

УДК 007.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.136609

## Разработка метода структурно–параметрической оптимизации в системах с непрерывной подачей технологических продуктов

И. А. Луценко, С. С. Коваль, И. Г. Оксанич, О. Ю. Сердюк, А. В. Коломиц

*Підвищення ефективності безперервних технологічних процесів, на практиці, супроводжується певними труднощами. Наявність цих труднощів обумовлена тим, що якість вихідного технологічного продукту функціонально пов'язана з величиною енергоспоживання. В свою чергу, відсутність необхідних ступенів свободи, в рамках досліджуваної системи, обмежує оптимізаційні можливості процесів управління.*

*Для підвищення ступенів свободи управління технологічний механізм був розділений на технологічні секції. Секції дозволяють збирати незалежні модулі, кожен з яких має свою підсистему стабілізації якісного параметру технологічного продукту.*

*Такий підхід дозволив встановлювати різні траєкторії зміни якісних параметрів технологічного продукту в рамках однієї виробничої стадії.*

*В результаті дослідження було встановлено, що зміна структури технологічного механізму (кількості модулів) і траєкторії зміни якісного параметру технологічного продукту дозволяє змінювати загальну величину енергоспоживання і зносу робочих механізмів устаткування.*

*Запропонований підхід дозволив отримати дві ступені свободи управління: можливість зміни секційної структури в модульні системи, що само стабілізуються, і зміни траєкторії якісного параметра технологічного продукту в рамках виробничої стадії.*

*Отримання ступенів свободи управління, в свою чергу, дозволило змінювати ефективність використання ресурсів безперервного технологічного процесу і розробити метод структурно-параметричної оптимізації. В якості критерію оптимізації використовувався оціночний показник, який пройшов перевірку на можливість його використання в якості критерію ефективності.*

*В результаті, оптимізаційні можливості управління істотно зростають.*

*Принципи підходу розглядаються в роботі на прикладі одно-, дво- і трьох стадійного процесу безперервного нагріву рідини*

*Ключові слова: структурно-параметричну оптимізація, ефективність безперервного процесу, безперервний технологічний процес*

### 1. Введение

Еще на этапе развития автоматизации [1] было очевидно, что основной задачей любой производственной структуры является максимизация эффективности использования ресурсов, в процессе выпуска продукции требуемого качества с необходимой производительностью [2].

Технологически сложнее эти вопросы решаются в системах с непрерывной подачей входных продуктов. Для достижения требуемого качества здесь приходится решать вопросы стабилизации качественных параметров выходной продукции [3].

Известно, что дополнительные потери запуска снижают общую эффективность технологического процесса, для максимизации которой непрерывные системы изначально имеют меньше возможностей. Это связано с тем, что в системах этого класса качество и производительность функционально связаны между собой [4].

Например, если потребителю необходима жидкость, нагретая до заданной температуры, то изменяя интенсивность подачи холодной жидкости, и подбирая интенсивность подачи энергетического продукта, можно выбрать наиболее эффективный режим функционирования системы нагрева.

Но потребителю необходим продукт, который имеет не только требуемые качественные, но и количественные параметры. Поэтому вопрос повышения эффективности в непрерывных системах связан исключительно с использованием структурных изменений в технологической части.

Получить степень свободы управления можно в том случае, если между системами, которые изменяют качественные параметры технологической продукции, расположить системы управления запасами (системы буферизации). В таком случае в рамках непрерывной системы решается вопрос обеспечения требуемого качественного параметра выходного продукта, с учетом максимальной эффективности. В рамках системы буферизации можно получить выходной продукт с нужными качественными и количественными показателями, также с учетом максимальной эффективности [5] (рис. 1).

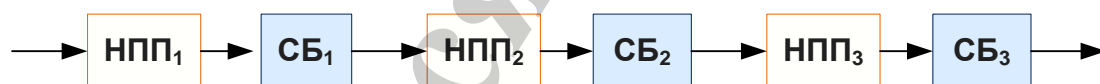


Рис. 1. Структура непрерывного производственного процесса, преобразовательные стадии которого разделены системами буферизации: НПП – непрерывный преобразовательный процесс, СБ – система буферизации

Практическая реализация такого принципа может сдерживаться двумя факторами.

Первый фактор – возможность промежуточной буферизации может быть исключена по технологическим соображениям.

Второй фактор имеет экономическую основу. Системы буферизации связывают большие объемы промежуточной продукции. Кроме того, производительность преобразовательных систем, должна быть, тем выше, а размеры механизмов буферизации, тем больше, чем ближе они находятся к началу технологического процесса. Иначе не будет обеспечен принцип непрерывности процесса и возможность его оптимизации на последующих стадиях.

По этим причинам большинство энергоемких и ресурсоемких производств используют технологию непрерывного преобразовательного процесса [8] (рис. 2).



Рис. 2. Структура непрерывного производственного процесса, в котором преобразовательные стадии функционально связаны между собой

При таком подходе необходимо тщательное согласование параметров функционально связанного оборудования еще на этапе проектирования. Но в процессе функционирования качественные параметры входных продуктов, особенно на начальной стадии производства, могут сильно изменяться [9]. Неизбежно изменяются стоимостные оценки входных и выходных продуктов производства [10], а также спрос потребителя на конечный продукт.

По этим причинам возможности оптимизации непрерывных технологических процессов связанных между собой систем преобразовательного класса крайне ограничены.

Изменение технологического параметра любого процесса, как правило, приводит к изменению производительности оборудования всей линии, что требует новых настроек всех архитектурно связанных единиц. Такая перенастройка в ресурсоемких и энергоемких производствах может занимать до получаса и более [11]. При этом такой процесс больше направлен на стабилизацию качественных показателей, поскольку повышение эффективности одной стадии производства не означает автоматическое повышение эффективности всех связанных процессов.

Тем не менее, оптимизационные возможности систем непрерывного преобразования могут быть существенно повышены, если технологический механизм реализовать в виде секционной структуры. В случае если каждый модуль технологической части будет иметь собственную структуру стабилизации качества выходного продукта, повышения эффективности можно добиться путем изменения параметров управления, в рамках одной производственной стадии.

Поэтому разработка методов повышения эффективности непрерывных технологических процессов является важной научной задачей.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросы возможности повышения эффективности непрерывных технологических процессов в настоящее время интенсивно исследуются и направлены на комплексное решение задач оптимизации. Среди разрабатываемых направлений можно выделить работы, направленные на совершенствования конструктивных особенностей преобразовательных систем [12], снижения себестоимости процесса за счет варьирования параметров входных технологических продуктов [13], децентрализации настроек [14]. При

этом направления, которые может решить использование структурной оптимизации, в работах не исследуются.

Большинство работ, касающихся темы оптимизации непрерывных технологических процессов традиционно связаны с созданием новых или развитием существующих алгоритмов оптимизации [15]. Так, в [16] предлагается алгоритм оптимизации непрерывных процессов на основе природного гидрологического цикла, в [17] комбинация метода гибридной спектральной коллокации и метода гомотопического анализа, в [18] мультимодальной оптимизации. Отличительной особенностью отмеченных работ является использование разнообразных показателей, которые применяются в качестве критерия оптимизации. При этом ни один из рассматриваемых в работах [12–18] показателей не верифицирован как критерий, который действительно указывает на режим максимально эффективного использования ресурсов.

В [19] отмечено, что непрерывные процессы должны оптимизироваться с учетом «конкурирующих» свойств системы. К числу таких свойств отнесены: отклонение регулируемой величины от заданного значения, длительность переходного процесса, затухание переходного процесса, запас устойчивости САУ по модулю и фазе и т. д.

Используемые показатели позволяют изменять параметры исследуемых технологических процессов. Но эти показатели используются не для оптимизации стабильного технологического процесса, а для его стабилизации.

В работе [20] для решения задачи оптимизации предлагается определять эффективное время процесса.

Очевидно, что оптимальному режиму функционирования системы соответствует вполне определенное время операционного процесса. Однако изменение производительности процесса приводит к нелинейному изменению входных и выходных параметров операционного процесса. Поэтому определение наиболее эффективного времени процесса, при таком подходе, требует наличие степеней свободы управления. В противном случае, процесс оптимизации требует изменения качественных параметров выходного продукта.

Поэтому процесс повышения эффективности осуществляется в достаточно узком диапазоне изменения управлений. В рамках такого диапазона качественные параметры независимого непрерывного технологического процесса [21], либо параметров всего непрерывного производства [22], изменяются в допустимых пределах.

Поскольку диапазон допустимых управлений в таких условиях очень мал, усилия технологов больше направлены на решение задачи устойчивости, а не оптимизации процесса.

Таким образом, существует задача увеличения степеней свободы непрерывного технологического процесса, для повышения оптимизационных возможностей, с целью максимизации эффективности использования ресурсов.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение количества степеней свободы в системах непрерывного преобразования технологических продуктов с использованием метода структурно-параметрической стабилизации, что позволит повысить их эффективность.

Для достижения поставленной цели исследования решались следующие задачи:

- построить секционную модель динамической системы нагрева жидкости с возможностью определения энергопотребления и износа механизмов нагрева;
- определить оптимизационные возможности секционной динамической системы нагрева в условиях заданного температурного параметра на выходе и требуемой производительности;
- разработать метод структурно-параметрической оптимизации секционной динамической системы нагрева жидкости.

### 4. Повышение степеней свободы непрерывной системы с использованием модульного подхода

По сравнению с периодическими системами, непрерывные системы не имеют степеней свободы, если интенсивность подачи технологического продукта является заданной.

На рис. 3 изображена структура, в рамках которой обеспечивается нагрев холодной жидкости до заданной температуры с заданной производительностью.

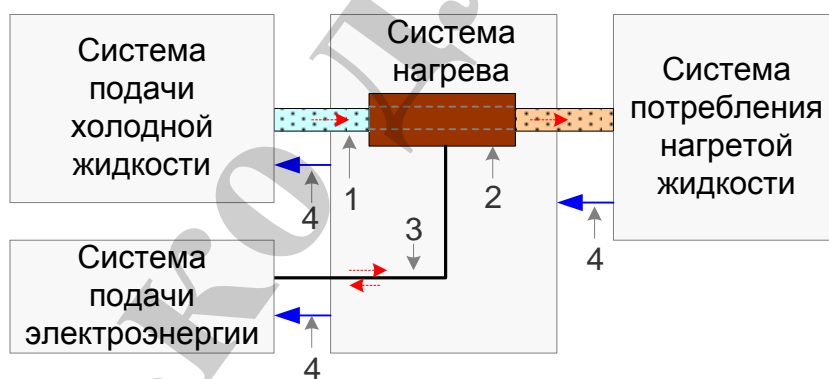


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия системы нагрева, имеющей один нагреватель, с системами-контрагентами: 1 – сквозной канал перемещения жидкости; 2 – технологический механизм нагрева; 3 – канал подачи энергетического продукта; 4 – каналы управления

При этом существует единственное управление подачей энергетического продукта, при котором заданные технологические параметры будут установлены.

К примеру, в системе порционного нагрева жидкости, нагрев до заданной температуры к определенному моменту времени может быть получен с использованием множества управлений. Для этого можно изменять

интенсивность нагрева во времени, в процессе одной технологической операции.

Таким образом, в непрерывных системах, с жестко определенной структурой технологической части, отсутствуют возможности для реализации оптимального управления с использованием принципов параметрической оптимизации.

Повышения степеней свободы можно добиться, если использовать многосекционный технологический механизм.

Для проведения исследований была создана многосекционная модель системы нагрева жидкости, с возможностью стабилизации температурных параметров на выходе секционных модулей. На рис. 4 изображена модель, состоящая из 20 секций проточного нагрева жидкости, объединенных в два самостабилизируемых модуля.

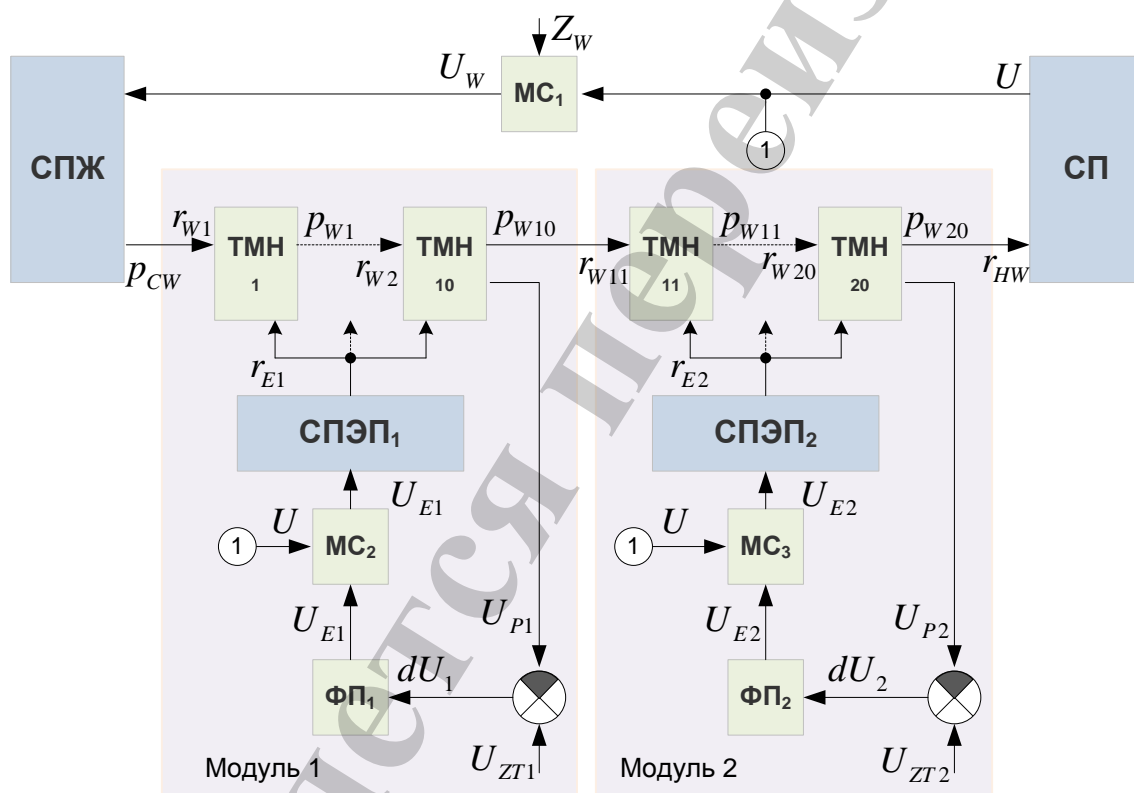


Рис. 4. Структурная схема динамической системы нагрева жидкости с двумя секционными модулями стабилизации: СПЖ – система подачи холодной жидкости; СП – система потребления нагретой жидкости; СПЭП – система подачи энергетического продукта; ТМН – технологический механизм нагрева; МС – механизм синхронизации передачи данных; ФП – функциональный преобразователь

Работа системы нагрева начинается в момент подачи сигнала  $U$  системой потребления нагретой жидкости на вход синхронизации механизма МС<sub>1</sub>. Этот сигнал также подается на входы синхронизации механизмов МС<sub>2</sub> и МС<sub>3</sub>.

На второй вход механизма  $MC_1$  подается сигнал задания интенсивности подачи холодной жидкости ( $Z_w$ ), который в момент подачи сигнала  $U$  начинает поступать на вход задания системы подачи холодной жидкости СПЖ. С выхода СПЖ холодная жидкость ( $p_{cw}$ ) начинает поступать на вход механизма нагрева, выполненного из последовательно соединенных технологических механизмов.

На вход первой секции поступает входной поток жидкости  $\Gamma_{w1}$ , а на ее выходе формируется более нагретый выходной поток жидкости  $p_{w1}$ . Выходной поток жидкости  $p_{w1}$  первой секции нагрева является входным потоком  $\Gamma_{w2}$  второй секции нагрева и т. д.

Стабилизацию температурного параметра рассмотрим на примере работы первого модуля нагрева. В данном случае в состав первого модуля нагрева входит десять секций нагрева.

С выхода последней секции нагрева температурный параметр  $U_{P1}$  поступает на инвертирующий вход двухвходового сумматора. На второй вход сумматора поступает сигнал эталонного значения температуры нагрева  $U_{ZT1}$ . На выходе сумматора формируется сигнал  $dU_1$ , который поступает на вход функционального преобразователя ФП<sub>1</sub>. В состав функционального преобразователя входит пропорционально-интегрирующее звено.

На выходе функционального преобразователя формируется сигнал управления  $U_{E1}$ , который через механизм синхронизации подается на вход СПЭП<sub>1</sub>. С выхода СПЭП<sub>1</sub> поток электроэнергии поступает на энергетические входы технологических механизмов нагрева ТМН<sub>1</sub>–ТМН<sub>10</sub>.

Сумматор, функциональный преобразователь, механизм синхронизации и система подачи энергетического продукта, совместно с объединяющими их каналами передачи сигналов, образуют контур обратной связи. Поэтому через некоторое время после начала работы, на выходе модулей нагрева устанавливается заданная температура.

На выходе второго, в общем случае, последнего модуля, устанавливается температура нагрева, необходимая потребителю. Для этого используется сигнал  $U_{ZT}$ .

На выходе первого модуля нагрева может устанавливаться произвольное значение температурного параметра  $U_{ZT1}$ , в диапазоне от начальной температуры жидкости на входе модуля до температуры нагрева последующего модуля. Этим обеспечивается необходимая для управления степень свободы. При этом соответствующая энергетическая мощность автоматически устанавливается выходе СПЭП<sub>1</sub> и СПЭП<sub>2</sub>.

## 5. Формирование и обработка данных операции нагрева жидкости

Для обработки данных операции нагрева входные и выходные технологические продукты регистрируются и могут быть отображены в виде соответствующих сигналов регистрации:  $rq_L(t)$  – сигнала регистрации входного потока жидкости;  $rq_E(t)$  – сигнала регистрации потока энергетического продукта; сигнала регистрации потока нагретой жидкости  $pq_L(t)$  (рис. 5).

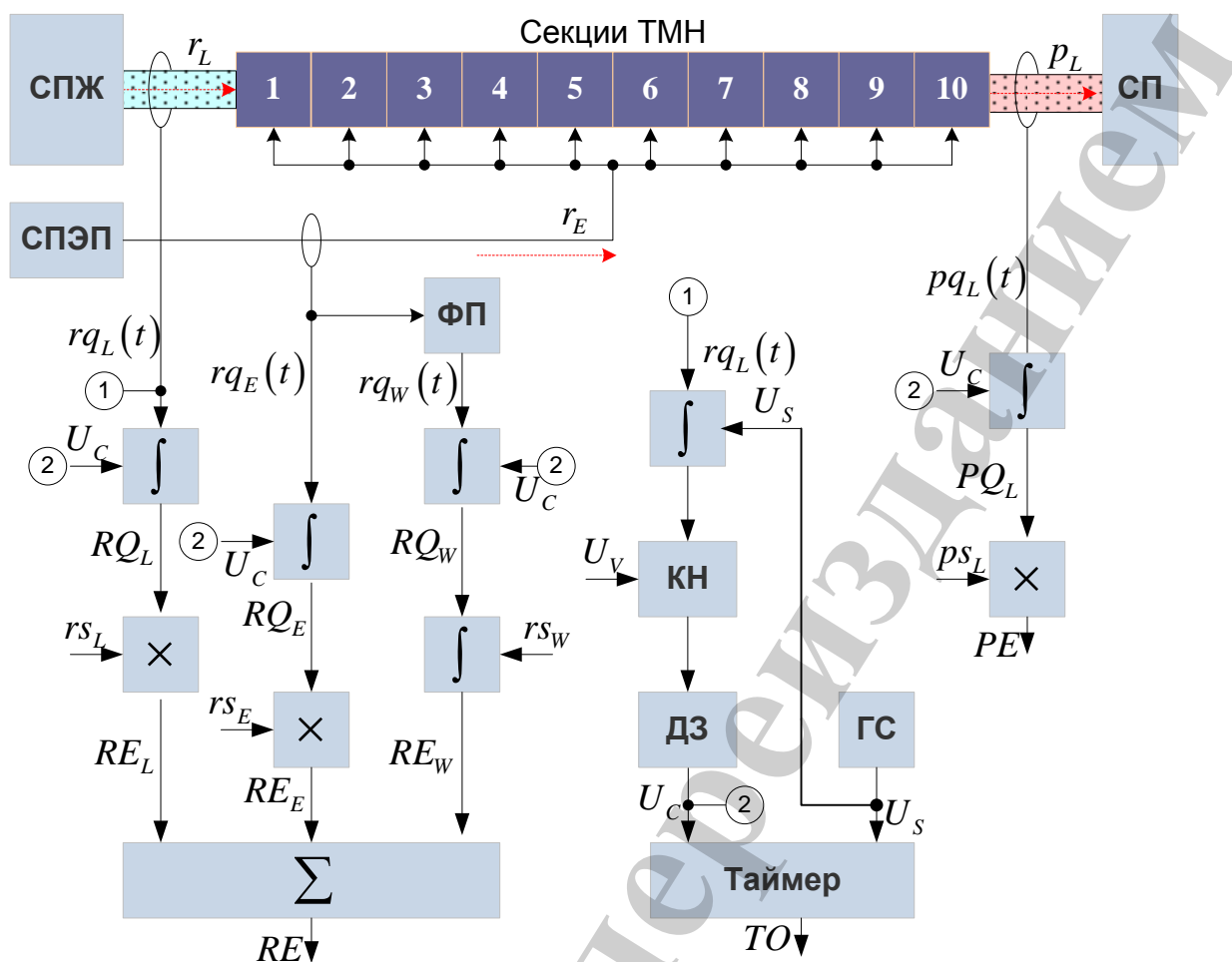


Рис. 5. Система формирования и обработки данных операции нагрева:  
 $rq_L(t)$  – сигнал регистрации входного потока жидкости;  $rq_E(t)$  – сигнал регистрации потока электроэнергии;  $rq_W(t)$  – сигнал регистрации потока износа механизмов нагрева;  $pq_L(t)$  – сигнал регистрации потока нагретой жидкости;  
 $RQ_L$  – объем входной жидкости;  $RQ_E$  – величина энергопотребления;  
 $RQ_W$  – величина износа нагревателей;  $PQ_L$  – объем нагретой жидкости;  
 $rs_L$  – стоимостная оценка единицы объема входной жидкости;  $rs_E$  – стоимостная оценка единицы энергетического продукта;  $rs_W$  – стоимостная оценка единицы износа;  
 $ps_L$  – стоимостная оценка единицы объема нагретой жидкости;  
 $RE_L$  – стоимостная оценка входного объема жидкости;  $RE_E$  – стоимостная оценка потребленной электроэнергии;  $RE_W$  – стоимостная оценка износа нагревателей;  $RE$  – стоимостная оценка входных продуктов операции;  
 $PE$  – стоимостная оценка выходных продуктов операции;  $TO$  – время операции;  
 $U_S$  – сигнал начала операции;  $U_C$  – сигнал завершения операции;  
 $U_V$  – общий объем механизмов нагрева

Сигнал регистрации износа механизмов нагрева может быть определен аналитически, в виде сигнала, функционально связанного с сигналом регистрации потока электроэнергии.

Для определения величины износа электронагревателя за время технологической операции использовалось выражение  $T = T_n k_u^{-\alpha}$  [23]. Здесь  $T$  – срок



службы электронагревателя;  $T_n$  – число часов работы при номинальном напряжении;  $k_u$  – отношение фактического напряжения к номинальному;  $\alpha=14$  – показатель изменения среднего срока службы электронагревателя.

Операция нагрева определяется моментом ее начала и моментом завершения. Поскольку нагрев проточной жидкости идет непрерывно, момент начала операции ( $t_s$ ) устанавливается произвольно, с использованием генератора единичного импульсного сигнала (ГС). В этот момент осуществляется сброс накопительных интеграторов и начинается процесс интегрирования сигналов регистрации технологических продуктов.

Операция завершается в момент, когда интегральное значение интенсивности потока жидкости становится равным внутреннему объему канала секционных механизмов нагрева

$$\int_{t_s}^t r q_L(t) dt \rightarrow U_V = 20\pi R^2 L.$$

В этот момент времени переключается компаратор напряжения КН. Дифференцирующее звено ДЗ выделяет передний фронт КН, и формирует сигнал завершения операции  $U_C$ . В результате, на выходе таймера времени формируется сигнал ТО, численно равный времени операции нагрева.

Система формирования и обработки данных исследуемой операции позволяет определить все необходимые для исследования параметры и показатели операционного процесса.

## **6. Определение оптимизационных возможностей секционной модели динамической системы нагрева жидкости**

Для проведения контрольного исследования была создана система с одним модулем нагрева жидкости, который состоял из 20 секций нагревателей.

Температура окружающей среды 20 °С.

В этом случае заданной температуры нагрева ( $U_{ZT}=100$  °С) мощность подачи электроэнергии автоматически была установлена на уровне 60.7 кВт. Износ нагревателей за время операции нагрева составил 0.0097 %.

На втором этапе исследования определялась возможность оптимизации процесса нагрева, при использовании двухмодульной архитектуры системы нагрева. С этой целью значение  $U_{ZT1}$  изменялось от 40 до 85 °С. Автоматически изменялась мощность энергии, подаваемая системами СПЭП<sub>1</sub> и СПЭП<sub>2</sub> (рис. 6).

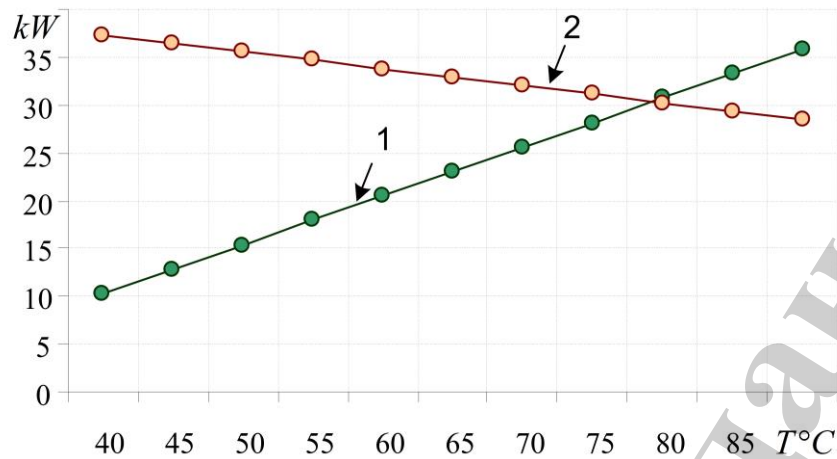


Рис. 6. Изменения подаваемой мощности электроэнергии на секции модулей нагрева в зависимости от установленного эталонного значения температуры первого модуля: 1 – изменение подачи энергии на первый модуль; 2 – изменение подачи энергии на второй модуль

На рис. 7 показано, как изменялась общая величина энергопотребления системы нагрева и износа механизмов нагрева, в процессе изменения мощностей подаваемых на механизмы нагрева модулей 1 и 2.

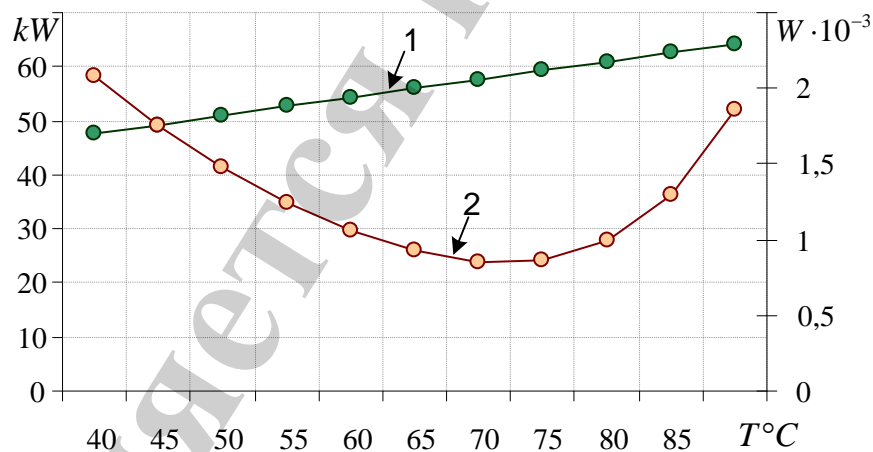


Рис. 7. Изменение энергопотребления (1) и износа нагревателей (2) в зависимости от изменения задания эталонного значения температурного параметра первого модуля в двухмодульной системе нагрева

При этом величина энергопотребления возрастает линейно, а функция изменения износа имеет минимум. Это означает, что суммарный минимум затрат будет соответствовать минимальному износу нагревателей.

Величина энергопотребления двухмодульной системы не превышает энергопотребление одномодульной системой нагрева, а величина износа, за

счет оптимизации, существенно снижена. При этом для минимизации износа, необходимо увеличивать температурный диапазон первой модульной системы.

Это означает, что секционная модель нагрева обеспечивает возможность оптимизации за счет перераспределения мощностей между модулями системы.

На следующем этапе исследовалась возможность структурной оптимизации процесса нагрева путем использования разного количества секций нагрева в модулях системы. При этом стабилизировались задания температурных параметров на уровне  $U_{ZT1}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{ZT2}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Изменялось количество секций, входящих в состав модулей.

Количество секций нагрева в модуле 1 изменялось от 6 (рис. 8) до 14. При этом общее количество секций системы нагрева не изменялось.

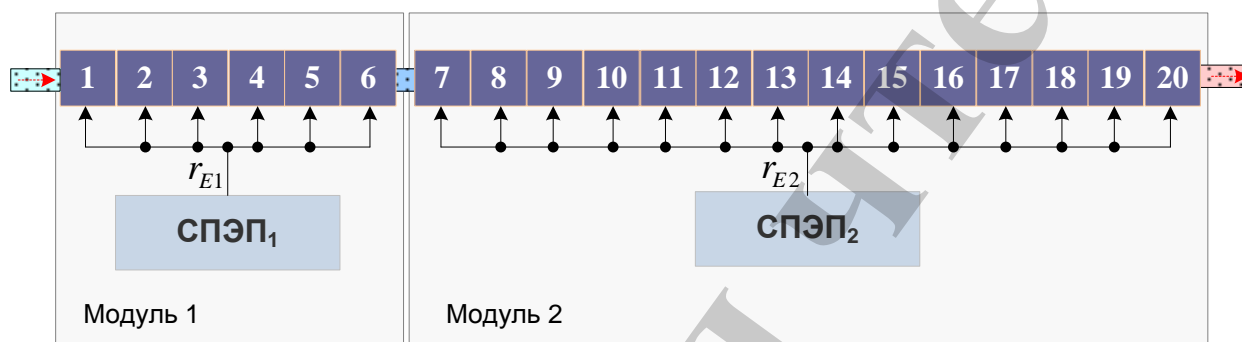


Рис. 8. Принцип перераспределения секций нагрева между модулями

Исследования показали, что перераспределение секций нагрева между модулями не приводит к смещению минимума износа нагревателей (рис. 9).

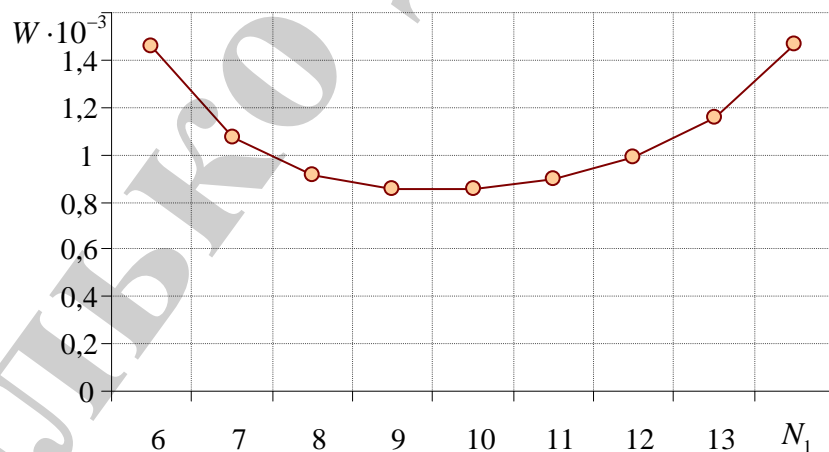


Рис. 9. Зависимость износа нагревателей от количества секций нагрева, которые входят в состав первого модуля

Дальнейшие исследования проводились для системы нагрева состоящей из трех модулей. В состав каждого модуля было установлено по 7 секций нагревателей.

На основании исследования двухмодульной системы нагрева была принята гипотеза о том, что для минимизации износа температурные режимы каждого предшествующего модуля нагрева должны быть смещены вправо, от установок равномерного распределения. Так, если температура нагрева должна изменяться от 20 °С до 100 °С, равномерное распределение нагрева между модулями приведет к установкам  $U_{ZT1}=46,7$  °С,  $U_{ZT2}=73,4$  °С,  $U_{ZT3}=100$  °С.

Изменение эталонного значения  $U_{ZT1}$  в сторону увеличения показало, что минимум износа находится в области 53 °С (рис. 10).

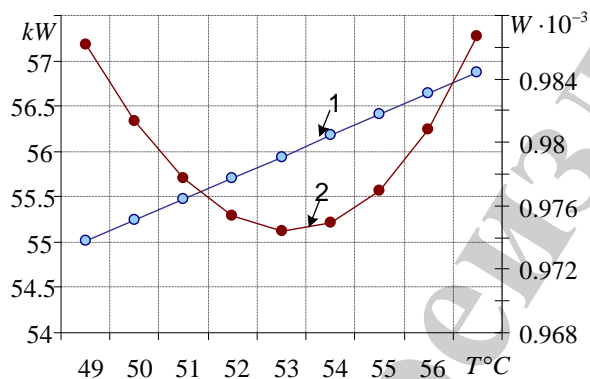


Рис. 10. Изменение энергопотребления и износа нагревателей в зависимости от изменения задания эталонного значения температурного параметра первого модуля в трехмодульной системе нагрева: 1 – величина энергопотребления; 2 – величина износа электронагревателей

После этого в сторону увеличения изменялось эталонное значение  $U_{ZT2}$ . Минимальный износ тепловых секций был определен при температурном задании в районе 81 °С (рис. 11).

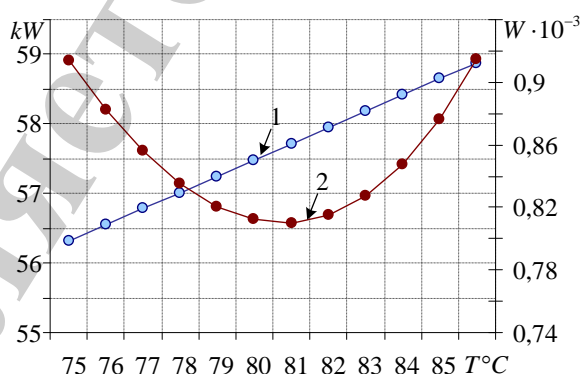


Рис. 11. Изменение энергопотребления и износа нагревателей в зависимости от изменения задания эталонного значения температурного параметра второго модуля в трехмодульной системе нагрева: 1 – величина энергопотребления; 2 – величина износа электронагревателей

Проведенные исследования показывают, что модульное построение технологической части системы нагрева позволяет увеличить количество

степеней свободы. При этом такой технологический параметр как износ, имеет экстремум, что позволяет использовать методы оптимизации для повышения эффективности непрерывного технологического процесса.

При этом необходимо отметить, что снижение износа за время операции может сопровождаться ростом энергопотребления, а увеличение количества секций нагрева к изменению времени операции.

Поскольку улучшение одного параметра может приводить к ухудшению другого параметра, для высказывания суждения об эффективности операции нагрева необходимо использование обобщенного оценочного показателя [24]. Данный показатель прошел верификацию на предмет его адекватности показателю эффективности [25–27].

Для определенности примем, что стоимостная оценка единицы расхода электроэнергии составляет 0.02 ден. ед., стоимостная оценка единицы износа 100 ден. ед., стоимостная оценка единицы холодной жидкости 1 ден. ед., а стоимостная оценка нагретой жидкости 3.2 ден. ед. Если определить эффективность операции с одним модулем нагрева, получим:

$$E = \frac{(3.2 - 2.38)^2}{2.38 \cdot 3.2 \cdot 0.333^2} = 0.786.$$

Разбиение секций нагревателя на два модуля позволило выбрать режим нагрева первого модуля, при котором эффективность процесса повысилась на 61,6 % , и в максимуме составила  $E=1.27$  (рис. 12).

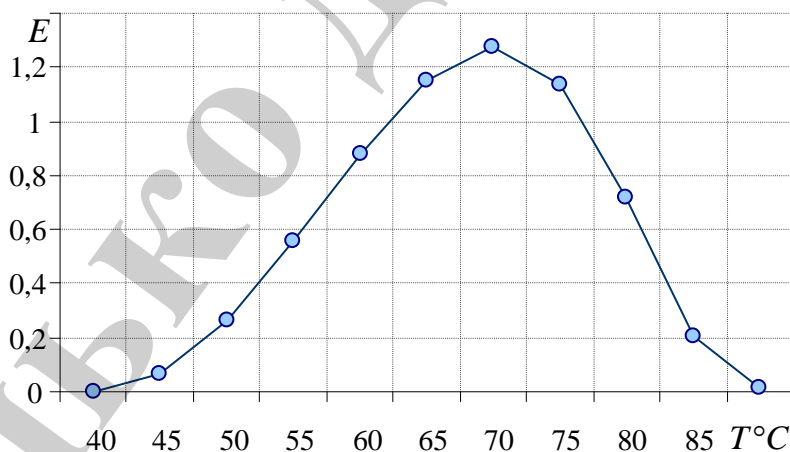


Рис. 12. Изменение эффективности использования ресурсов в двухмодульной системе нагрева при изменении температурного параметра первого модуля

Разбиение секций нагрева на три модуля привело к возможности получения максимума эффективности  $E=0.73$  на первом шаге оптимизации, к эффективности  $E=0.1$  на втором шаге оптимизации. И только на третьем шаге оптимизации эффективность трехмодульной системы на 2.3 % превысила эффективность двухмодульной системы.

## **7. Определение метода структурно-параметрической оптимизации**

Проведенные исследования показали, что разделение технологического механизма на секции позволяет создать модульную архитектуру стабилизации качественного параметра технологического продукта. В свою очередь, изменение архитектуры системы с непрерывной подачей технологического продукта позволяет получить дополнительные степени свободы управления. Такой подход позволяет реализовать метод структурно-параметрической оптимизации, который состоит в следующем:

1. Технологический механизм собирается из двух или более одинаковых модулей, в каждом из которых обеспечивается стабилизация качественного параметра технологического продукта на индивидуальном уровне. Для этого каждый технологический модуль имеет собственную структуру стабилизации.

2. После завершения операции стабилизации, для каждой модульной операции, в поисковом режиме, определяются такие интегральные параметры как стоимостная оценка входных продуктов операции, стоимостная оценка выходных продуктов операции и время операции. Определяется максимальная эффективность технологической операции. Управление, при котором достигается максимум эффективности, фиксируется.

3. Если количество модулей больше двух, процесс оптимизации циклически повторяется для каждой модульной технологической операции слева на право.

4. После поисковой оптимизации повторяется до тех пор, пока повышения эффективности является значимым.

5. Процедура оптимизации повторяется для каждой новой структуры, в результате чего выбирается структура, в рамках которой параметрическая оптимизация обеспечивает значимое повышение эффективности использования ресурсов.

## **8. Обсуждение результатов исследований, связанных с разработкой метода структурно-параметрической оптимизации**

Оптимизация непрерывных технологических процессов в производственных условиях является практически сложной задачей. Эта сложность обусловлена несколькими факторами.

Первый фактор – это сложность стабилизации качественного параметра технологического продукта на стадии преобразования. Этот фактор во многом обусловлен задержками, которые тем значимей, чем длительней преобразовательный процесс.

Второй фактор обуславливается тем, что стадии преобразования технологического продукта функционально взаимосвязаны. При этом повышение производительности одной стадии преобразования приводит к необходимости синхронизировать производительность всей цепочки связанных процессов.

Деление одной стадии непрерывного процесса на технологические модули, с возможностью независимой стабилизации, с одной стороны, позволяет

повысить устойчивость динамической системы, с другой – существенно расширить ее оптимизационные возможности.

Конечно, деление технологического механизма на части может повышаться его общей стоимостью. В таком случае вопросы исследования должны учитывать этот фактор.

Однако функциональная независимость модулей технологической части имеет еще ряд преимуществ. Это – повышение маневренности в процессе доставки менее габаритного оборудования, а также возможность завершения технологического процесса при выходе из строя отдельного модуля.

Конечно, изменение качественного параметра технологического продукта на промежуточных стадиях, в общем случае, должно ограничиваться такими пределами, в рамках которых качество выходного продукта не ухудшается.

К недостаткам такого подхода можно отнести необходимость контроля процесса износа технологических механизмов, поскольку при таком подходе они будут работать в разных эксплуатационных режимах. При этом частота ремонтно-профилактических работ возрастает.

## **9. Выводы**

1. Разработана секционно-модульная модель динамической системы, которая обеспечивает возможность изменения структуры технологического механизма. В модели доступно определение величины энергопотребления и износа его рабочих секций. Такой подход обеспечивает независимую стабилизацию качественного параметра технологического продукта в рамках обеспечения требуемой производительности.

2. Установлено, что предложенный подход обеспечивает повышение оптимизационных возможностей процессов управления. Появление таких возможностей обусловлено увеличением количества степеней свободы путем изменения параметров стабилизации на предшествующих стадиях технологического процесса. Увеличение степеней свободы управления позволяет расширить возможности поисковой оптимизации, а, соответственно, эффективность использования ресурсов технологического процесса. В рассмотренном примере эффективность использования ресурсов была повышена на 61,6 %.

3. Особенностью предложенного метода структурно-параметрической оптимизации является повышение количества степеней свободы управления непрерывным технологическим процессом. Это позволило осуществлять циклически-последовательную оптимизацию по критерию эффективности использования ресурсов. Деление технологической части на модули прекращается, если результаты поисковой оптимизации не приводят к значимому изменению эффективности использования ресурсов.

## **Литература**

1. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.

2. Lee T. H., Adams G. E., Gaines W. M. Computer process control: modeling and optimization. Wiley, 1968. 386 p.
3. Stability of adaptive systems: passivity and averaging analysis / Anderson B. D., Bitmead R. R., Johnson C. R. et. al. MIT Press, 1986. 300 p.
4. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
5. Lutsenko I. Principles of cybernetic systems interaction, their definition and classification // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5, Issue 2 (83). P. 37–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79356>
6. Development of the method of quasi-optimal robust control for periodic operational processes / Lutsenko I., Fomovskaya E., Koval S., Serdiuk O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, Issue 2 (88). P. 52–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107542>
7. Lutsenko I. Optimal control of systems engineering. development of a general structure of the technological conversion subsystem (Part 2) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 1, Issue 2 (73). P. 43–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36246>
8. Benett S. A History of Control Engineering 1800–1930. Institution of Engineering and Technology, 1986. 214 p.
9. Барский Л. А., Козин В. З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. М.: Недра, 1978. 486 с.
10. Моделирование и управление горнорудными предприятиями / Каграманян С. Л., Давидкович А. С., Мальщев В. А. и др. М.: Недра, 1989. 360 с.
11. Гончаров Ю. Г., Давидкович А. С. Автоматический контроль и регулирование на железорудных обогатительных фабриках. М.: Недра, 1968. 227 с.
12. Leonzio G. Optimization through Response Surface Methodology of a Reactor Producing Methanol by the Hydrogenation of Carbon Dioxide // Processes. 2017. Vol. 5, Issue 4. P. 62. doi: <https://doi.org/10.3390/pr5040062>
13. Sahlodin A., Barton P. Efficient Control Discretization Based on Turnpike Theory for Dynamic Optimization // Processes. 2017. Vol. 5, Issue 4. P. 85. doi: <https://doi.org/10.3390/pr5040085>
14. Kupin A. Application of neurocontrol principles and classification optimisation in conditions of sophisticated technological processes of beneficiation complexes // Metallurgical and Mining Industry. 2014. Issue 6. P. 16–24.
15. Liu J., Liu C. Optimization of Mold Inverse Oscillation Control Parameters in Continuous Casting Process // Materials and Manufacturing Processes. 2015. Vol. 30, Issue 4. P. 563–568. doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1004696>
16. Wedyan A., Whalley J., Narayanan A. Hydrological Cycle Algorithm for Continuous Optimization Problems // Journal of Optimization. 2017. Vol. 2017. P. 1–25. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3828420>
17. Spectral homotopy analysis method and its convergence for solving a class of nonlinear optimal control problems / Saber Nik H., Effati S., Motsa S. S.,



Shirazian M. // Numerical Algorithms. 2013. Vol. 65, Issue 1. P. 171–194. doi: <https://doi.org/10.1007/s11075-013-9700-4>

18. Fazeli Hassan Abadi M., Rezaei H. A Hybrid Model Of Particle Swarm Optimization And Continuous Ant Colony Optimization For Multimodal Functions Optimization // Journal of Mathematics and Computer Science. 2015. Vol. 15, Issue 02. P. 108–119. doi: <https://doi.org/10.22436/jmcs.015.02.02>

19. Берестин Н. К. Динамическая оптимизация процесса сушки зерна с помощью непрерывной системы управления // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 124 (10). С. 1–19. doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-066>

20. Characterization of operational time variability using effective process times / Jacobs J. H., Etman L. F. P., van Campen E. J. J., Rooda J. E. // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2003. Vol. 16, Issue 3. P. 511–520. doi: <https://doi.org/10.1109/tsm.2003.815215>

21. Haddad W. M., Nersesov S. G. Stability and Control of Large-Scale Dynamical Systems: A Vector Dissipative Systems Approach. Princeton Scholarship, 2017. 353 p. doi: <https://doi.org/10.23943/princeton/9780691153469.001.0001>

22. Shi H., Chu Y., You F. Novel Optimization Model and Efficient Solution Method for Integrating Dynamic Optimization with Process Operations of Continuous Manufacturing Processes // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2015. Vol. 54, Issue 7. P. 2167–2187. doi: <https://doi.org/10.1021/ie503857r>

23. Михайлов В. В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1973. 168 с.

24. Lutsenko I. Definition of efficiency indicator and study of its main function as an optimization criterion // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, Issue 2 (84). P. 24–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85453>

25. Development of a verification method of estimated indicators for their use as an optimization criterion / Lutsenko I., Fomovskaya E., Oksanych I., Koval S., Serdiuk O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2, Issue 4 (86). P. 17–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95914>

26. Development of test operations with different duration in order to improve verification quality of effectiveness formula / Lutsenko I., Fomovskaya O., Vihrova E., Serdiuk O., Fomovsky F. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 4 (91). P. 42–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121810>

27. Development of the method for modeling operational processes for tasks related to decision making / Lutsenko I., Oksanych I., Shevchenko I., Karabut N. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 4 (92). P. 26–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126446>