

Заключение. Разработанные ММ коэффициентов полезного действия и мощности асинхронных электродвигателей обеспечивают воспроизведение топологии соответствующих рабочих характеристик и совпадение их значений в точках холостого хода электродвигателя и в точках их экстремумов. Такой подход обеспечивает компромисс между уровнем адекватности этих моделей и простотой их получения и применения. Важно, что две эти модели позволяют получить модели любых рабочих характеристик, описывающих энергопотребление электродвигателей в зависимости от полезной мощности или момента на их валу. На основе этих моделей реализована имитационная модель ПЭД. Она легко интегрируется в имитационные модели оборудования, позволяя адекватно описывать оборудование, приводимое в работу ПЭД, как ОУ. Это дает возможность на основе таких моделей разрабатывать САУ нагрузкой оборудования, решая при этом, в частности, задачи по минимизации энергопотребления ПЭД. Кроме того, такая модель ПЭД может позволить решить важную для управления информационную задачу – для широких диапазонов изменения нагрузки на его валу, основываясь на результатах измерения простейших электрических параметров ПЭД, прежде всего величины потребляемого им тока, восстановить, пусть с определенной степенью приближения, фактическое значение нагрузки ПЭД.

Литература

1. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины: Асинхронные машины. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
2. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 302 с.
3. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 292 с.
4. Справочник по электрическим машинам / Под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – Т.1 – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
5. Иванов А.А. Электрооборудование пищевых предприятий. – К.: Техника, 1979. – 455 с.

УДК 681.5.015.3:[66.05:577.11-035]

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ БИОПОЛИМЕРОВ

Егоров В.Б., аспирант,

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Рассматривается решение комплекса задач, связанных с разработкой системы автоматического управления процессом экструдирования биополимеров, которые возникают на этапе обеспечения ее работоспособности и эффективности в условиях неопределенностей свойств объекта и возмущений.

The decision of the tasks complex which is connected with the development of the automatic control system of the biopolymers extrusion process is considered. The tasks appear when the system serviceability and efficiency in the conditions of the object properties uncertainty and disturbance are ensured.

Ключевые слова: экструдирование биополимеров, система управления, синтез, анализ, робастность.

1. Постановка завдання. В рамках разработки концепции построения систем автоматического управления (САУ) процессом экструдирования биополимеров (ЭБП) [1 – 2] была обоснована перспективная функциональная организация САУ и разработаны три, альтернативных варианта структурных схем для ее реализации. Их отличие состояло в режиме использования управляющего воздействия, изменяющего рабочее сечение канала движения материала в экструзионной головке – u_3 . Для реализации, в качестве базового варианта САУ процессом ЭБП, выбран вариант, структурная схема которого представлена на рис. 1.

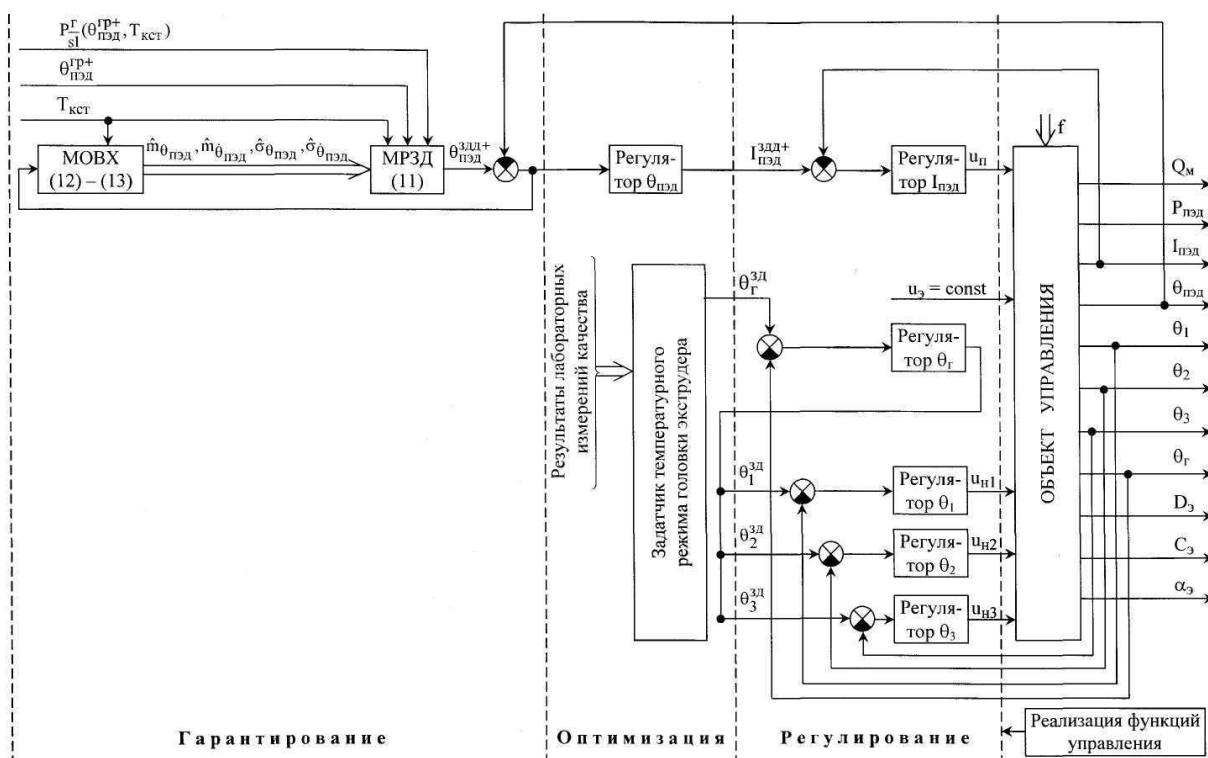


Рис. 1 – Структурная схема САУ процессом ЭБП для случая, когда использование u , доступно только в режиме настройки экструдера на работу с заданным видом сырья («вручную»)

Принципиальной особенностью такого варианта САУ является то, что использование u , доступно только в режиме настройки экструдера на работу с заданным видом сырья. Эта настройка осуществляется «вручную», совместно оператором экструдера и лаборантом, и остается, как правило, неизменной, $u_3 = const$, в течение всего времени производства экструдата из заданного сырья. Именно такое изменение u , и предусмотрено конструкциями экструдеров в настоящее время. Кроме того, из базового варианта САУ исключена функция измерения косвенных показателей качества экструдата, поэтому базовой САУ не реализуется и связанная с этим измерением функция гарантирования качественных показателей экструдата. В этом случае, реализация функции управления по гарантированию качественных показателей экструдата возлагается на оператора экструдера и лаборанта. Важно отметить, что базовая САУ включает в себя наиболее динамичные контура управления. Для заданной структуры САУ, обеспечение их эффективного функционирования требует обоснованного выбора настроечных параметров всех элементов управления [3 – 4]. К этим элементам относятся все шесть регуляторов, а также модули оценки вероятностных характеристик (МОВХ) и расчета допустимого заданного значения (МРЗД) степени нагрева приводного электродвигателя (ПЭД) экструдера. Наиболее эффективным инструментом такого выбора настроечных параметров является оптимальный параметрический синтез. Разработанная имитационная модель процесса ЭБП [5 – 6] позволяет реализовать такую процедуру синтеза алгоритмическими методами, в ходе специального образом организованных машинных экспериментов с имитационной моделью САУ [7 – 8].

На структурной схеме базовой САУ, рис. 1, для подсистемы регулирования температурного режима тепловой обработки сырья при его движении вдоль оси шнекового пресса, априори выбрана каскадная структура. Вместе с тем, ранее были рассмотрены три различных варианта структурных решений для этой подсистемы. При этом важно подчеркнуть, что эти варианты структурных решений могут реализовываться вне зависимости от выбранного варианта использования u , поэтому целесообразно провести сравнительный анализ этих вариантов. Этому анализу должен предшествовать оптимальный параметрический синтез регуляторов подсистемы.

Кроме того, целесообразно провести сравнительный анализ эффективности функционирования САУ, при различных вариантах алгоритмов автоматического управления. Очевидно, что такое сравнение будет более объективным, когда его результаты получены методом моделирования, т.к. в реальных условиях обеспечить их тождественность для различных экспериментов невозможно.

2. Параметрический синтез подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера. В общем виде выражение для типового ПИД-алгоритма регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера, реализующего принцип замкнутого управления, принимает вид:

$$u_i(t) = k_{pI} \left(\Delta I_{i\bar{y}\bar{a}}(t) + \frac{1}{T_{\bar{e}\bar{c}I}} \int_0^t \Delta I_{i\bar{y}\bar{a}}(t) dt + T_{i\bar{d}I} \frac{d\Delta I_{i\bar{y}\bar{a}}(t)}{dt} \right) + u_{i0}, \quad (1)$$

где u_{i0} – начальное значение управляющего воздействия $u_i(t)$ в момент замыкания контура регулирования, обеспечивающее «безударность» этого замыкания;

$\Delta I_{i\bar{y}\bar{a}}(t) = I_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{c}\bar{a}\bar{a}+}(t) - I_{i\bar{y}\bar{a}}(t)$ – ошибка регулирования тока нагрузки $I(t)$;

$I_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{c}\bar{a}\bar{a}+}(t)$ – заданное значение тока нагрузки, с учетом гарантирования соблюдения теплового режима ПЭД (ограничения «сверху» на величину перегрева ПЭД экструдера);

k_{pI} , $T_{\bar{e}\bar{c}I}$, $T_{i\bar{d}I}$ – настроечные параметры регулятора тока, подлежащие оптимизации.

Оптимизация параметров регулятора осуществлялась по интегральному квадратичному критерию в соответствии с выражением (2), в ходе специального компьютерного эксперимента с использованием имитационной модели подсистемы. При этом время моделирования $T_{\text{МОД}}$ САУ на каждом шаге оптимизации соответствовало времени, на котором осуществлялось моделирование возмущений [6], приведенных к каналам изменения напряжения питающей сети и влажности экструдированного сырья.

$$k_{pI}^*, T_{\bar{e}\bar{c}I}^*, T_{i\bar{d}I}^* = \operatorname{argmin} \left\{ \int_0^{\bar{O}i\bar{t}\bar{a}} \left(I_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{c}\bar{a}\bar{a}+} - I_{i\bar{y}\bar{a}}(k_{\bar{d}I}, \bar{O}_{\bar{e}\bar{c}I}, \bar{O}_{i\bar{d}I}, t) \right)^2 dt \right\}, \quad (2)$$

Значения начальных приближений k_{pI} , $T_{\bar{e}\bar{c}I}$, $T_{i\bar{d}I}$ настроечных параметров для реализации первого шага поисковой процедуры оптимизации (2) найдены исходя из свойств типовой модели динамики по каналу регулирования [6], в соответствии с рекомендациями [4]: $k_{pI} = 0,85$ % у.в./А, $T_{\bar{e}\bar{c}I} = 7$ с, $T_{i\bar{d}I} = 3$ с. Значения параметров, найденные в ходе процедуры оптимизации и округленные: $k_{pI}^* = 1,0$ % у.в./А, $T_{\bar{e}\bar{c}I}^* = 8,0$ с, $T_{i\bar{d}I}^* = 2,0$ с.

3. Параметрический синтез альтернативных вариантов подсистемы регулирования температурного режима обработки сырья в экструдере. Вариант 1 подсистемы реализуется на основе замкнутого принципа управления с «классической» структурой, когда заданные значения температур $\theta_i(t)$, $i = \overline{1,3}$, на своих заданных значениях $\theta_i^{\bar{c}\bar{a}}(t)$ поддерживаются соответствующими регуляторами. При этом управляющие воздействия формируются на основе ошибок регулирования, в соответствии с выбранными для регуляторов алгоритмами регулирования:

$$u_{i\bar{i}}(t) = k_{p\theta i} \left(\Delta \theta_i(t) + \frac{1}{T_{\bar{e}\bar{c}\theta i}} \int_0^t \Delta \theta_i(t) dt + T_{i\bar{d}\theta i} \frac{d\Delta \theta_i(t)}{dt} \right) + u_{i\bar{i}0}, \quad i = \overline{1,3}, \quad (3)$$

где $u_{i\bar{i}0}$ – начальные значения управляющих воздействий $u_{i\bar{i}}(t)$ в момент замыкания контура регулирования, обеспечивающие «безударность» этого замыкания;

$\Delta \theta_i(t) = \theta_i^{\bar{c}\bar{a}}(t) - \theta_i(t)$ – ошибки регулирования температур $\theta_i(t)$;

$k_{p\theta i}$, $T_{\bar{e}\bar{c}\theta i}$, $T_{i\bar{d}\theta i}$, $i = \overline{1,3}$, – настроечные параметры регуляторов температур, подлежащие оптимизации.

Оптимизация осуществлялась, как и в предыдущем случае, по интегральному квадратичному критерию в соответствии с выражением (4), в ходе специального компьютерного эксперимента с использованием имитационной модели подсистемы.

$$k_{p\theta i}^*, T_{\bar{e}\bar{c}\theta i}^*, T_{i\bar{d}\theta i}^* = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^3 \int_0^{\bar{O}i\bar{t}\bar{a}} \left(\theta_i^{\bar{c}\bar{a}} - \theta_i(k_{\bar{d}\theta i}, \bar{O}_{\bar{e}\bar{c}\theta i}, \bar{O}_{i\bar{d}\theta i}, t) \right)^2 dt \right\}, \quad (4)$$

Значения начальных приближений $k_{p\theta i}$, $T_{\bar{e}\bar{c}\theta i}$, $T_{i\bar{d}\theta i}$ настроечных параметров для реализации первого шага поисковой процедуры оптимизации (4) найдены исходя из свойств типовых моделей динамики по каналу регулирования. При этом были приняты во внимание следующие две важные особенности «тепловой» составляющей объекта управления (ОУ). Первая. Величина времени запаздывания в указанных моделях несоизмеримо меньше, чем их постоянная времени, что облегчает достижение высокого качества регулирования. Вторая. Каналы регулирования температуры имеют перекрестные связи с коэф-

фициентами передачи, величина которых соизмерима со значениями коэффициентов передачи в прямых каналах, что делает процесс регулирования температур взаимосвязанным и существенно затрудняет достижение высокого качества регулирования. С учетом рекомендаций [4] и сделанных выше замечаний, начальные значения настроечных параметров регуляторов приняты одинаковыми и равными: $k_{p\theta_i}^i = 10$ % у.в./ $^{\circ}\text{C}$, $T_{\dot{e}\zeta\theta_i}^i = 3$ с, $T_{i\delta\theta_i}^i = 1$ с. Значения параметров, найденные в ходе процедуры оптимизации и округленные, также приняты равными для всех трех регуляторов температуры: $k_{p\theta_i}^* = 2,0$ % у.в./ $^{\circ}\text{C}$, $T_{\dot{e}\zeta\theta_i}^* = 10$ с, $T_{i\delta\theta_i}^* = 2$ с, $i = \overline{1,3}$.

Существенным недостатком структуры подсистемы регулирования температурного режима обработки сырья в экструдере, параметрическая оптимизация которой проведена выше, является то, что температура головки θ_z экструдера не регулируется. Ресурсы для такого регулирования были утеряны при отказе в базовой САУ от непрерывного изменения u_z , т.е. использования его в качестве управляющего воздействия САУ. Реализация структуры подсистемы регулирования температурного режима по «перекрестной» схеме дает определенные ресурсы для регулирования θ_z . Как и в предыдущем варианте, функции регулирования температур реализуются на основе замкнутого принципа управления, но, очевидно, имеют особенность, обусловленную перекрестной схемой регулирования. Ее сущность состоит в том, что управляющие воздействия i -той зоны формируются на основе ошибок регулирования температуры в $i+1$ -ой зоне, причем температура в 4-ой зоне соответствует θ_z . Для типовых алгоритмов регулирования выражения для формирования управляющих воздействий имеют вид:

$$u_{ii}(t) = k_{p\theta_{i+1}} \left(\Delta\theta_{i+1}(t) + \frac{1}{T_{\dot{e}\zeta\theta_{i+1}}} \int_0^t \Delta\theta_{i+1}(t) dt + T_{i\delta\theta_{i+1}} \frac{d\theta_{i+1}(t)}{dt} \right) + u_{ii0}, \quad i = \overline{1,3}, \quad \theta_{3+1} = \theta_4 \equiv \theta_z, \quad (5)$$

где $\Delta\theta_{i+1}(t) = \theta_{i+1}^{c\ddot{a}}(t) - \theta_{i+1}(t)$, $\theta_4^{c\ddot{a}} \equiv \theta_z^{c\ddot{a}}$ – ошибки регулирования температур $\theta_{i+1}(t)$.

Результаты параметрического синтеза для алгоритмов (5) по критерию (6):

$$k_{p\theta_{i+1}}^*, T_{\dot{e}\zeta\theta_{i+1}}^*, T_{i\delta\theta_{i+1}}^* = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^3 \int_0^{\dot{O}i\ddot{a}} \left(\theta_{i+1}^{c\ddot{a}} - \theta_{i+1}(k_{\partial\theta_{i+1}}, \dot{O}_{\dot{e}\zeta\theta_{i+1}}, \dot{O}_{i\delta\theta_{i+1}}, t) \right)^2 dt \right\} \quad (6)$$

показали возможность сохранения настроек, которые были получены для предыдущего варианта структуры этой подсистемы.

Еще один вариант структуры подсистемы регулирования температурного режима обработки сырья, дающий возможность регулирования θ_z , имеет каскадную структуру, где главной регулируемой переменной является температура θ_z экструдерной головки. Особенность структуры подсистемы состоит в том, что ее главный регулятор (регулятор θ_z) устанавливает одновременно заданные значения сразу трем вспомогательным регуляторам (регуляторам θ_i , $i = \overline{1,3}$), а не одному, как в классической каскадной структуре. Для типовых алгоритмов регулирования выражения для формирования управляющих воздействий вспомогательных и главного регулятора имеют вид:

$$\begin{aligned} u_{ii}(t) &= k_{p\theta_i} \left(\Delta\theta_i(t) + \frac{1}{T_{\dot{e}\zeta\theta_i}} \int_0^t \Delta\theta_i(t) dt + T_{i\delta\theta_i} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \right) + u_{ii0}, \quad i = \overline{1,3}, \\ \Delta\theta_i(t) &= \theta_i^{c\ddot{a}}(t) - \theta_i(t), \quad \theta_i^{c\ddot{a}} \equiv \theta_z^{c\ddot{a}} \quad \text{для } i = \overline{1,3}, \\ \theta_z^{c\ddot{a}}(t) &= k_{p\theta_z} \left(\Delta\theta_z(t) + \frac{1}{T_{\dot{e}\zeta\theta_z}} \int_0^t \Delta\theta_z(t) dt + T_{z\delta\theta_z} \frac{d\theta_z(t)}{dt} \right) + \theta_{z0}^{c\ddot{a}}, \\ \Delta\theta_z(t) &= \theta_z^{c\ddot{a}}(t) - \theta_z(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Для этого варианта подсистемы настройки вспомогательных регуляторов температуры были сохранены на значениях, принятых после оптимизации параметров регуляторов температуры. Для рассматриваемого варианта подсистемы параметрический синтез проводился только для главного регулятора, в соответствии с критерием:

$$k_{p\theta_z}^*, T_{\dot{e}\zeta\theta_z}^*, T_{z\delta\theta_z}^* = \operatorname{argmin} \left\{ \int_0^{\dot{O}i\ddot{a}} \left(\theta_z^{c\ddot{a}}(t) - \theta_z(k_{\partial\theta_z}, \dot{O}_{\dot{e}\zeta\theta_z}, \dot{O}_{z\delta\theta_z}, t) \right)^2 dt \right\}, \quad (8)$$

Принятые значения этих настроек: $k_{p\theta_z}^* = 1,0$ % у.в./ $^{\circ}\text{C}$, $T_{\dot{e}\zeta\theta_z}^* = 15$ с, $T_{z\delta\theta_z}^* = 3$ с.

4. Анализ работы подсистем регулирования с типовыми алгоритмами. Анализ работы подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера и альтернативных вариантов подсистемы регулирования температурного режима обработки сырья в экструдере проводился на полной имитационной модели ОУ и действующих на него возмущений. В качестве базы для сравнения, первоначально, было проведено моделирование работы объекта при фиксированных управляющих воздействиях $u_s = 0,75$, $u_n = 17,2$ % у.в., $u_{n1} = 20$ % у.в., $u_{n2} = 30$ % у.в., $u_{n3} = 45$ % у.в., значения которых были подобраны специальным образом. Основными требованиями при этом подборе было обеспечение температурного режима обработки сырья в экструдере в окрестности регламентированных значений и максимально возможная подача сырья в экструдер (производительность экструдера), при которой на интервале моделирования не происходило бы срабатывания тепловой защиты ПЭД экструдера из-за его перегрузки. Такой вариант управления процессом можно рассматривать как вариант управления оператором («ручного» управления процессом). Результаты его моделирования приведены на рис. 2. Анализ рис. 2 показывает, что все регламентированные переменные процесса экструдирования под действием возмущений существенно изменяются и, безусловно, задача автоматического регулирования температурного режима обработки сырья при экструдировании и тока нагрузки ПЭД экструдера весьма актуальна.

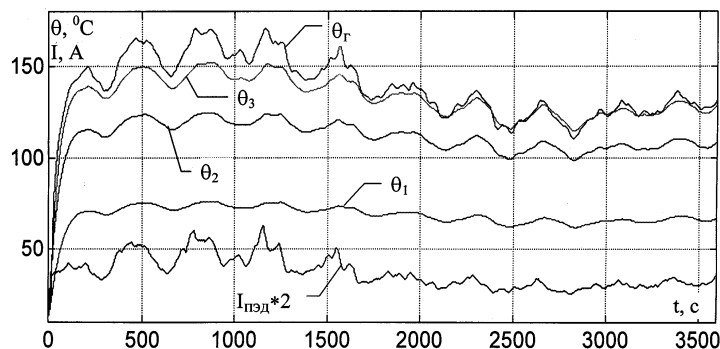


Рис. 2 – Моделирование процесса экструдирования при фиксированных управляющих воздействиях (подача сырья соответствует максимуму производительности экструдера без перегрева его ПЭД)

Кроме того, для оценки эффективности разработанных систем управления, приводилось моделирование двух «промежуточных» ситуаций, когда реализована одна из двух подсистем регулирования, либо температурного режима обработки сырья, либо тока нагрузки ПЭД. В первой ситуации, при стабилизации температур по зонам, их заданные значения достаточно точно выдерживаются за счет изменения соответствующих управляющих воздействий. При этом температура экструзионной головки существенно уменьшила размах своих колебаний, но она сохранила свою зависимость от степени нагрузки на ПЭД экструдера, которая, в том числе, пропорциональна механической работе, выполняемой над сырьем, и, следовательно, его нагреву за счет этой работы. Во второй ситуации стабилизация тока нагрузки ПЭД за счет изменения подачи сырья на экструдирование, одновременно позволяет существенно снизить размах колебаний температур и в зонах нагрева и в экструдировующей головке. Этот факт указывает на то, что в условиях минимизации затрат на автоматизацию экструдера, целесообразно в первую очередь решать задачу автоматической стабилизации тока нагрузки его ПЭД.

Результаты моделирования САУ процессом ЭБП при автоматическом регулировании тока нагрузки ПЭД, $I^{зд} = 24,6$ А, и температурного режима обработки сырья при трех вариантах структуры подсистемы регулирования температур приведены на рис. 3. Вариант прямого регулирования температур, $\theta_1^{сд} = 70$ °С, $\theta_2^{сд} = 115$ °С, $\theta_3^{сд} = 145$ °С, для фиксированного управляющего воздействия $u_s = 0,75$, отражает рис. 3«а». Как из него следует, тепла, которое выделяется при выполнении механической работы над сырьем при такой его подаче, которая соответствует заданному значению тока нагрузки ПЭД экструдера $I^{зд} = 24,6$ А, достаточно, чтобы удерживать температуры в зонах нагрева выше своих заданных значений без подвода тепла от ТЭНов. Поэтому, после окончания переходных процессов в контурах регулирования температур θ_1 , θ_2 и θ_3 все их управляющие воздействия стали равными нулю. Вариант перекрестного регулирования температур, $\theta_2^{сд} = 115$ °С, $\theta_3^{сд} = 145$ °С, $\theta_4^{сд} = 150$ °С, для фиксированного управляющего воздействия $u_s = 0,75$, отражает рис. 3«б». Как из него следует, при такой структуре подсистемы автоматического регулирования температурного режима обработки сырья появляется возможность целенаправленно влиять на температуру θ_4 экструдировующей головки. Повышение ее значения до заданного $\theta_4^{сд} =$

150 °С и регулирование (стабилизация) на заданном значении осуществляется, в данном примере, за счет управляющего воздействия предыдущей зоны нагрева. Это, одновременно, вызывает рост температур в соседних зонах нагрева выше заданных значений. Последствия такого перегрева в рамках данной работы оценить сложно. Они могут быть как отрицательными, так и положительными, причем в зависимости от вида экструдруемого сырья и его характеристик. При всем этом необходимо учитывать, что указанные значения температур соответствуют температурам корпуса экструдера в зонах прессования, а не температурам перемещающегося через эти зоны продукта. Вариант каскадного регулирования температуры экструзионной головки, $\theta_a^{ca} = 150$ °С, для фиксированного управляющего воздействия $u_s = 0,75$, отражает рис. 3«в». Отметим, что при такой структуре подсистемы автоматического регулирования температурного режима обработки сырья, выход (управляющее воздействие) главного регулятора является общим задающим воздействием регуляторов температуры отдельных зон нагрева. Как из него следует, значения температур в этих зонах, по сравнению с предыдущим вариантом, выросли. Как и предполагалось на этапе концептуальной разработки структуры САУ, такая структура каскадной подсистемы позволила наиболее эффективно мобилизовать ресурсы управляющих воздействий для достижения главной цели этой подсистемы регулирования температурного режима – поддержания необходимого значения θ_s . Замечания о последствиях высоких значений температур в зонах нагрева, сделанные выше, здесь также актуальны.

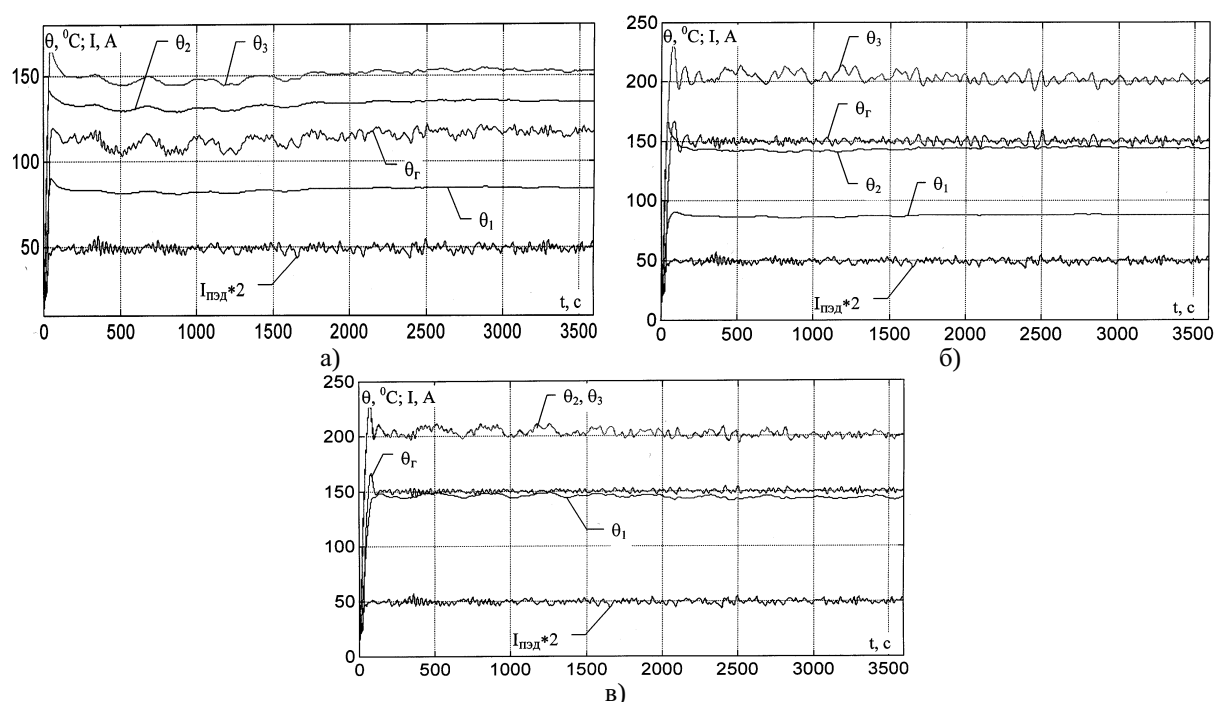


Рис. 3 – Моделирование процесса ЭБП для фиксированного управляющего воздействия $u_s = 0,75$, при автоматическом регулировании тока нагрузки ПЭД, $I_{ya}^{ca} = 24,6$ А, и температурного режима обработки сырья:

а) $\theta_1^{ca} = 70$ °С, $\theta_2^{ca} = 115$ °С, $\theta_3^{ca} = 145$ °С; б) $\theta_2^{ca} = 115$ °С, $\theta_3^{ca} = 145$ °С, $\theta_a^{ca} = 150$ °С; в) $\theta_a^{ca} = 150$ °С

5. Повышение запасов устойчивости (робастности) подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера. В [1, 9 – 10], в ходе априорного анализа особенностей реализации САУ процесса ЭБП функции регулирования, отмечался высокий уровень неопределенности динамических свойств каналов управления, и, прежде всего, подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера. Это требует повышения качества реализации функции регулирования, которое должно идти в направлении повышения запаса устойчивости подсистемы регулирования тока и сохранения (лучше – повышения) динамической точности регулирования в условиях изменяющихся свойств ОУ. Такое повышение качества можно интерпретировать как повышение робастности подсистемы.

Отметим, что для подсистемы регулирования температурного режима обработки сырья задачи повышения динамической точности и расширения запаса устойчивости не актуальны. Это, в частности, иллюстрируют результаты моделирования подсистем регулирования с типовыми алгоритмами, рассмот-

ренные на рис. 3. В том случае, когда ресурсов на управление температурами было достаточно, то они стабилизировались подсистемой с достаточно высокой точностью. Это объясняется малым значением соотношения времени запаздывания к постоянной времени типовой модели каналов регулирования температур. Одновременно, факторов, которые могут существенно влиять на изменение динамических свойств этих каналов, которые и отражаются в модели, нет. Эти свойства определяются, прежде всего, массами корпуса прессующей и экструдирующей частей экструдера, а они остаются неизменными.

Для подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера задачи повышения динамической точности и расширения запаса устойчивости актуальны. Задача повышения динамической точности обуславливается значительным значением соотношения времени запаздывания к постоянной времени типовой модели этого канала регулирования и влиянием на динамические свойства канала многих факторов. Как показали исследования, динамическую точность работы подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера, после оптимизации параметров ее регулятора, во всем диапазоне изменения возмущений, можно было бы считать приемлемой. Однако при проведенной оптимизации не учитывались возможные изменения других факторов, в частности, изменения управляющего воздействия u_3 . Исследования показали, что его изменения существенно влияют на коэффициент передачи канала регулирования, и, при определенных условиях, связанных с неблагоприятными возмущениями, подсистема регулирования может стать неустойчивой. Сказанное иллюстрирует рис. 4, где приведены временные диаграммы процессов регулирования тока нагрузки при трех различных значениях u_3 .

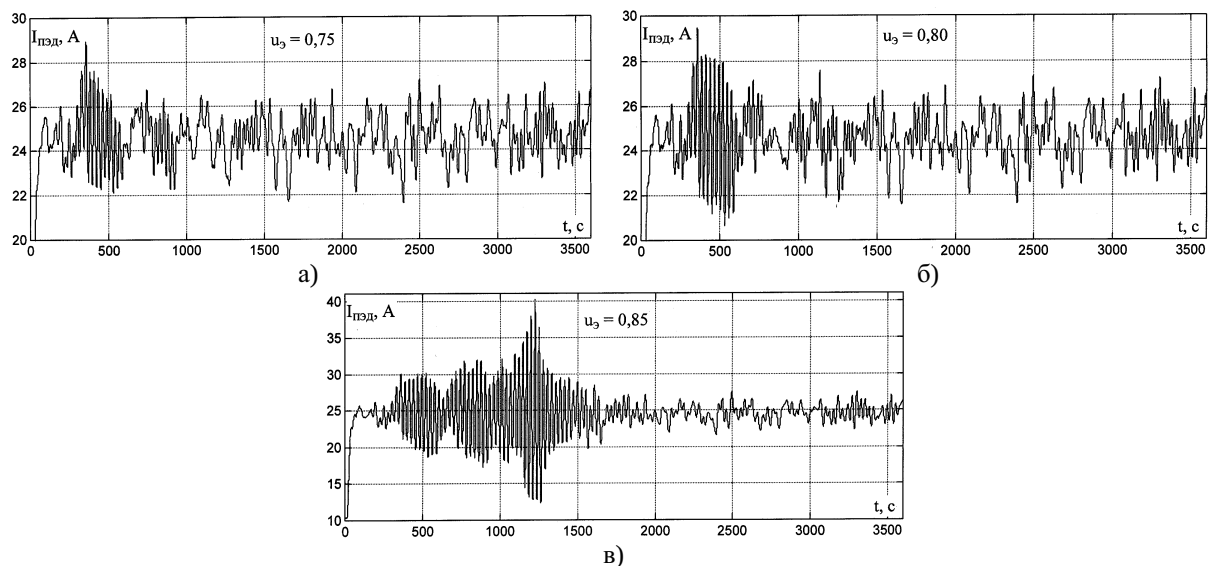


Рис. 4 – Фрагменты моделирования процесса регулирования тока нагрузки ПЭД, $I_{iy\bar{a}}^{\bar{c}a} = 24,6$ А, для различных значений управляющего воздействия u_3

Из рисунка следует, что для всех рассмотренных значений u_3 , при определенных условиях, в данном случае при пониженной влажности и повышенном напряжении питающей сети, качество регулирования тока нагрузки падает. Снижение качества связано с интенсификацией собственной составляющей движения контура регулирования из-за снижения запаса его устойчивости при изменяющихся в неблагоприятную сторону динамических свойствах объекта. При этом очевидно следующее: а) для $u_3 = 0,75$ снижением качества регулирования можно пренебречь, т.к. собственная составляющая движения контура сходится, т.е. контур имеет запас устойчивости; б) для $u_3 = 0,80$ снижением качества регулирования пренебрегать нецелесообразно, т.к. собственная составляющая движения контура практически не затухает, т.е. контур находится в окрестности границы устойчивости; в) для $u_3 = 0,85$ снижением качества регулирования пренебрегать недопустимо, т.к. собственная составляющая движения контура расходится, т.е. контур регулирования неустойчив.

Известно [11 – 13], что одной из достаточно простых и, как показывает практика, эффективных мер повышения запаса устойчивости контуров регулирования, имеющих значительное запаздывание, является прогнозирование собственного движения системы на время запаздывания вперед (введение в структуру регулятора упредителя Смита). Для алгоритмов регулирования с прогнозированием выражения для формирования управляющих воздействий имеют вид:

$$\begin{aligned}
u_i^{\ddot{\theta}}(t) &= k_{PI} \left(\Delta I_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}}(t) + \frac{1}{T_{\ddot{\theta}I}} \int_0^t \Delta I_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}}(t) dt + T_{\ddot{\theta}I} \frac{d\Delta I_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}}(t)}{dt} \right) + u_0; \\
\Delta I_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}}(t) &= I_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}}(t) - I_{n\ddot{\theta}}(t) - I^{mp}(t); \\
I^{mp}(t) &= I_1^{\ddot{\theta}}(t) - I_1^{\ddot{\theta}}(t - \tau_{\ddot{\theta}}); \\
I_1^{\ddot{\theta}}(t) &= k_{\ddot{\theta}} u_i^{\ddot{\theta}} - T_{\ddot{\theta}} \frac{dI_1^{\ddot{\theta}}(t)}{dt}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Схема моделирования ПИД-регулятора с прогнозированием и результаты моделирования подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера при $u_s = 0,85$, приведены на рис. 5. По результатам параметрической оптимизации параметры настройки базовых составляющих ПИД-регулятора были оставлены без изменения, а значения настроечных параметров упредителя Смита установлены следующими: $k_{\ddot{\theta}}^* = 1,2$ А/% у.в., $\dot{O}_{\ddot{\theta}}^* = 6$ с, $\tau_{\ddot{\theta}}^* = 6$ с. Моделирование показало практическую идентичность процессов регулирования для всех трех значений u_s , и именно поэтому на рисунке приведен только один из этих процессов.

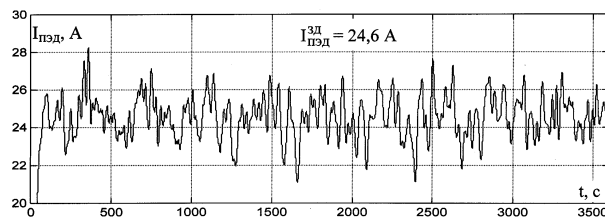


Рис. 5 – Фрагмент моделирования подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера с ПИД-регулятором с прогнозированием при $u_s = 0,85$

Таким образом, задачу повышения запасов устойчивости и стабилизации динамической точности подсистемы регулирования тока нагрузки ПЭД экструдера, для широких диапазонов условий ее работы, за счет введения в алгоритм регулирования прогнозирования собственного движения системы на время запаздывания вперед, можно считать решенной.

6. Параметрический синтез и анализ подсистемы гарантирующего управления степенью нагрева ПЭД экструдера. В базовом варианте САУ, см. рис. 1, оптимизация (минимизация) энергозатрат реализована в предположении, что режимы максимальной энергетической эффективности ведения процесса ЭБП совпадают с режимами максимальной загрузки ПЭД экструдера. В свою очередь, максимальная загрузка экструдера ограничивается предельно-допустимым температурным режимом его ПЭД. Таким образом, задача оптимизации решается за счет решения задачи гарантирующего управления.

Отметим важную особенность реализации подсистемы. Температура $\theta_{n\ddot{\theta}}$ непосредственно не измеряется. Делать это нецелесообразно по двум причинам. Первая – электродвигатель, как тепловой объект, является объектом с распределенными параметрами. Вторая – отключение электродвигателя от сети, в случае его перегрева, осуществляет реле тепловой защиты, которое проектируется как физическая модель с сосредоточенными параметрами этого теплового объекта. Вместо непосредственного измерения $\theta_{n\ddot{\theta}}$ ее значение, точнее относительное значение, которое назовем здесь «степень нагрева» ПЭД, а обозначение сохраним, вычисляется по математической модели реле тепловой защиты, см. [14]. Отметим, что номинальное значение степени нагрева $\theta_{n\ddot{\theta}} = 1$, соответствует состоянию реле тепловой защиты, когда по нему и, значит и по ПЭД, протекает номинальный ток. Степень нагрева $\theta_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}+}$ соответствует срабатыванию реле тепловой защиты и отключению ПЭД от сети.

Стабилизация $\theta_{n\ddot{\theta}}$ соответствующим регулятором, при которой ее среднее значение ($\bar{\theta}_{\ddot{\theta}}$) максимально приближается к $\theta_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}+}$, и, одновременно, вероятность соблюдения теплового режима сохраняется не ниже гарантированной, обеспечивается непрерывным расчетом допустимого заданного значения $\theta_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}+}$ [15]. При этом можно считать, что $\bar{\theta}_{\ddot{\theta}} = \theta_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}+}$. Текущее значение $\theta_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}+}$ является заданным значением для регулятора степени нагрева $\theta_{n\ddot{\theta}}$. Этот регулятор выступает в качестве главного регулятора, а регулятор тока – в качестве вспомогательного, для которого заданное значение $I_{\ddot{\theta}}^{\ddot{\theta}+}$ формируется как управляющее воздействие главного регулятора. Типовой ПИД-алгоритм регулятора тока и его ПИД-алгоритм с прогнозированием были рассмотрены выше. В качестве алгоритма регулятора степени нагрева $\theta_{n\ddot{\theta}}$ также

используется типовый ПИД-алгоритм:

$$I_{i\bar{y}\bar{a}}^{\zeta\bar{a}\bar{a}+}(t) = k_{p\theta_{i\bar{y}\bar{a}}} \left(\Delta\theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t) + \frac{1}{T_{\bar{e}\zeta\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}} \int_0^t \Delta\theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t) dt + T_{i\bar{d}\theta_{i\bar{y}\bar{a}}} \frac{d\Delta\theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t)}{dt} \right) + I_{i\bar{y}\bar{a}}^{\zeta\bar{a}\bar{a}+}(t);$$

$$\Delta\theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t) = \theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\zeta\bar{a}\bar{a}+}(t) - \theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t). \quad (10)$$

Значения настроечных параметров регулятора, принятые после процедуры их параметрической оптимизации и по критерию, аналогичному (2): $k_{p\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}^* = 10$ А/отн.ед.; $\bar{O}_{\bar{e}\zeta\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}^* = 50$ с; $\bar{O}_{i\bar{d}\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}^* = 10$.

Расчет значения $\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\zeta\bar{a}\bar{a}+}$ осуществляется в модуле расчета допустимого заданного значения (МРЗД) степени нагрева ПЭД на основании информации, получаемой с модуля оценки вероятностных характеристик (МОВХ), см. рис. 1. Они реализуют следующие алгоритмы. МРЗД – (11):

$$\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\zeta\bar{a}\bar{a}+}(t) = \theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{a}\bar{d}+} - \hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t) \sqrt{2 \ln \left| \frac{T \hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t)}{2 \pi \hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t) \ln P_{s1}^{\bar{a}}(\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{a}\bar{d}+}, T)} \right\} \exp \left(-\frac{\hat{m}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}^2(t)}{2 \hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}^2(t)} \right) - \frac{\sqrt{2 \pi} \hat{m}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t)}{\hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t)} \hat{O} \left(\frac{\hat{m}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t)}{\hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t)} \right) \Bigg|}, \quad (11)$$

$$\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{a}\bar{d}+} = 1,1; T = 500 \text{ с}; P_{s1}^{\bar{a}}(\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{a}\bar{d}+}, T) = 0,99.$$

МОВХ – (12) – (13):

$$\hat{m}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}}(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} \theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t) dt, \quad \hat{m}_{\dot{\theta}_{i\bar{y}\bar{a}}}(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} \dot{\theta}_{i\bar{y}\bar{a}}(t) dt, \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}} = \frac{1}{T_{\bar{e}\zeta\bar{d}}} \int_t^{t+T_{\bar{e}\zeta\bar{d}}} (\theta_{i\bar{y}\bar{a}}(t) - \hat{m}_{\theta_{i\bar{y}\bar{a}}})^2 dt; \quad \hat{\sigma}_{\dot{\theta}_{i\bar{y}\bar{a}}} = \frac{1}{T_{\bar{e}\zeta\bar{d}}} \int_t^{t+T_{\bar{e}\zeta\bar{d}}} (\dot{\theta}_{i\bar{y}\bar{a}}(t) - \hat{m}_{\dot{\theta}_{i\bar{y}\bar{a}}})^2 dt, \quad (13)$$

$$T_m = 150 \text{ с}; T_{\kappa cm} = 350 \text{ с}.$$

Результаты моделирования этой подсистемы с алгоритмом прогнозирования приведены на рис. 6. Отметим, что моделирование осуществлялось на интервале 3 часа (10800 с), а рассматривался, для большей наглядности, только интервал установившегося режима работы экструдера, представленный на рисунках. По результатам моделирования можно сделать два главных вывода. Первый. Для всех рассмотренных вариантов работы подсистемы гарантирующего управления, функция определения в реальном времени допустимого заданного значения степени нагрева ПЭД $\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\zeta\bar{a}\bar{a}+}$, при котором $\theta_{n\bar{e}\bar{d}}$ максимально близко приближается к своему предельно-допустимому (граничному) значению $\theta_{i\bar{y}\bar{a}}^{\bar{a}\bar{d}+}$, и, одновременно, не превышает его, выполняется. Подчеркнем, что выполнение этой функции обеспечивается и в неблагоприятных условиях, при $u_2 = 0,85$, когда внутренний контур регулирования тока нагрузки периодически становится неустойчивым. Второй. Введение в регулятор тока алгоритма прогнозирования изменения регулируемой переменной на время запаздывания вперед снимает проблему неустойчивости контура, стабилизирует качество регулирования, повышает эффективность САУ процессом ЭБП в целом.

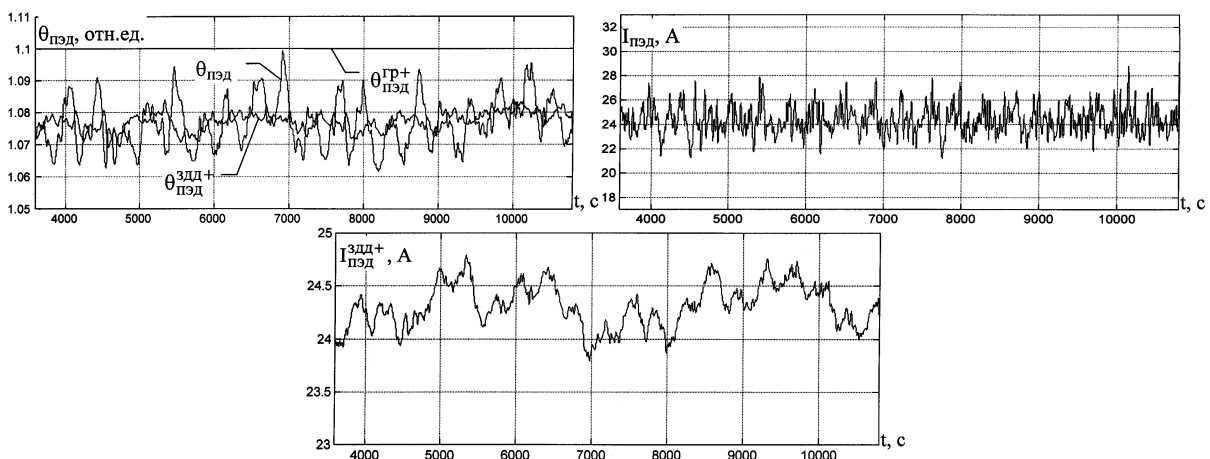


Рис. 6 – Фрагмент моделирования подсистемы гарантирующего управления степенью нагрева ПЭД экструдера для $u_2 = 0,85$, регулятор тока с прогнозированием

Заключение. Приведем результаты моделирования САУ процесса ЭБП, при различных вариантах подсистемы управления загрузкой экструдера, позволяющие оценить показатели эффективности процесса. В качестве этих показателей выбраны среднее значение производительности (количество экструдата, полученного за один час работы) и усредненные за час работы удельные затраты электроэнергии на экструдирование. Подсистема регулирования температурного режима тепловой обработки сырья имела каскадную структуру. Очевидно, что показатели качества экструдата при моделировании учтены быть не могли. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оценки энергетической эффективности процесса ЭБП с различными вариантами управления загрузкой экструдера

Вариант управления загрузкой экструдера	Условия моделирования	Количество экструдата, полученного за один час работы, кг	Количество электроэнергии, затраченной за один час работы, кВт·ч	Удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/кг
САР стабилизации тока нагрузки ПЭД экструдера	$u_3 = 0,75;$ $I_{\text{yā}}^{\text{cā}} = 18\text{A}$	175,3	12,28	0,0700
	$u_3 = 0,75;$ $I_{\text{yā}}^{\text{cā}} = 20\text{A}$	200	13,73	0,0687
	$u_3 = 0,75;$ $I_{\text{yā}}^{\text{cā}} = 22\text{A}$	222,4	15,11	0,0680
СГУ степенью нагрева ПЭД экструдера	$u_3 = 0,75;$ без упредителя	247,1	16,69	0,0675
	$u_3 = 0,85;$ без упредителя	227	16,01	0,0703
	$u_3 = 0,85$ с упредителем	231	16,57	0,0717

Анализ результатов показывает, что при реализации системы гарантирующего управления (СГУ) степенью нагрева ПЭД экструдера, его производительность может быть повышена до 30 % относительно варианта системы с регулированием тока этого ПЭД. При этом, одновременно, удельные затраты электроэнергии непосредственно только на процесс экструдирования снижаются на 5 %. Очень важно, что для изменяющихся текущих условий работы экструдера, СГУ сама, в реальном времени, определяет текущее допустимое значение степени загрузки экструдера, решая одновременно и задачу оптимизации процесса и задачу гарантирования соблюдения условий эксплуатации ПЭД экструдера. Применение в алгоритме регулирования тока нагрузки его прогнозирования на время запаздывания вперед самым существенным образом расширяет запас устойчивости этого контура регулирования, позволяя контуру эффективно работать не только с различными значениями u_3 , но, очевидно, и с различными видами сырья.

Литература

1. Хобин В.А., Егоров В.Б. Управление процессом экструдирования растительного сырья в условиях ограниченности ресурсов и неопределенностей // Сб. докл. II Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация – 2009». – Одесса: ОНАПТ, 2009. – С. 30 – 31.
2. Хобин В.А., Егоров В.Б. Проблемы и концепция разработки эффективной САУ процессом экструдирования биополимеров // XVII Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика – 2010». Тез. доп. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – С. 303 – 305.
3. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
4. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / Под ред. А.С. Ключева. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
5. Хобин В.А., Егоров В.Б. Проблемы математического описания процесса экструдирования биополимеров как объекта управления и технология их преодоления // Сб. докл. III Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация – 2010». – Одесса: ОНАПТ, 2010. – С. 61 – 62.
6. Хобин В.А., Егоров В.Б. Имитационная математическая модель процесса экструдирования биополимеров как объекта управления // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2010. – Вип. 38. – Т. 1. – С. 386 – 399.
7. Кругликов В.К. Вероятностный машинный эксперимент в приборостроении. – Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1985. – 247 с.: ил.

8. Ажогин В.В., Згуровский М.З. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ. – К.: Виш. шк., 1983. – 280 с.
9. Хобин В.А., Егоров В.Б. Процесс экструдирования растительного сырья как объект управления: особенности, задачи управления, структура // Мат. XV міжнарод. конф. з автоматичного управління (Автоматика – 2008). – Одеса: ОНМА, 2008. – Мат. в 2-х т. – Т. 2. – С. 643 – 646.
10. Хобин В.А., Егоров В.Б. Концептуальна модель процесу екструдювання рослинної сировини як об'єкта управління // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2009. – Вип. 36. – Т. 2. – С. 246 – 254.
11. Смит О.Дж.М. Автоматическое регулирование. – М.: Физматгиз, 1962. – 847 с.
12. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием: Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
13. Хобин В.А. Перспективы применения автоматических систем прогнозированного управления с переменной структурой в пищевой технологии // Сб. научн. тр. «Автоматизация на процесите в хранителновкусова промишленост». – г. Пловдив, НРБ, 1981. – С. 54 – 63.
14. Хилал М. Прогнозирование перегрева приводных электродвигателей в задачах управления нагрузкой технологического оборудования: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.07. – Одесса, 1996. – 147 с.
15. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / Монография: Одесса: «ТЭС», 2008. – 304 с.

УДК 664.743.02:519.876.5

К ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССА СЕПАРИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ НА СИТАХ С ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ

Амбарцумянц Р.В., д-р техн. наук, профессор, Амбарцумянц Р.Р., инженер
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В статье изложен новый методологический подход к изучению процесса сепарирования частиц на поступательно движущихся ситах. Доказано, что существующий до настоящего времени метод не совсем корректен. Получены необходимые выражения, позволяющие определить значение ускорения сита при известной геометрии отверстий на сите. Предложен принцип определения диаметра отверстий на сите при заданном значении его ускорения.

In the article new methodological approach to the staying of the process of separation of particles on moving – forward sieves is describes. It is well – proved that the existing until present method is no quite correct. The necessary expressions are got allowed to define a minimum value of a sieve acceleration for being knocked over at the known geometry of holes a sieve. A new approach for the determination of diameter of holes on a set value of sieve acceleration is offered.

Ключевые слова: сито, сепарирование, ускорение, статическое равновесие, силы инерции, тяжести.

Для сепарирования сыпучих грузов в зерноперерабатывающей промышленности широко используют сита с отверстиями различной конфигурации, в частности, круглыми. Естественно положить, что форма и размеры отверстий оказывают существенное влияние на движение частиц и, следовательно, на производительность ситовых сепараторов. Для изучения динамики движения частиц определяющее значение имеет правильное определение значения усилий, действующих на частицу и предопределяющих ее движение. В работе [1] приведена расчетная модель взаимодействия частицы с ситом на горизонтальной плоскости (рис.1,а) и под углом относительно горизонтали (рис.1,б).

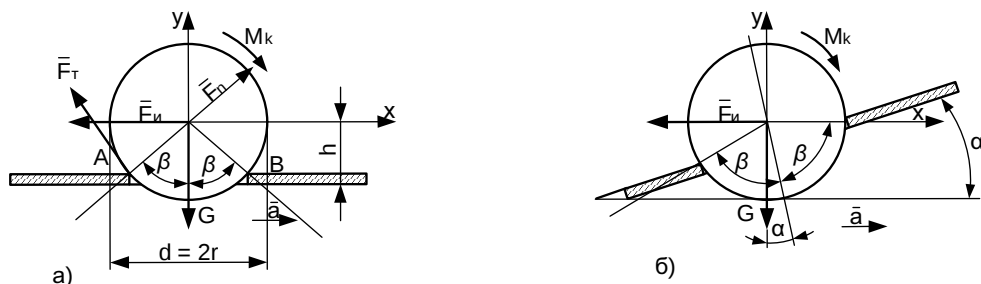


Рис. 1 – Расчетная модель взаимодействия частицы с отверстием сита в горизонтальной плоскости – а, под углом относительно горизонтали – б