряженных выпрямленным напряжением, и, изменяя параметры α , ω , a , h , можно получить электромагнитное поле заданной формы (дискретное или непрерывное), определенной амплитуды, частоты и фазы.

Литература

1. Машек Ч.М., Сеницын Е.В., Машек А.С. Расчет электрического поля системы технологической транспортировки порошков - Ленинград:Известия Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова, вып.166,1983, с.104.
2. Н.П. Верещагин, В.И.Левитов, Г.З.Мирзабекян, М.И.Пашин. Основы электрогазодинамики дисперсных систем- М.: Энергия.1984с. 324.
3. Балага М.К., Литинский Г.А.Электро-антисептирование в пищевой промышленности- Кишинев : Штиница,1988,с.180
4. Lord P.R. Elektrostatic forces in Processing Textile Materials,Textile MFR,V.88 ,nov.,1982

УДК 664.046:65.011.46

СИСТЕМЫ ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СУШКИ ЗЕРНА

Хобин В.А., д-р техн. наук, профессор, Степанов М.Т., канд. техн. наук, доцент
Одесская национальная академия пищевых технологий

Рассматривается применение систем гарантирующего управления для повышения энергетической эффективности процессов сушки зерна. Алгоритмы таких систем позволяют решить две новые задачи: 1) перераспределение ресурсов управления между температурами зерна и сушильных агентов; 2) ведение процесса в окрестности границ допустимых и энергоэффективных режимов сушки.

Application of guaranteeing control systems for increase of power efficiency of grain drying processes is considered. Algorithms of such systems allow to solve two new problems: 1) redistribution of resources of management between temperatures of a grain and drying agents; 2) conducting process in a vicinity of borders allowable and power-efficacious drying conditions.

Ключевые слова: системы гарантирующего управления, сушка, зерно, энергетическая эффективность, управление.

Процесс сушки зерна требует значительных энергетических затрат. Предприятия часто стремятся минимизировать его применение за счет поиска компромисса между снижением прибыли из-за потерь сухой массы и качества зерна при хранении, с одной стороны, и затратами на процесс сушки, с другой. Снижение удельных энергетических затрат на сушку и соблюдение всех требований технологии при реализации процесса является комплексной проблемой и, в общем случае, требует усилий разработчиков техники, технологии, систем автоматизации. Не оспаривая потенциальных возможностей двух первых направлений, мы считаем, что на данном этапе наиболее значительный экономический эффект может быть получен за счет оснащения зерносушилок современными системами автоматического управления (САУ). Поэтому цель исследования – повысить эффективность работы шахтных прямоточных зерносушилок, снизив удельные затраты энергии, потери качества зерна и повысив производительность, за счет совершенствования структуры и алгоритмов систем автоматизации. В качестве основы такого совершенствования выбраны принципы, разработанные в классе систем гарантирующего управления (СГУ) и систем с прогнозированием.

Сушилка является сложным объектом для эффективного управления. Эта сложность объясняется следующими основными причинами (здесь и далее – на примере зерносушилки ДСП-32от):

а) на режим работы зерносушилок технологическим регламентом наложено минимум пять ограничений: на температуры сушильных агентов (СА) и зерна для первой и второй зон и на влажность зерна после сушки. При этом количество управляющих воздействий, реально доступных для воздействия на процесс, только три: изменение расхода топлива, подаваемого в топку, изменение степени подсоса наружного воздуха к СА, подаваемому в первую зону сушки, и изменение производительности сушилки. Очевидно, что при традиционных подходах к управлению гарантировать их одновременное выполнение при изменениях условий сушки невозможно;

б) удельные энергозатраты на сушку будут тем меньше, чем ближе значения режимных параметров будут

приближаться к своим ограничениям, но нарушения этих ограничений будут приводить к существенным потерям качества зерна. Для максимально достижимой эффективности процесса сушки необходимо искать компромисс между этими взаимно противоречивыми факторами. Очевидно, что он будет изменяться, и будет зависеть от конкретных условий сушки.

САУ процессом сушки, реализованная, как СГУ, см. [1], позволяет преодолеть описанные выше проблемы и повысить эффективность процесса сушки при строгом соблюдении технологических регламентов. В рамках принципов гарантирования, этой САУ реализуются следующие функции:

- а) переключения ресурсов управляющих воздействий с регулирования температуры СА на температуры зерна (и, наоборот) по результатам оценки вероятностей нарушения ими соответствующих ограничений;
- б) регулирования влажности зерна на выходе зерносушилки изменением ее производительности, обеспечивая устойчивость и качество процесса регулирования за счет применения специальных алгоритмов с прогнозированием;
- в) оптимизации процесса по критерию минимума удельных энергозатрат за счет ведения его в режимах, максимально близких к ограничениям регламента и, одновременно, при гарантировании их соблюдения с наперед заданной вероятностью.

Структурная схема СГУ для сушилки ДСП-32от приведена на рис. 1.

Модули МРЗД рассчитывают допустимые заданные значения для каждой регулируемой переменной (для общности они обозначены переменной $\bar{y} = \{y_i\}_{i=1,5} = \{T_{ca1}, T_{ca2}, T_{z1}, T_{z2}, W_{зк}\}^T$:

$$y_i^{зад+} = y_i^{пр+} - \hat{\sigma}_{y_i}(t) \sqrt{2 \ln \left[\frac{-T \hat{\sigma}_{y_i}(t)}{2\pi \hat{\sigma}_{y_i}(t) \ln P_{\bar{y}}^c(y_i^{пр+}, T)} \left\{ \exp\left(-\frac{\dot{y}_i^2(t)}{2\hat{\sigma}_{y_i}^2(t)}\right) - \frac{\sqrt{2\pi} \dot{y}_i(t)}{\hat{\sigma}_{y_i}(t)} \Phi\left(-\frac{\dot{y}_i(t)}{\hat{\sigma}_{y_i}(t)}\right) \right\} \right]}$$

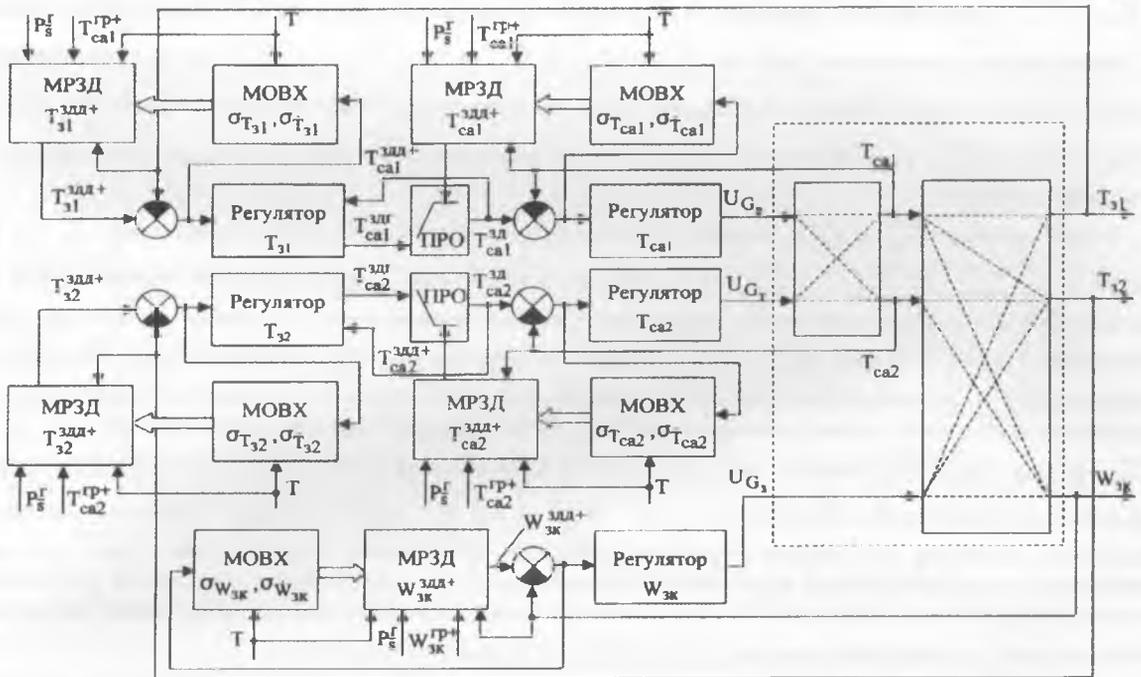


Рис. 1 - Структурная схема СГУ зерносушилкой ДСП-32от (МРЗД – модуль расчета допустимого заданного значения, MOVX – модуль оценки вероятностных характеристик, ПРО – повторители с регулируемым верхним ограничением)

где $y_i^{пр+}$ – значение верхней границы регламента;

$P_{\bar{y}}^c(y_i^{пр+}, T)$ – заданная вероятность отсутствия выхода $y_i(t)$ за $y_i^{пр+}$;

T – скользящий интервал времени на котором СГУ гарантируется отсутствие выхода $y_i(t)$ за $y_i^{пр+}$ с вероятностью $P_{\bar{y}}^c(y_i^{пр+}, T)$;

$\hat{m}_{y_i}(t)$ и $\hat{\sigma}_{y_i}(t)$, $\hat{m}_{\dot{y}_i}(t)$ и $\hat{\sigma}_{\dot{y}_i}(t)$ – оценки математических ожиданий и среднеквадратических отклонений, рассчитываемых на скользящих интервалах времени в MOVX:

$$\hat{m}_{y_i}(t) = \frac{1}{T_{ксм}^m} \int_t^{t+T_{ксм}^m} y_i(t) dt; \quad \hat{m}_{\dot{y}_i}(t) = \frac{1}{T_{ксм}^m} \int_t^{t+T_{ксм}^m} \dot{y}_i(t) dt; \quad T_{ксм}^m \ll T_{ксм};$$

$$\hat{\sigma}_{y_i}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{кст}^m} \int_t^{t+T_{кст}^m} (y_i(t) - \hat{m}_{y_i}(t))^2 dt}; \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}_i}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{кст}^m} \int_t^{t+T_{кст}^m} (d(y_i(t) - \hat{m}_{y_i}(t))/dt)^2 dt},$$

где $T_{кст}^m$ и $T_{кст}$ – интервалы квазистационарности $\hat{m}_{y_i}(t)$ и $\hat{m}_{\dot{y}_i}(t)$, $\hat{\sigma}_{y_i}(t)$ и $\hat{\sigma}_{\dot{y}_i}(t)$.

Работа подсистемы управления конечной влажностью зерна $W_{зк}$ не требует дополнительных комментариев, т.к. она имеет автономный, выделенный только для этого ресурс управления – изменение производительности зерносушилки G_3 . Управление температурами СА и зерна ведется в условиях совместного использования ресурсов управления – расхода топлива G_7 и подсоса атмосферного воздуха G_8 , что требует пояснений.

Регуляторы температуры СА и зерна (в соответствующих зонах) включены каскадно через повторители с регулируемым верхним ограничением (ПРО). При этом значения этих ограничений устанавливаются на уровнях T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} . Управляющие воздействия главных регуляторов (регуляторов температур зерна T_{31} и T_{32}), когда их контура регулирования замкнуты, представляют собой такие заданные значения T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} вспомогательным регуляторам, при которых их регулируемые переменные T_{31} и T_{32} будут равны своим заданным значениям, т.е. $T_{31} \approx T_{31}^{3dd+}$ и $T_{32} \approx T_{32}^{3dd+}$.

Когда значения T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} меньше своих предельно допустимых значений T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} , т.е. $T_{CA1}^{3dd+} < T_{CA1}^{3dd+}$ и $T_{CA2}^{3dd+} < T_{CA2}^{3dd+}$, то регуляторы температур СА будут обеспечивать их поддержание равными $T_{CA1} \approx T_{CA1}^{3dd+}$ и $T_{CA2} \approx T_{CA2}^{3dd+}$. Такая ситуация возникает, если вероятности нарушения допустимых границ температурами СА, т.е. вероятности возникновения событий $S_{CA1} \rightarrow T_{CA1} > T_{CA1}^{3dd+}$ и $S_{CA2} \rightarrow T_{CA2} > T_{CA2}^{3dd+}$ меньше, чем вероятности нарушения допустимых границ температурами зерна, т.е. вероятности возникновения событий $S_{31} \rightarrow T_{31} > T_{31}^{3dd+}$ и $S_{32} \rightarrow T_{32} > T_{32}^{3dd+}$. Следует отметить, что при этом каскадные структуры регуляторов работают по своей классической схеме.

Когда значения T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} оказываются больше своих предельно-допустимых значений T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} , т.е. $T_{CA1}^{3dd+} > T_{CA1}^{3dd+}$ и $T_{CA2}^{3dd+} > T_{CA2}^{3dd+}$, то на выходе повторителей с регулируемым ограничением будут устанавливаться значения переменных, равные вычисленным ограничениям на заданные значения регуляторам температур СА, т.е. значения T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} . Именно в окрестностях этих значений и будут поддерживаться температуры СА, а температуры зерна будут изменяться «произвольно», т.к. в данной ситуации вероятности нарушения допустимых границ температурами СА, т.е. вероятности возникновения событий $S_{CA1} \rightarrow T_{CA1} > T_{CA1}^{3dd+}$, $S_{CA2} \rightarrow T_{CA2} > T_{CA2}^{3dd+}$ больше, чем вероятности нарушения допустимых границ температурами зерна, т.е. вероятности возникновения событий $S_{31} \rightarrow T_{31} > T_{31}^{3dd+}$ и $S_{32} \rightarrow T_{32} > T_{32}^{3dd+}$. Следует отметить, что при этом каскадные структуры регуляторов перестают работать, т.к. главные обратные связи через регуляторы температур зерна размыкаются из-за работы ограничителей. Для подготовки к замыканию этих контуров, точнее для обеспечения «безударности» этого замыкания, необходимо значения интегрирующих составляющих принудительно устанавливать равными T_{CA1}^{3dd+} и T_{CA2}^{3dd+} , непрерывно отслеживая их.

Синтез и анализ представленной системы проводится на имитационной, полнофункциональной модели с распределенными параметрами [2], которая с высокой степенью адекватности воспроизводит во времени процесс работы зерносушилки ДСП-32от. Для оценки эффективности разработанной СГУ был проведен ряд экспериментов, включающий сравнительный анализ ее работы с работой штатной системы управления, в которой температуры СА по зонам стабилизируются регуляторами на предельно допустимых уровнях. Сравнительный анализ проводился при следующих условиях: $T_{ca1}^{2p+} = 130$ °С, $T_{ca2}^{2p+} = 150$ °С, $T_{31}^{2p+} = T_{32}^{2p+} = 50$ °С, $W_{зк}^{2p+} = 14,5$ %, $W_{зк}^{3p+} = 13,5$ %. Параметры зерна, идущего на сушку, окружающего воздуха и топлива изменялись в соответствие с рисунком 2.

Фрагменты моделирования штатной системы управления для всех трех вариантов изменения параметров зерна, идущего на сушку, окружающего воздуха и топлива, без вмешательства оператора зерносушилки в процесс управления, приведены на рис. 3.

Важно обратить внимание, что для этого случая, в ходе специальных машинных экспериментов, для системы были подобраны такие заданные значения температур СА T_{ca1} и T_{ca2} , чтобы при неизменных средних значениях параметров зерна выполнялись бы все заданные регламентом сушки ограничения. Их пришлось

установить значительно ниже допустимых: $T_{ca1} = 100^{\circ}\text{C}$, а $T_{ca2} = 120^{\circ}\text{C}$. Как видно из рисунка, штатная система управления дает достаточно хорошие результаты только в случае, если среднее значение влажности W_m зерна, идущего на сушку, остается неизменным (вариант «а»). В других случаях (варианты «б» и «в») обеспечить соблюдение регламентов не удастся. На рис. 4 приведен фрагмент моделирования СГУ для варианта «в» изменения начальной влажности и температуры зерна. Следует обратить внимание на то, что в СГУ, для выполнения требований гарантированного соблюдения установленных ограничений на температуры нагрева зерна, заданные значения температур T_{ca1} и T_{ca2} СА заранее не рассчитываются. Они определяются автоматически в ходе управления процессом сушки и существенно изменяются, периодически приближаясь к своим предельно допустимым значениям T_{ca1}^{sp+} и T_{ca2}^{sp+} , но не нарушая их.

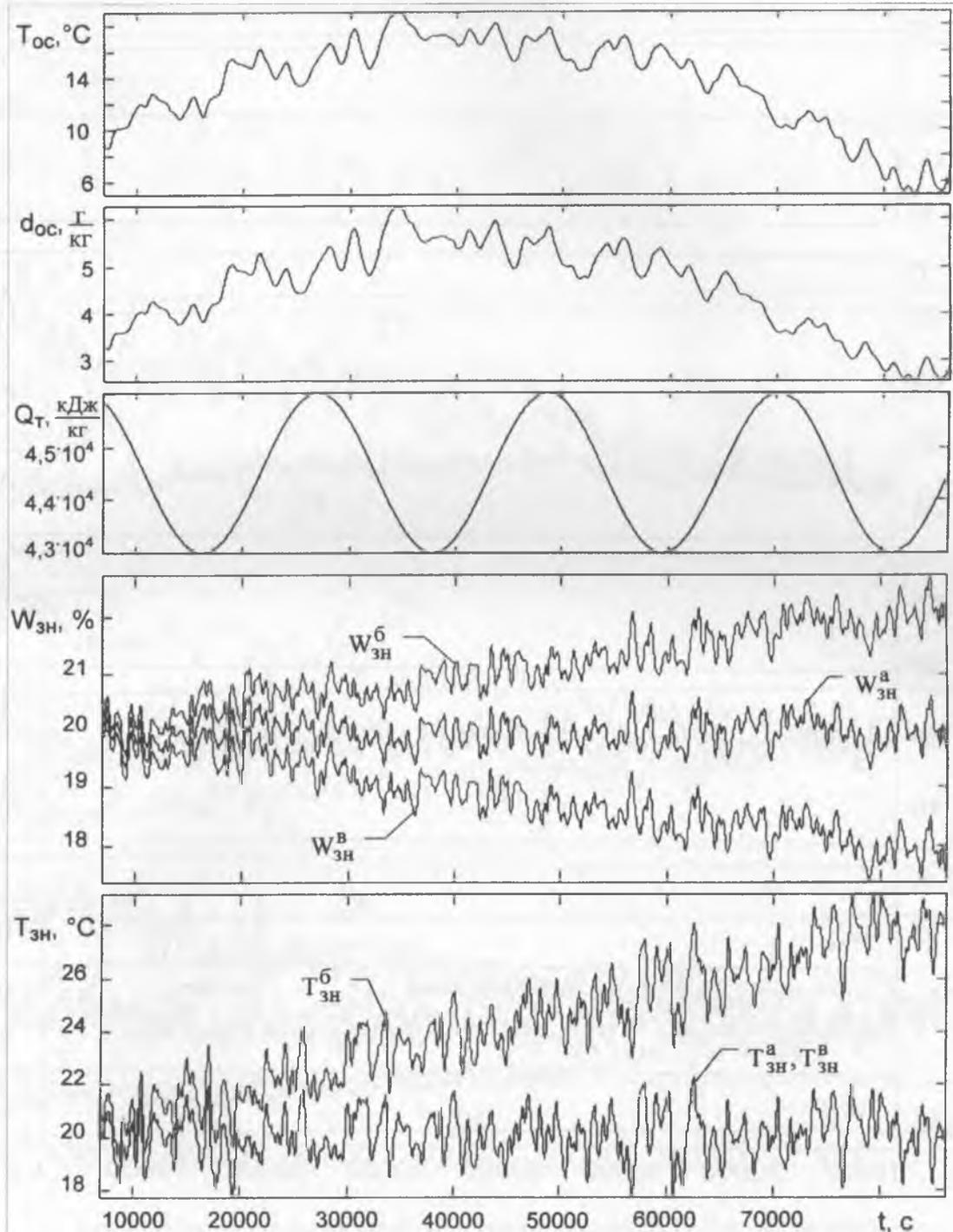


Рис. 2 - Динамика изменения параметров, определяющих условия ведения процесса сушки (T_{oc}, d_{oc} - температура и влагосодержание окружающего воздуха; W_{3n}, T_{3n} - влажность и температура зерна, идущего на сушку; Q_m - удельная теплота сгорания топлива)

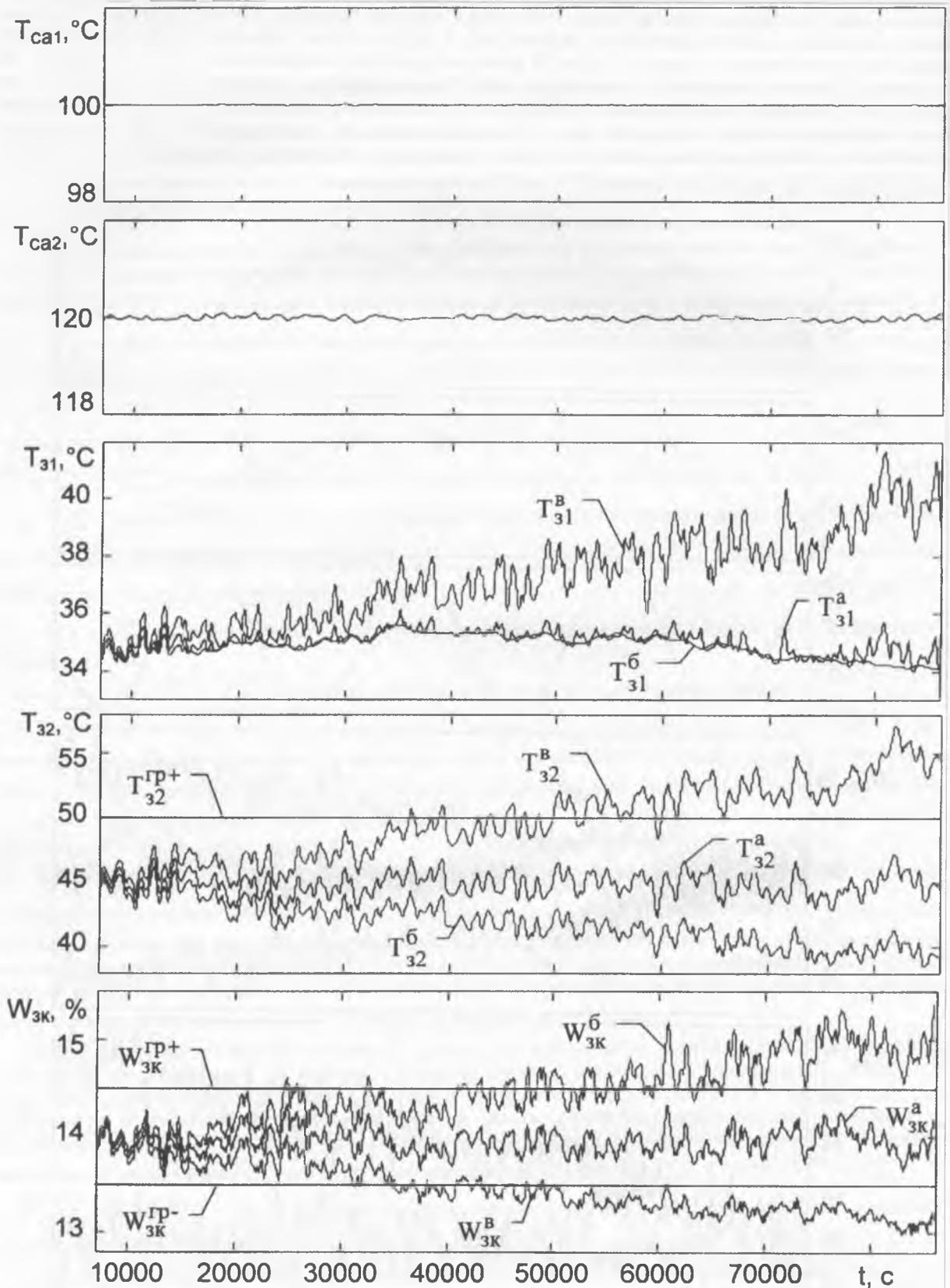


Рис. 3 - Фрагменты моделирования работы штатной САУ зерносушилкой ДСП-320г для трех различных вариантов изменения исходных параметров зерна

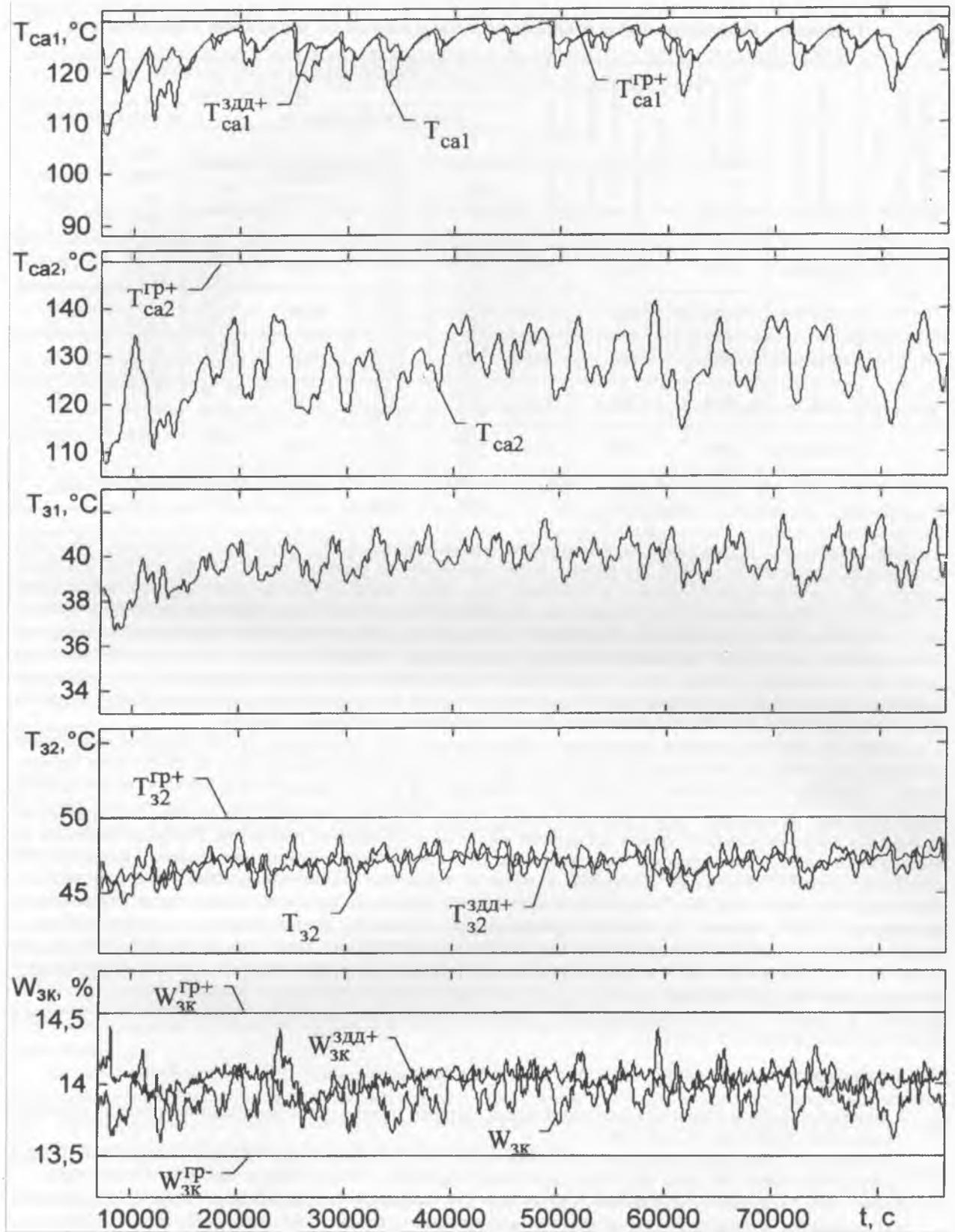


Рис. 4 - Фрагмент моделирования СГУ зерносушилкой ДСП-32от для варианта «в»
изменения начальных значений параметров зерна (см. рис. 2)

Показатели эффективности ведения процесса для различных вариантов управления сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Показатели эффективности различных вариантов управления зерносушилкой

| Моделируемый вариант условий сушки | Вариант системы управления | Масса просушенного зерна, тонн | Средняя производительность в установленном режиме, тонн/час | Время сушки, час | Затраты топлива и электрической энергии на сушку зерна | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---|------------------|--|------------------------|---------------|----------------------|----------------------|---------------|
| | | | | | Электрическая энергия | | | Дизельное топливо | | |
| | | | | | Общие кВт·ч грн. | На тонну кВт·ч грн. | Относительные | Общие кг грн. | На тонну кг грн. | Относительные |
| а | Штатная | 1000 | 35,0 | 29,8 | <u>3719</u> 595 | <u>3,72</u> 0,6 | 1,00 | <u>7590</u> 15190 | <u>7,59</u> 15,19 | 1,00 |
| | СГУ | 1000 | 42,1 | 25,4 | <u>3171</u> 507 | <u>3,17</u> 0,51 | 0,85 | <u>7330</u> 14660 | <u>7,33</u> 14,66 | 0,97 |
| б | Штатная | 1000 | 31,5 | 33,0 | <u>4121</u> 659 | <u>4,12</u> 0,66 | 1,00 | <u>8450</u> 16900 | <u>8,45</u> 16,90 | 1,00 |
| | СГУ | 1000 | 38,0 | 27,9 | <u>3490</u> 558 | <u>3,49</u> 0,56 | 0,85 | <u>8170</u> 16340 | <u>8,17</u> 16,34 | 0,97 |
| в | Штатная | 1000 | 39,8 | 26,3 | <u>3286</u> 526 | <u>3,29</u> 0,53 | 1,00 | <u>6680</u> 13350 | <u>6,68</u> 13,35 | 1,00 |
| | СГУ | 1000 | 49,2 | 21,9 | <u>2738</u> 438 | <u>2,74</u> 0,44 | 0,83 | <u>6200</u> 12400 | <u>6,20</u> 12,40 | 0,93 |

Как видно из результатов моделирования использование СГУ позволило увеличить среднюю производительность на 20 – 24 %, уменьшить общее время работы сушилки на 15 – 17 %, снизить удельные затраты на электрическую энергию и топливо. При этом система обеспечивает строгое соблюдение регламентов ведения процесса. Актуальность использования этой системы возрастает в период уборки урожая, когда дополнительно к требованиям соблюдения регламентов, снижения удельных энергозатрат добавляется необходимость увеличения производительности зерносушилок. Следует отметить, что в модели процесса сушки не учитывались потери тепла в окружающую среду через поверхности конструкций всех элементов сушилки. Это означает, что снижение затрат топлива на сушку при повышении производительности сушилки фактически будет больше, чем получено методом моделирования и отражено в таблице.

Одним из важных резервов повышения эффективности СГУ процессом сушки является повышение динамической точности стабилизации влажности зерна на выходе из сушилки. Это позволит вести процесс ближе к предельно допустимому значению его влажности W_{sk}^{sp} и, следовательно, снизить энергозатраты. Инструментами повышения этой точности может стать развитие системы управления в направлении повышения интеллектуального уровня алгоритмов контроля и управления процессом. Наиболее важными на сегодняшний день, по-видимому, следует считать следующие направления такого развития: 1) совершенствование алгоритмов измерения влажности зерна на основе применения тестовых методов измерения, что может повысить точность и стабильность существующих технических средств измерения; 2) реализация в САУ, помимо принципов гарантирования, принципов инвариантности, в данном случае – инвариантности влажности зерна на выходе из сушилки от значения его влажности на входе в сушилку. Он потребует интегрирования в САУ математической модели процесса и ее параллельного с процессом решения в реальном времени; 3) применение в САУ качестве алгоритмов регулирования специальных, ориентированных на работу в условиях больших запаздываний и вариаций параметров, которыми обладают каналы управления объектов технологического типа [3].

Литература

1. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления: научные основы // Автоматизация виробничих процесів. – Київ, 2004. – № 2 (19). – С. 62 – 69.
2. Степанов М.Т. Имитационная математическая модель процесса сушки зерна. // Нове в технології зберігання та переробки зерна: – Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. Одеса, 2002. Вип. 24. С. 380 – 384.
3. Хобин В.А. Регулятор переменной структуры для объектов технологического типа // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические системы и комплексы. – Херсон, 2004. – № 1 (13). – С. 190 – 196.