

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (23) июнь 2021 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является освящение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматизации, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

Основные направления журнала: Автоматизированные системы управления; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

Председатель редакционного совета:

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент Академии инженерных наук, президент регионального Уральского отделения Академии инженерных наук, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Заместитель председателя редакционного совета:

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Члены редакционного совета:

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Радионов Андрей Александрович - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Логунова Оксана Сергеевна - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)

Дмитриенко Валерий Дмитриевич - доктор технических наук, профессор (НТУ «Харьковский политехнический институт»)

Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО «КонсОМ СКС»)

Редакция

Председатель редакционной коллегии

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор

Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Контакты

Главный редактор: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-85-27
Редакционная коллегия: Парсункин Борис Николаевич
Тел.: (3519) 29-84-32
E-mail: atp@magtu.ru

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru
Выходит в свет 06.2021.

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

И.П. Попов

Математическое моделирование суперпозиции вращений в технологических процессах 4

Д.А. Денисевич

Оптимальный раскрой рулонных материалов при реализации заказов на продукцию 7

Автоматизированные системы управления

И.П. Попов

Учет амплитудно-частотных особенностей режимов нагрузки синхронной электрической машины в составе автоматизированного привода 12

Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.Р. Бондарева Программная реализация цифровых адаптивных стабилизирующих локальных контуров управления в централизованных АСУ ТП 16

О.Л. Юдина

Автоматизированная система управления параметрами микроклимата частного дома 21

CONTENTS

Mathematic and simulation of control systems and objects

I.P. Popov

Mathematical modeling of superposition of rotations in technological processes 4

D.A. Denisevich

Optimal cutting of rolled materials when implementing product orders 7

Automatic control systems

I.P. Popov

Accounting for amplitude-frequency features of loading modes of a synchronous electric machine in the composition of an automated drive 12

B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, A.R. Bondareva

Software implementation of digital adaptive stabilizing local control circuits in centralized APCS 16

O.L. Yudina

Automated control system of microclimate parameters of the private house 21

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

Научные статьи, направляемые для публикации в журнал, **должны содержать**: название статьи; - сведения об авторах (Фамилия, Инициалы; место работы, город, страна; электронный адрес), количество авторов - не более 5; аннотацию в объеме от 100 до 250 слов; перечень ключевых слов или фраз в объеме не более 7; список литературы, не менее 8 ссылок. В случае представления статьи на русском языке указанные выше пункты должны быть представлены также и в англоязычном варианте. Если в оригинале статья написана на английском языке, то дополнительно эти сведения рекомендуется привести на русском языке.

Статью следует набирать в шаблоне, представленном на информационной странице портала ФГБОУ ВО "МГТУ" www.magtu.ru (раздел "Автоматизированные технологии и производства").

Рекомендуемая структура статьи: УДК. Аффiliation (фамилии авторов и место их работы). Название статьи. Аннотация. Ключевые слова. Введение. Методы исследования. ... Результаты. Заключение. Источник финансирования (при необходимости). Список литературы. Информация на английском (аффiliation, аннотация, ключевые слова, список литературы).

При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:

Объем рукописи статьи, оформленный в соответствии с приведенными требованиями, не должен превышать: обзорной статьи более 10 страниц; статьи более 6 страниц; кратко сообщения более 2 страниц.

Самцитирование: не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

Размерности величин выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

В сопровождение рукописи статьи авторами должны быть направлены на официальный адрес электронной почты редакции журнала, следующие документы: **экспертное заключение** о возможности опубликования в открытой печати (цветной скан в формате PDF). Работы, выполненные авторами в инициативном порядке, представления экспертного заключения не требуют; **сведения об авторах** (Фамилия Имя и Отчество полностью, ученая степень и ученое звание, место работы, город, страна, электронный адрес) с указанием одного из авторов, который будет взаимодействовать с редакцией.

Пример оформления

УДК 681.5.015.32

ДОСТОВЕРНОЕ И ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Б.Н. Парсункин¹, Т.Г. Сухоносова²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

² tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель программной реализации достоверного и оперативного метода определения значений динамических параметров управляемого технологического процесса для определения динамических параметров настройки микропроцессорных контуров управления в условиях интенсивного негативного воздействия технологических и организационных возмущений, характерных для реального производства. Эффективное решение поставленной задачи обеспечивается использованием уникальных свойств ортогональных функций Уолша, позволяющих формировать такие планы тестирующих воздействий, которые полностью компенсируют негативное влияние возмущающих воздействий на интегральную оценку отклика (реакцию) управляемого параметра на тестирующее входное воздействие. Использование предлагаемого метода особенно целесообразно при решении многих практических задач, когда необходимо получать достоверные результаты в условиях действия различных возмущающих факторов влияющих на точность определяемого параметра.

Ключевые слова: динамические параметры объекта управления, определение параметров объекта, функция Уолша, компенсация возмущений, тестирующие воздействия, интегральная оценка.

Введение

При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта $K_{об}$, постоянной

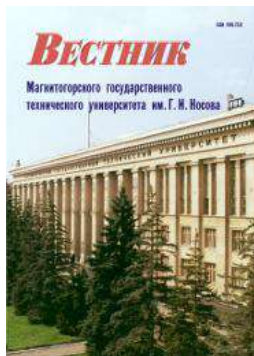
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1, [2]. Динамические параметры, полученные при обработке экспериментальных кривых разгона на рис. 1 представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы

Предоставление материалов

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: atp@magtu.ru текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

Другие рекомендуемые периодические издания



Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 621.833.65

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРПОЗИЦИИ ВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

Аннотация. Установлено, что подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является также равномерное круговое движение. Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс. При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки. Практический аспект темы определяется тем, что во многих механизмах, таких как планетарные передачи, приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров и т.п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств.

Ключевые слова: координаты, вращение, вектор, годограф, эллипс, окружность, улитка.

ВВЕДЕНИЕ

Если система отсчета $x'O'y'$ движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_1 в неподвижной системе отсчета xOy (рис. 1), и точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_2 в системе отсчета $x'O'y'$, то в соответствии с принципом относительности Галилея точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_3 в системе отсчета xOy , а годографом вектора A , соединяющего точки O и a , является прямая линия.

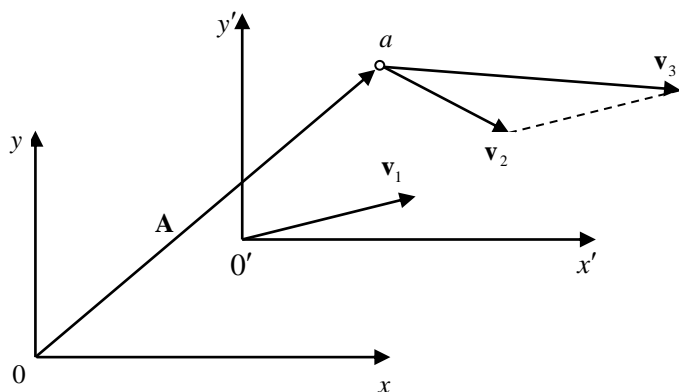


Рис. 1. Сложение движений

Целью работы является установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении *вращательных* синхронных движений [1, 2].

Практический аспект темы определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор [3], планетарные передачи [4], приводы фрез в маши-

нах для очистки труб больших диаметров [5] и т.п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств.

Пусть точка O' вращается вокруг точки O в системе отсчета xOy с постоянной угловой скоростью ω . Расстояние ρ_1 между точками не меняется. Координатные оси обеих систем отсчета всегда попарно параллельны. Точка a вращается вокруг точки O' в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $-\omega$ или $+\omega$. Расстояние ρ_2 между точками не меняется.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используются общенаучные и методы аналитической геометрии. Использованные методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разнонаправленные вращения

Теорема 1. При разнонаправленных вращениях точек a и O' годографом вектора A является эллипс.

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy :

$$x_1 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad y_1 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (1)$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

Здесь φ_1, φ_2 – начальные углы.

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2),$$

$$y = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

$$x = \cos \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) - \sin \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2),$$

$$y = \sin \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) + \cos \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2).$$

Отсюда следует

$$\sin \omega t = \frac{y(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) - x(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2},$$

$$\cos \omega t = \frac{x(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) + y(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2}.$$

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1,$$

$$\frac{y^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + x^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{2xy (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{x^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + y^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{2xy (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} - \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1.$$

(2)

Это уравнение эллипса.

Теорема доказана.

Теорема 2. Большая и малая полуоси эллипса (2) соответственно равны $(\rho_1 + \rho_2)$ и $|\rho_1 - \rho_2|$.

Доказательство.

Обратным отсчетом времени можно добиться, чтобы $\varphi_1 = \varphi_2$, а поворотом координатных осей – чтобы $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$. Тогда (2) примет вид

$$\frac{x^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \frac{y^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{y^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1 \quad (3)$$

(канонический вид).

Теорема доказана.

Следствие 1. При $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ эллипс (2) вырождается в отрезок прямой линии длиной 4ρ .

Следствие 2. Корни характеристического уравнения эллипса равны

$$\lambda_1 = (\rho_1 + \rho_2)^2, \quad \lambda_2 = (\rho_1 - \rho_2)^2.$$

Следствие 3. Эксцентриситет эллипса равен отношению среднегеометрического значения величин ρ_1 и ρ_2 к их среднеарифметическому значению

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\rho_1\rho_2}}{(\rho_1 + \rho_2)/2}.$$

Следствие 4. Фокусы эллипса (для канонической формулы (3)) равны

$$f_{1,2} = (\pm 2\sqrt{\rho_1\rho_2}, 0).$$

Теорема 3. Оси эллиптического годографа повернуты на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ в системе отсчета xOy .

Доказательство.

При повороте координатных осей на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ выражение (3) принимает вид:

$$\frac{\left(x \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{\left(-x \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} - \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

что совпадает с (2).

Теорема доказана.

На рис. 2 $\varphi_1 = 120^\circ$, $\varphi_2 = -30^\circ$, следовательно, оси эллипса повернуты на 45° .

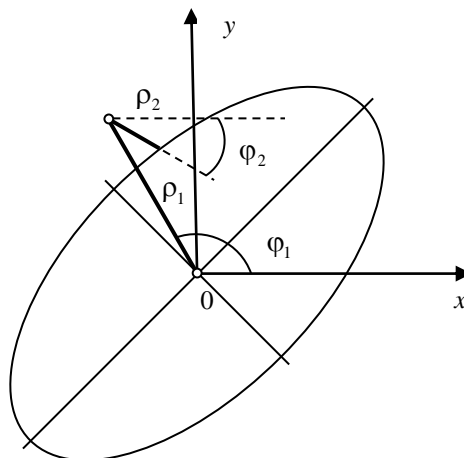


Рис. 2. Эллиптический годограф

Обратным ходом рассуждений доказывается

Теорема 4. Если годографом вектора \mathbf{A} является эллипс с полуосями $(\rho_1 + \rho_2)$ и $|\rho_1 - \rho_2|$, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $-\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Однонаправленные вращения

Теорема 5. При однонаправленных вращениях точек a и O' годографом вектора \mathbf{A} является окружность с центром в точке O .

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy определяются выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Координаты вектора \mathbf{A} в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2),$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Квадрат вектора \mathbf{A} равен

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^2 = x_A^2 + y_A^2 &= \rho_1^2 \cos^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \cos^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \cos(\omega t + \varphi_1)\cos(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ \rho_1^2 \sin^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \sin^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \sin(\omega t + \varphi_1)\sin(\omega t + \varphi_2) = \\ &\dots \\ &= \rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Длина вектора \mathbf{A} неизменна, следовательно, его годографом является окружность.

Теорема доказана.

Следствие. Вектор \mathbf{A} вращается с угловой скоростью ω в системе отсчета xOy .

Это вытекает из того, что форма треугольника $0O'a$ неизменна, а его сторона $0O'$ вращается с угловой скоростью ω .

Обратным ходом рассуждений доказывается

Теорема 6. Если годографом вектора \mathbf{A} является окружность, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $+\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Теорема 7. Если точка a неподвижна в системе отсчета $x'O'y'$, то годографом вектора \mathbf{A} является окружность радиуса ρ_1 , координаты центра которой в системе отсчета xOy равны $x_{o1} = \rho_2 \cos \varphi_2$, $y_{o1} = \rho_2 \sin \varphi_2$.

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy определяются выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos \varphi_2, \quad y_2 = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

Координаты вектора \mathbf{A} в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos \varphi_2,$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin \varphi_2,$$

$$x_A - \rho_2 \cos \varphi_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$y_A - \rho_2 \sin \varphi_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$(x_A - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + (y_A - \rho_2 \sin \varphi_2)^2 = \rho_1^2.$$

Теорема доказана.

Пример сложения кратных вращений. Пусть точка a вращается вокруг точки O' в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $+2\omega$ и $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Координаты точки O' в системе xOy :

$$x_1 = \rho_1 \cos \omega t, \quad y_1 = \rho_1 \sin \omega t.$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos 2\omega t, \quad y_2 = \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Координаты вектора \mathbf{A} в системе xOy :

$$x_A = \rho_1 \cos \omega t + \rho_2 \cos 2\omega t,$$

$$y_A = \rho_1 \sin \omega t + \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Годограф вектора \mathbf{A} (улитка) при $\rho_1 = \rho_2$ изображен на рис. 3.

Уравнение этой улитки в полярных координатах имеет вид:

$$\rho = \rho_1 \sqrt{2 + 2\cos \frac{2}{3}\varphi}.$$

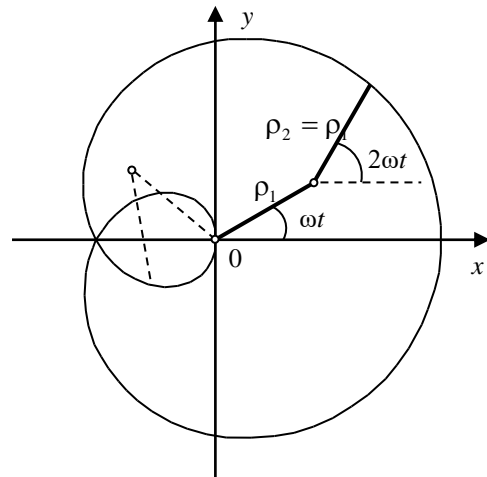


Рис. 3. Улиточный

Для сравнения формула улитки Паскаля, имеющей заметное внешнее сходство, –

$$\rho = b + a \cos \varphi.$$

Условием возникновения петли улиточного годографа является неравенство

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 \sin 2\omega t,$$

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 2 \sin \omega t \cos \omega t,$$

$$\rho_1 < 2\rho_2 \cos \omega t.$$

При $\rho_1 \geq 2\rho_2$ петля не возникает (рис. 4).

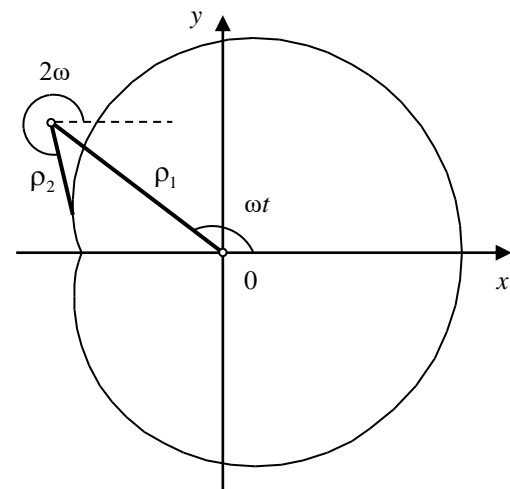


Рис. 4. Улиточный годограф без

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является также равномерное круговое движение.

Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс.

При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вра-

щательные движения. При разработке техники различного назначения все в большей степени используются САПР и цифровые технологии. В этих условиях исходные данные для проектирования необходимо задавать в виде математических формул [6]. Полученные соотношения такую возможность предоставляют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бранец В.Н. Об изоморфизме математических описаний операции вращения // Изв. РАН. МТТ. 2018. № 2. С. 136-143.
2. Бычков Ю.П. О катании тела с ротором по подвижной опорной сфере // ПММ. 2015. Т. 79. Вып. 1. С. 99-111.
3. Попов И.П. Построение вибрационных сортировальных машин по схеме мультиинертного осциллятора // Вестник Вологодского государственного университета. 2020. № 3(9). С. 14-17.

4. Приходько А.А., Смелягин А.И. Создание и исследование планетарных механизмов прерывистого движения с эллиптическими зубчатыми колесами // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2019. № 6 (129). С. 77-88.

5. Матасова Е.Ю., Виноградов Д.В. Корректировка подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 10 (715). С. 14-24.

6. Усатая Т.В., Усатый Д.Ю., Свистунова Е.А. Трехмерное компьютерное моделирование в проектно-технологической деятельности // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 4(10). С.28-31.

MATHEMATICAL MODELING OF SUPERPOSITION OF ROTATIONS IN TECHNOLOGICAL PROCESSES

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

Abstract. It has been established that just as the result of adding two uniform rectilinear movements is also a uniform rectilinear movement, the result of adding two uniform unidirectional circular motions is also a uniform circular motion. The hodograph when adding two uniform oppositely directed circular motions is an ellipse. When adding two non-synchronous rotations, hodographs in the form of a snail are possible. The practical aspect of the topic is determined by the fact that in many mechanisms, such as planetary gears, cutter drives in machines for cleaning large-diameter pipes, etc. summation of rotational movements is realized, and the shape of the hodograph is useful information in the design of such devices.

Keywords: coordinates, rotation, vector, hodograph, ellipse, circle, snail.

REFERENCES

1. Branets V.N. On the isomorphism of mathematical descriptions of the rotation operation [Ob izomorfizme matematicheskikh opisaniy operatsii vrashcheniya], *Izv. RAN. MTT [Izv. RAN. MTT]*, 2018, no. 2, pp. 136-143. (in Russian)
2. Bychkov Yu.P. On the rolling of a body with a rotor on a movable support sphere [O katanii tela s rotorom po podvizhnoy opornoj sfere], *PMM [PMM]*, 2015, vol. 79, iss. 1, pp. 99-111. (in Russian)
3. Popov I.P. Construction of vibration sorting machines according to the scheme of a multi-inert oscillator [Postroyeniye vibratsionnykh sortiro-val'nykh mashin po skheme mul'tiinertnogo ostsillyatora], *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Vologda State University]*, 2020, no. 3(9), pp. 14-17. (in Russian)
4. Prikhodko A.A., Smelyagin A.I. Creation and research of planetary mechanisms of intermittent motion with elliptical gears [Sozdaniye i issledovaniye planetarnykh mekhanizmov preryvistogo dvizheniya s ellipticheskimi zubchatymi

5. Matasova E.Yu., Vinogradov D.V. Correction of feed when milling curved surfaces [Korrektyrovka podachi pri frezerovanii krivolinyenykh poverkhnostey], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye [Bulletin vysshikh educational institutions. Mechanical engineering]*, 2019, no. 10 (715), pp. 14-24. (in Russian)

6. Usataya T.V., Usatii D.Yu., Svistunova E.A. Three-dimensional computer modeling in design and technological activities [Trehmernoye komp'yuternoye modelirovaniye v proyektno-tekhnologicheskoy deyatelnosti], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2015m no. 4(10), pp.28-31. (in Russian)

7. Usataya T.V., Usatii D.Yu., Svistunova E.A. Three-dimensional computer modeling in design and technological activities [Trehmernoye komp'yuternoye modelirovaniye v proyektno-tekhnologicheskoy deyatelnosti], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2015m no. 4(10), pp.28-31. (in Russian)

Попов, И.П. Математическое моделирование суперпозиции вращений в технологических процессах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №1(23). С.4-7.

I.P. Popov Mathematical modeling of superposition of rotations in technological processes. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no.1(23), pp.4-7. (In Russian).

ОПТИМАЛЬНЫЙ РАСКРОЙ РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАКАЗОВ НА ПРОДУКЦИЮ

Д.А. Денисевич

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет», г. Могилев

denis1351@yandex.ru

Аннотация. Проведен анализ формализованного подхода раскроя рулонных материалов в условиях производства. Предложен подход поиска рационального решения для расчета количества рулонов одинакового диаметра, необходимых для выполнения заказа, путем представления рулона как листового материала. На основании производства биаксиально-ориентированных полипропиленовых пленок проведена апробация результатов исследования. Полученные результаты повышают точность вычислений при изготовлении продукции (по заказу).

Ключевые слова: оптимизация, раскрой рулонных материалов, представление рулона прямоугольным листом.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях производства используются изделия в виде полотен определенной длины, ширины и толщины, смотанные в рулон цилиндрической формы. Такая форма определяется технологией производства материала, снижает издержки на его складское хранение, транспортировку, последующую реализацию и использование [1]. Однако для производства, размотки и подачи листового материала требуются значительные мощности, механизмы оборудования получают внушительных габаритных размеров, необходимы большие производственные площади. Рулонные материалы формируются из полотен большой длины, которые используются: в прокатном производстве (электросварные трубы, профиль), в штамповочном производстве (заготовки), в деревообрабатывающей промышленности (упаковочный материал, лента), в строительстве (кровельный материал), в производстве кабельной продукции (защитный материал для бронирования), в производстве синтетических пленок (полипропиленовые, полиэтиленовые), в текстильной промышленности (ткани, трикотажные изделия) и др.

В ходе производства рулонных материалов важным является обеспечение рационального раскроя рулона большой ширины (формата) на рулоны заказанного формата. При реализации заказов имеется возможность варьировать диаметром изготовленной продукции в виде рулона. Результат ведет к уменьшению отходов, сокращению времени изготовления [2]. Вследствие чего происходит процесс максимального коэффициента использования материала [3]. Эти факторы являются определяющими при выполнении заказа.

АНАЛИЗ ФОРМАЛИЗОВАННОГО ПОДХОДА РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА РУЛОНОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗА

На предприятия поступают заказы x для изготовления определенной массы продукции, требуемой ширины (формата) с последующим формированием в рулоны. Заказы считаются выполненными тогда, когда общая масса изготовленных рулонов достигает заказанной массы. Для этого требуется рассчитать количество рулонов достаточное для выполнения заказа.

Для расчета массы одного рулона необходимо представить его в виде кольца (рис. 1), площадь которого определяется как разность площадей рулона и гильзы:

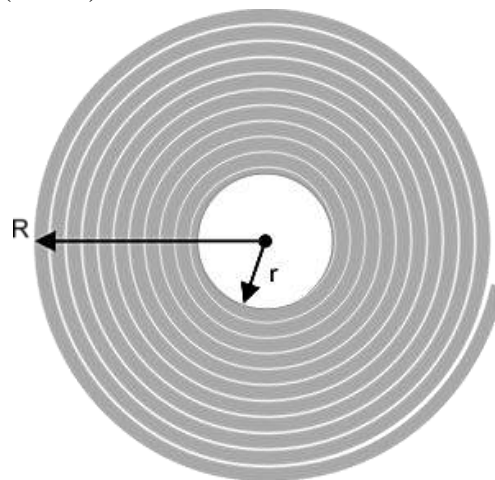
$$S = \pi \cdot (R^2 - r^2).$$


Рис. 1. Рулон материала

Если представить рулон в размотанном виде, то получим листовую материал прямоугольной формы, с длиной L , шириной W , толщиной h , площадь которого равна $S = L \cdot W$ (рис. 2).

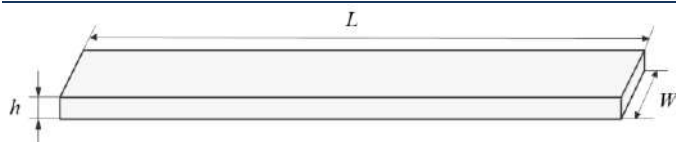


Рис. 2. Представление рулона как листовой материал

Составив равенство площадей кольца и прямоугольника, приняв $d = 2 \cdot r$ (см. рис. 1), получим:

$$L \cdot h = \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4, \quad (1)$$

где D – диаметр рулона, d – диаметр гильзы.

Известно, что масса тела m равна его плотности ρ , умноженной на объем V : $m = \rho \cdot V$. Объем прямоугольного параллелепипеда V вычисляется как произведение трех его измерений, $V = L \cdot W \cdot h$. Тогда в соответствии с (1) масса одного рулона

$$m = \rho \cdot V = W \cdot \rho \cdot L \cdot h = W \cdot \rho \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 \quad (2)$$

Полагая, что ρ , π , d из выражения (2) являются постоянными величинами, для упрощения расчетов в производственных условиях воспользуемся заменой части выражения на величину Q [кг/м] (линейная плотность).

$$Q = \rho \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 \quad (3)$$

Для расчета массы рулона изменяются W_i формат и D_i диаметр рулона: $m_i = W_i \cdot Q_i$. Причем диаметр D является дискретной величиной и определяется диапазоном значений, основанных на условиях производства.

На основании (3) приведем таблицу значений диаметров рулонов и соответствующие рассчитанные величины Q_j (табл. 1), где $j = 1, \dots, |n|$.

Таблица 1

Значения Q_j эквивалентные диаметру рулона

Диаметр, D_j , м	D_1	D_2	...	D_i	...	D_n
Величина, Q_j , кг/м	Q_1	Q_2	...	Q_i	...	Q_n

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ БИАКСИАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК

Биаксиально-ориентированная полипропиленовая пленка (БОПП) – один из наиболее востребованных материалов, пользующийся спросом почти в любой сфере, где необходимо использовать гибкую упаковку. Пленка поли-

пропиленовая применяется для упаковки пищевых продуктов, изделий медицинского назначения, парфюмерно-косметических средств, изделий легкой промышленности и культурно-бытового назначения, табачных изделий; для печати; для изготовления металлизированных, многослойных пленок и комбинированных материалов, товаров народного потребления [6].

С развитием рынка популярность такого вида рулонного материала постоянно растет, расширяется круг применения, запросы потребителей диктуют свои условия, которые отражаются на производстве и раскрое пленки. Сегодня предприятия выполняют раскрой биаксиально-ориентированных полипропиленовых пленок согласно заказам потребителей, изготавливаемых методом экструзии на специальном оборудовании.

Экструзия – это способ переработки полимерных материалов непрерывным продавливанием их расплава через формующую головку, геометрическая форма выходного канала которой определяет профиль получаемого изделия или полуфабриката [7]. В качестве исходной заготовки используется гильза определенного диаметра с погонной длиной материала до нескольких километров.

Иногда применение рулона нецелесообразно вследствие неэкономичности раскроя материала, связанных с большими отходами и временем выполнения заказов [8]. Поэтому исследования направлены на повышение точности планирования и использования материала, которые заключается в рациональном составлении технического задания продольного раскроя материала [9]. При формировании технического задания на предприятии по производству БОПП предлагается производить расчеты согласно (4), используя величину Q_j соответствующий диаметру D_j рулона (см. табл. 1).

При апробации результатов использовались данные одного из предприятий по производству биаксиально-ориентированных полипропиленовых пленок, приведенные в табл. 2.

Исходя из значений (см. табл. 2) и предложенной формулы (4), проведем анализ соответствия величин Q_j на предприятии и полученных согласно расчету. Величины Q_j , используемые на предприятии равны отношению массы одного рулона к его формату. Приняв значение плотности ρ БОПП равной $0,9 \text{ кг/м}^3$ и число $\pi = 3,1415926535$, вычислим значения величин Q_j согласно формуле (3). Результаты значений приведем в табл. 3.

Таблица 2

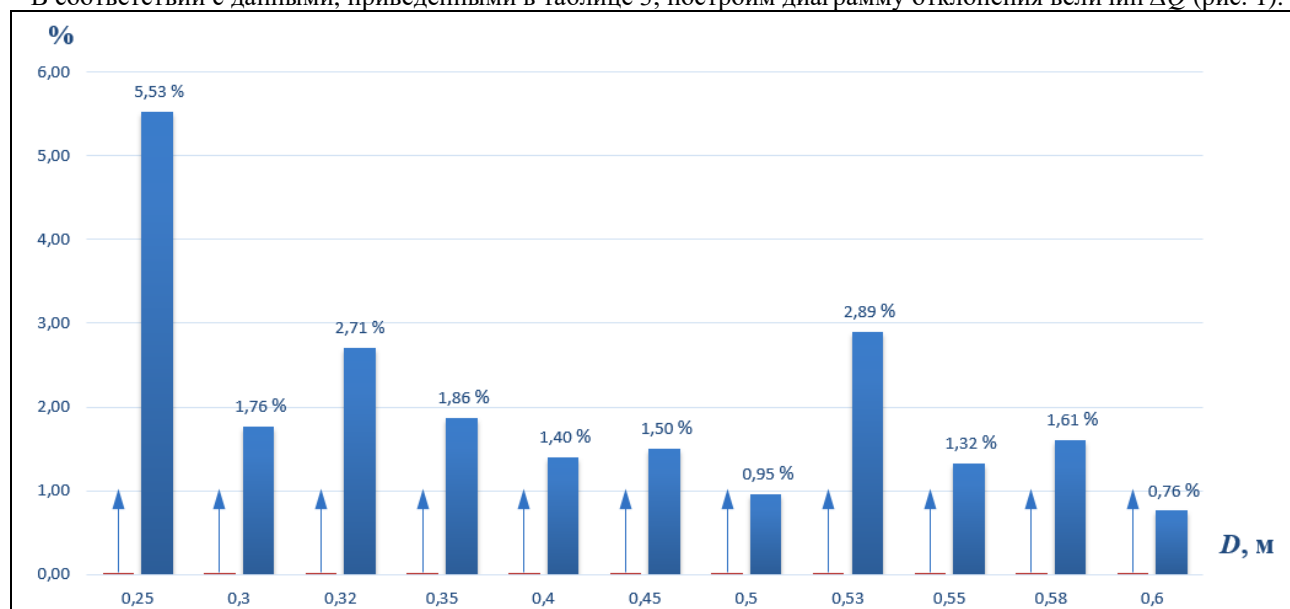
Масса одного рулона согласно диаметру и формату на предприятии по производству БОПП, кг

Диаметр D , м	Формат W , м										
	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
0,25	0,3	0,32	0,35	0,4	0,45	0,5	0,53	0,55	0,58	0,6	38
0,3	29,25	32,175	35,1	38,025	40,95	43,875	46,8	49,725	52,65	55,575	58,5
0,32	33,25	36,575	39,9	43,225	46,55	49,875	53,2	56,525	59,85	63,175	66,5
0,35	40,5	44,55	48,6	52,65	56,7	60,75	64,8	68,85	72,9	76,95	81
0,4	53,75	59,125	64,5	69,875	75,25	80,625	86	91,375	96,75	102,125	107,5
0,45	68,5	75,35	82,2	89,05	95,9	102,75	109,6	116,45	123,3	130,15	137
0,5	85,5	94,05	102,6	111,15	119,7	128,25	136,8	145,35	153,9	162,45	171
0,53	94,5	103,95	113,4	122,85	132,3	141,75	151,2	160,65	170,1	179,55	189
0,55	103,5	113,85	124,2	134,55	144,9	155,25	165,6	175,95	186,3	196,65	207
0,58	115	126,5	138	149,5	161	172,5	184	195,5	207	218,5	230
0,6	124,25	136,675	149,1	161,525	173,95	186,375	198,8	211,225	223,65	236,075	248,5

Величины Q в производстве БОПП

Диаметр, D_i , м	0,25	0,3	0,32	0,35	0,4	0,45	0,5	0,53	0,55	0,58	0,6
Величина, Q_i^p , кг/м на предприятии	0,038	0,0585	0,0665	0,081	0,1075	0,137	0,171	0,189	0,207	0,23	0,2485
Величина, Q_i^c , кг/м рассчитанная	0,0401	0,0595	0,068	0,0825	0,109	0,139	0,1726	0,1944	0,2097	0,233	0,25

В соответствии с данными, приведенными в таблице 3, построим диаграмму отклонения величин ΔQ (рис. 1).



Из рис. 1 следует, что значения величин Q_i^c полученные путем вычислений выше используемых в производстве на 1–3% в интервале диаметра рулона от 0,3м до 0,6м, на 5,53% при диаметре 0,25м. Предположительно разница значений обусловлена их округлением, использованием другой плотности БОПП и неточностью измерений (погрешность оборудования).

Вследствие (4) величина Q_j прямо пропорциональна массе рулона, соответственно масса одного рулона, зависящая от диаметра D_j и формата W_i и приведенная в табл. 2, будет увеличена на процент расхождения величины Q_j , согласно диаграмме на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании технологического процесса производства рулонных материалов проведен анализ формализованного подхода на предприятиях. Предложен подход оптимизации раскроя рулонных материалов с использованием величины Q_j и составлением таблицы эквивалентных значений. Проведена апробация результатов формализованного подхода на предприятии по производству биаксильно-ориентированных полипропиленовых пленок. Полученные результаты отражают расхождения величины Q_j при нахождении количества рулонов для выполнения заказа с данными, используемыми на предприятии, от 1 до 3%. В соответствии с полученными данными (см. табл. 3) увеличивается точность вычислений количества рулонов. При формировании плана реализации заказов повышается точность определения массы продукции при производстве до 5%. Значимость исследований заключается в

предложении использования величин Q_j при расчете количества рулонов при реализации заказа. Практическая ценность состоит в универсальности предложенных решений и возможности применения на предприятиях, производящих рулонные изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1 Балабанов, В. М. Эволюционный метод рационального планирования раскроев рулонной стали в производстве электросварных труб / В. М. Балабанов // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 31. – С. 4–9.

2 Демиденко, О. М. Исследование алгоритмов рационального раскроя листового материала / О.М. Демиденко, Е.А. Якимов, Д.А. Денисевич // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1 (42). – С. 91–94.

3 D.X. Li, Research on Cutting Algorithm of Same Size Integrated Circuit Board. D. Guangxi: Guangxi University (2016)

4 Денисевич, Д. А. Информационные технологии для оптимизации раскроя рулонных материалов / Д. А. Денисевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]; Могилев, 22–23 апреля 2021 г. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 347–348.

5 Рассолова, Я. А. Применение генетических алгоритмов к решению модифицированной задачи о назначениях / Я. А. Рассолова, М. М. Зарубин //

Материалы 45-ой научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, апрель 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 413 с. ISBN 978-5-7765-1169-1

6 Вольфсон С. И., Хакимуллин Ю. Н. Производство полипропилена и биаксиально-ориентированной полипропиленовой пленки в Российской Федерации // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №23.

7 Раувенталь, К. Экструзия полимеров / К. Раувенталь. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.

8 Schmitz T., Finnemore D., Kedzierski G. Dendauw J. Hauchduenne Folien sichern schwere Ladungen // Kunststoffe 103 (2013) 7. S. 59–63.

9. Степанова, Я. А. Сравнение алгоритмов для решения задачи геометрического покрытия / Я. А. Степанова, С. А. Зыкин // Автоматизированные технологии и производства. – 2020. – №2(22). – С. 25–27.

OPTIMAL CUTTING OF ROLLED MATERIALS WHEN IMPLEMENTING PRODUCT ORDERS

Dmitry A. Denisevich

Belarusian-Russian University, 43 Mira Ave, Mogilev 212000, Belarus

Abstract. The analysis of the formalized approach of cutting of rolled materials in production conditions is carried out. An approach to finding the optimal solution for calculating the number of rolls required for order fulfillment by representing the roll as a sheet material is proposed. Based on the production of biaxially oriented polypropylene films, the results of the study were tested. The results obtained increase the accuracy of calculations in the manufacture of products (on request).

Keywords: optimization, cutting of roll materials, presentation of a roll with a rectangular sheet.

REFERENCES

1. Balabanov V. M. Evolutionary method of rational planning of roll steel cutting in the production of electric welded pipes [Evolyutsionnyy metod ratsional'nogo planirovaniya raskroev rulonnoy stali v proizvodstve elektrosvarnykh trub]. *Vestnik NTU "KhPI". Tematicheskii vypusk: Informatika i modelirovanie* [Bulletin of NTU "KhPI". Thematic issue: Computer Science and Modeling], Khar'kov: NTU "KhPI", 2010, no. 31, pp. 4-9.

2. Demidenko O. M., Yakimov E.A., Denisevich D.A., Investigation of algorithms for rational cutting of sheet material [Issledovanie algoritmov ratsional'nogo raskroya listovogo materiala]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki* [Problems of physics, mathematics and engineering], 2020, no.1(42), pp. 91-94.

3. D.X. Li, Research on Cutting Algorithm of Same Size Integrated Circuit Board. D. Guangxi: Guangxi University (2016).

4. Denisevich D. A. Information technologies for optimizing the cutting of rolled materials [Informatsionnye tekhnologii dlya optimizatsii raskroya rulonnykh materialov]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of the International Scientific and Technical University], Mogilev : Belarusian-Russian University, 2021, pp. 347-348.

5. Rassolova Ya. A. Application of genetic algorithms to the solution of a modified assignment problem [Primenenie geneticheskikh algoritmov k resheniyu modifitsirovannoy zadachi o naznacheniya]. *Materialy 45-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Materials of the 45th Scientific and technical Conference of Students and Postgraduates], Komsomolsk-on-Amur, April 2015-Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU, 2015., pp. 413. ISBN 978-5-7765-1169-1

6. Vol'fson S. I., Khakimullin Yu. N. Production of polypropylene and biaxially oriented polypropylene film in the Russian Federation [Proizvodstvo polipropilena i biaksial'no-orientirovannoy polipropilenovoy plenki v Rossiyskoy Federatsii]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2011. no.23.

7. Rauvental', K. Polymer extrusion [Ekstruziya polimerov]. SPb.: Professiya, 2006, pp. 768.

8. Schmitz T., Finnemore D., Kedzierski G. Dendauw J. Hauchduenne Folien sichern schwere Ladungen // Kunststoffe 103 (2013) 7. pp. 59–63.

9. Stepanova, Ya.A. , Zykin S. A. Comparison of algorithms for solving the problem of geometric coverage [Sravnenie algoritmov dlya resheniya zadachi geometricheskogo pokrytiya]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp. 25-27.

Денисевич, Д.А. Оптимальный раскрой рулонных материалов при реализации заказов на продукцию / Д.А. Денисевич // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №1(23). С.7-10.

D.A. Denisevich Optimal cutting of rolled materials when implementing product orders. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.7-10. (In Russian).

УДК 621.3.011.713

УЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИВОДА

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

Аннотация. Амплитуда ЭДС обмотки вращающейся электрической машины зависит от частоты, в связи с чем может возникнуть интуитивное предположение, что амплитуды тока и вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины также зависят от частоты. Доказаны теоремы. Теорема 1. Амплитуда тока в индуктивной нагрузке индуктивной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения. Теорема 2. Амплитуда вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины с индуктивной нагрузкой не зависит от частоты вращения. Теорема 3. Амплитуда напряжения на емкостной нагрузке емкостной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения. Теорема 4. Амплитуда вращающего момента для емкостной синхронной электрической машины с емкостной нагрузкой не зависит от частоты вращения.

Ключевые слова: синхронная машина, индуктивная нагрузка, ток, момент, амплитуда.

ВВЕДЕНИЕ

Представляет интерес поведение синхронных электрических машин при различном характере нагрузки [1]. Для индуктивной синхронной электрической машины это зависимость амплитуды тока и вращающего момента от нагрузки, для емкостной синхронной электрической машины – это зависимость амплитуды напряжения и вращающего момента.

Потокоцепление обмотки вращающейся электрической машины равно

$$\psi = \Psi_m \cos \omega t .$$

ЭДС обмотки определяется выражением

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = \omega \Psi_m \sin \omega t .$$

Амплитуда ЭДС

$$E_m = \omega \Psi_m$$

зависит от частоты, в связи с чем может возникнуть интуитивное предположение, что амплитуды тока и вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины (амплитуды напряжения и вращающего момента для емкостной машины) также зависят от частоты. В действительности это происходит не всегда. Существенную роль в этом играет характер нагрузки электрической машины.

Цель исследования – установление влияния нагрузки на чувствительность синхронной электрической машины к частоте.

Задачи работы – получить доказательные на уровне теорем результаты.

Актуальность работы обусловлена широким распространением синхронных электрических машин [2–4], используемых, в частности, в качестве генераторов [5].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используются методы математического моделирования и электротехнические расчеты. Используемые методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ток и момент индуктивной синхронной электрической машины при индуктивной нагрузке

Пусть нагрузкой фазы индуктивной синхронной электрической машины является катушка индуктивности. Далее суммарная индуктивность катушки и обмотки машины обозначается L . Число витков обмотки – n . Длина активной части витка – l . Индукция магнитного поля в рабочем зазоре – B . Угол поворота ротора – φ . Частота вращения – $\omega = d\varphi/dt$. Ток – i . Число полюсов – два. Диаметр ротора – D_r . Активные электрические и механические потери не учитываются.

Для синхронной машины с индуктивной нагрузкой справедлива следующая

Теорема 1. Амплитуда тока в индуктивной нагрузке индуктивной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения.

Доказательство. При указанных допущениях справедливо равенство (второй закон Кирхгофа и закон электромагнитной индукции применительно к вращающейся машине)

$$Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = L \frac{di}{dt} . \quad (1)$$

Интегрирование этого выражения дает

$$i = -\frac{Bln D_r}{L} \frac{D_r}{2} \cos \varphi + I_0 = -I_m \cos \varphi + I_0.$$

Начальный ток I_0 можно положить равным нулю.
Амплитуда тока

$$I_m = \frac{Bln D_r}{L} \frac{D_r}{2}$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

Теорема 2. Амплитуда вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины с индуктивной нагрузкой не зависит от частоты вращения.

Доказательство. При указанных допущениях вращающий момент в соответствии с законом Ампера (применительно к вращающейся машине) равен

$$\begin{aligned} \mu &= Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= -Bln \frac{Bln D_r}{L} \frac{D_r}{2} \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= -\frac{(Bln)^2 D_r^2}{L} \frac{D_r}{8} \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = \frac{(Bln)^2 D_r^2}{L} \frac{D_r}{8}$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

Правомерен вопрос – а как обстоит дело при другом характере нагрузки синхронной электрической машины?

Ток и момент при другом характере нагрузки

При активной нагрузке аналог уравнения (1) имеет вид

$$Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = Ri.$$

Амплитуда тока

$$I_m = \frac{Bln D_r}{R} \frac{D_r}{2} \omega$$

от частоты вращения ω зависит (линейно).

Вращающий момент равен

$$\begin{aligned} \mu &= Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= Bln \frac{Bln D_r}{R} \frac{D_r}{2} \omega \sin \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= \frac{(Bln)^2 D_r^2}{R} \frac{D_r}{8} \omega \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = \frac{(Bln)^2 D_r^2}{R} \frac{D_r}{8} \omega$$

от частоты вращения ω зависит (линейно).

При емкостной нагрузке [6] аналог уравнения (1) имеет вид

$$Bln \frac{D_r}{2} \omega \sin \omega t = \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

Дифференцирование этого выражения дает

$$i = BlnC \frac{D_r}{2} \omega^2 \cos \omega t$$

Амплитуда тока

$$I_m = BlnC \frac{D_r}{2} \omega^2$$

от частоты вращения ω зависит (квадратично).

Вращающий момент равен

$$\begin{aligned} \mu &= Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= BlnBlnC \frac{D_r}{2} \omega^2 \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^2 \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^2$$

от частоты вращения ω зависит (квадратично).

Зависимость мощности от характера нагрузки

Для индуктивной нагрузки реактивная электрическая мощность равна

$$Q = I^2 X_L = I^2 \omega L = \frac{(Bln)^2 D_r^2}{L} \frac{D_r^2}{8} \omega. \quad (2)$$

Здесь I – действующее значение тока.

Механическая мощность равна

$$Q_M = M \omega = \frac{(Bln)^2 D_r^2}{L} \frac{D_r^2}{8} \omega. \quad (3)$$

Разумеется, (2) и (3) совпали.

Мощность линейно зависит от частоты.

Для резистивной нагрузки активная электрическая мощность равна

$$P = I^2 R = \frac{(Bln)^2 D_r^2}{R} \frac{D_r^2}{8} \omega^2. \quad (4)$$

Механическая мощность равна

$$P_M = M \omega = \frac{(Bln)^2 D_r^2}{R} \frac{D_r^2}{8} \omega^2. \quad (5)$$

Разумеется, (4) и (5) совпали.

Мощность квадратично зависит от частоты.

Для емкостной нагрузки реактивная электрическая мощность равна

$$Q = I^2 X_C = I^2 \frac{1}{\omega C} = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^3. \quad (6)$$

Механическая мощность равна

$$Q_C = M \omega = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^3. \quad (7)$$

Разумеется, (6) и (7) совпали.

Мощность кубично зависит от частоты.

Напряжение и момент емкостной синхронной электрической машины при емкостной нагрузке

Дуальным аналогом индуктивной синхронной электрической машины является емкостная синхронная электрическая машина.

В соответствии с законом магнитоэлектрической индукции (дуальный аналог закона электромагнитной индукции) ток равен

$$i = Dbv, \quad (8)$$

где D – электрическая индукция (электрическое смещение) в рабочем зазоре, b – ширина электрода, v – линейная скорость.

Выражение (8) можно преобразовать следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= Db \frac{dx}{dt}, \\ dq &= Db dx, \\ \int_0^q dq &= Db \int_0^x dx, \\ q &= Dbx. \end{aligned}$$

С учетом последнего уравнения сила, действующая на электрод, равна

$$F = qE = q \frac{u}{x} = Dbu. \quad (9)$$

Это дуальный аналог закона Ампера для электрического (магнитоэлектрического) взаимодействия. Здесь E – напряженность электрического поля, u – напряжение. Электрический ток равен

$$i = C \frac{du}{dt}. \quad (10)$$

Замечание. Формулы (8) и (9) могут быть получены из их электромагнитных аналогов путем простой дуально-инверсной замены величин $e \rightarrow i$, $B \rightarrow D$, $l \rightarrow b$, $i \rightarrow u$.

Теорема 3. Амплитуда напряжения на емкостной нагрузке емкостной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения.

Доказательство. Для вращательной машины уравнение для тока с учетом (8) и (10) имеет вид

$$Db \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = C \frac{du}{dt}.$$

Интегрирование этого выражения дает

$$u = -\frac{Db D_r}{C} \frac{d\varphi}{2} \cos \varphi + U_0 = -U_m \cos \varphi + U_0. \quad (11)$$

Амплитуда напряжения

$$U_m = \frac{Db D_r}{C} \frac{d\varphi}{2} \quad (12)$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

Теорема 4. Амплитуда вращающего момента для емкостной синхронной электрической машины с емкостной нагрузкой не зависит от частоты вращения.

Доказательство. Вращающий момент в соответствии с (9), (11) и (12) применительно к вращающейся машине равен

$$\begin{aligned} \mu &= Dbu \frac{D_r}{2} \sin \varphi = -DbU_m \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= -Db \frac{Db D_r}{C} \frac{d\varphi}{2} \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \end{aligned}$$

$$= -\frac{D^2 b^2 D_r^2}{C} \frac{d\varphi}{8} \sin 2\varphi.$$

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = \frac{D^2 b^2 D_r^2}{C} \frac{d\varphi}{8}$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Таким образом, вопреки возможному интуитивному предположению, для индуктивной синхронной электрической машины с индуктивной нагрузкой амплитуды тока и вращающего момента от частоты вращения не зависят.

При другом характере нагрузки – зависят.

Для емкостной синхронной электрической машины с емкостной нагрузкой амплитуды напряжения и вращающего момента от частоты вращения не зависят.

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании электрических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саидходжаев А.Г. Новый метод определения электрических нагрузок на основе интервальных аналогов интерполяционных сплайнов // Автоматизированные технологии и производства. 2015. №2(8). С.28-30.
2. Лицин К.В. Обоснование выбора частоты переменной составляющей сигнала возбуждения при определении углового положения ротора синхронного двигателя методом высокочастотной инжекции сигнала // Автоматизированные технологии и производства. 2015. №4(10). С.41-43.
3. Лицин К.В. Механизм высокочастотной инжекции при электрическом определении углового положения ротора синхронного двигателя // Автоматизированные технологии и производства. 2014. № 6. С.110-116.
4. Давыдкин М.Н., Коньков А.С., Басков С.Н. Применение микроконтроллера Irc2148 в системах управления плавного пуска синхронных электродвигателей компрессорных установок металлургического производства // Автоматизированные технологии и производства. 2009. № 3. С.177-182.
5. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Вавилов В.Е., Зиннатуллина Г.С. Высокооборотный синхронный стартер-генератор для безредукторных вспомогательных силовых установок // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С.19-27. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-19-27
6. Патент РФ 2086065 С1. Электрическое емкостное устройство / И.П. Попов. Заявл. 28.03.1994. Опубл. 27.07.1997. Бюл. № 21.

ACCOUNTING FOR AMPLITUDE-FREQUENCY FEATURES OF LOADING MODES OF A SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINE IN THE COMPOSITION OF AN AUTOMATED DRIVE

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popov@yandex.ru

Abstract. The amplitude of the EMF of the winding of a rotating electric machine depends on the frequency, in connection with which an intuitive assumption may arise that the amplitudes of the current and torque for an inductive synchronous electric machine also depend on frequency. Theorems are proved. Theorem 1. The amplitude of the current in an inductive load of an inductive synchronous electric machine does not depend on the rotational speed. Theorem 2. The amplitude of the torque for an inductive synchronous electric machine with an inductive load does not depend on the speed. Theorem 3. The amplitude of the voltage across a capacitive load of a capacitive synchronous electric machine does not depend on the speed. Theorem 4. The amplitude of the torque for a capacitive synchronous electric machine with a capacitive load does not depend on the rotational speed.

Keywords: synchronous machine, inductive load, current, torque, amplitude.

REFERENCES

1. Saidkhodzhaev A.G. A new method for determining electrical loads based on interval analogs of interpolation splines [Novyy metod opredeleniya elek-tricheskikh nagruzok na osnove interval'nykh analogov in-terpolyatsionnykh splaynov], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2015, no. 2(8), pp.28-30. (in Russian)

2. Litsin K.V. Substantiation of the choice of the frequency of the variable component of the excitation signal when determining the angular position of the rotor of a synchronous motor by the method of high-frequency signal injection [Obosnovaniye vybora chastoty peremennoy sostavlyayushchey signala vzbuzhdeniya pri opredelenii uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya metodom vysokochastotnoy inzhetskii signala], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2015, no. 4(10), pp.41-43. (in Russian)

3. Litsin K.V. High-frequency injection mechanism for electric determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor [Mekhanizm vysokochastotnoy inzhetskii pri elektricheskoy opredelenii uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i*

proizvodstva [Automated technologies and production], 2014, no. 6, pp.110-116. (in Russian)

4. Davydkin M.N., Konkov A.S., Baskov S.N. Application of the lpc2148 microcontroller in control systems for the soft start of synchronous electric motors of compressor plants of metallurgical production [Primeneniye mikrokontrollera lpc2148 v sistemakh upravleniya plavnogo puska sinkhronnykh elektrodvigateley kompressornykh ustanovok metallurgicheskogo proizvodstva], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2009, no. 3, pp.177-182. (in Russian)

5. Ismagilov F.R., Gerasin A.A., Vavilov V.E., Zinnatullina G.S. High-speed synchronous starter-generator for gearless auxiliary power plants [Vysokooborotnyy sinkhronnyy starter-generator dlya bezreduktornykh vspomogatel'nykh silovykh ustanovok], *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы [Electrical systems and complexes]*, 2020, no. 1(46), pp.19-27. (in Russian) DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-19-27

6. RF patent 2086065 C1. Electric capacitive device [Elektricheskoye yemkostnoye ustroystvo], I.P. Popov. Appl. 28.03.1994, publ. 07/27/1997. bul. no. 21.

Попов, И.П. Учет амплитудно-частотных особенностей режимов нагрузки синхронной электрической машины в составе автоматизированного привода / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №1(23). С.12-15.

I.P. Popov Accounting for amplitude-frequency features of loading modes of a synchronous electric machine in the composition of an automated drive. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no.1(23), pp.12-15. (In Russian).

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ АДАПТИВНЫХ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ЛОКАЛЬНЫХ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ В ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ АСУ ТП

Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.Р. Бондарева

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия

a.bondareva@magtu.ru

Аннотация. Предложено общее решение актуальной задачи по программному синтезу адаптивных цифровых стабилизирующих контуров управления технологическими параметрами в энергосберегающих централизованных АСУ ТП. Проблема программной адаптации микропроцессорного регулирующего контроллера (МРК) решается в диалоговом режиме путем выполнения трех функций: «градуировка», «настройка», «управление». Это позволяет программно создавать компактные, быстродействующие, объектно-ориентированные системы локального (нижнего) уровня управления в централизованных АСУ ТП с минимальными затратами. Практическое использование такой автоматической адаптивной системы для энергосберегающего управления тепловым режимом нагревательной методической печи позволило при снижении удельных затрат топлива на 2% увеличить среднюю температуру раската заготовки после черновой группы на 4°C при уменьшении средней энергии, затраченной при прокатке каждой 20-тонной непрерывной заготовки на 0,02 МВт.

Ключевые слова: адаптация, стабилизирующий контур, автоматическое управление, диалоговый режим, функции адаптации, тестирующее воздействие, функция Уолша.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технические средства цифрового автоматического управления обеспечивают возможность создания программной реализации самонастраивающихся (адаптивных) локальных стабилизирующих контуров управления в составе АСУ ТП промышленного производства.

Программное обеспечение адаптивной системы нижнего (локального) уровня управления содержит неизменяемую подпрограмму адаптации каждого контура управления технологическими параметрами автоматизируемого процесса и варьируемую в зависимости от конкретного вида технологического процесса подпрограмму исходной информации об объекте управления. Подпрограмма исходной информации обеспечивает порядок реализации следующих операций:

- назначение порядковых номеров и определение принятых технологических названий всех информационных параметров и контуров управления, используемых при управлении конкретным технологическим процессом;
- назначение количества и определение конкретных числовых значений базовых (реперных) точек градуировочных характеристик всех используемых датчиков и задатчиков в каждом конкретном контуре управления;
- определение количества и название всех технологических зон принятых на автоматизируемом объекте управления;
- условия расчёта сигналов рассогласования и порядок выдачи на пусковые устройства исполнительных

механизмов (ИМ) управляющих воздействий (команд) по каждому локальному контуру управления;

– организацию визуализации усредненных за заданный интервал времени значений основных определяющих параметров управляемого технологического процесса.

Основная подпрограмма осуществляет адаптацию автоматической системы к технологическому объекту управления и функционирует в режиме разделения реального времени, обеспечивая выполнение следующих приоритетных функций – градуировка, настройка, управление.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Функция «Градуировка» осуществляет адаптацию микропроцессорного регулирующего контроллера (МРК) к информационной структуре технологических параметров управляемого процесса путем определения градуировочных характеристик всех информационных каналов, определяющих текущее состояние процесса в координатах «Значение параметра в физических единицах» – «Код аналогового цифрового преобразователя» на всём возможном интервале управляющих воздействий. Все градуировочные характеристики в табличной форме в виде опорных (реперных) значений записываются в память МРК при их определении в диалоговом режиме.

Функция «Настройка» реализует адаптацию МРК к автоматизируемому технологическому процессу по каждому конкретному контуру управления, обеспечивая последовательное выполнение следующих операций:

– организации и реализации плана подачи на объект ступенчатых возмущений путем переключения направления тестирующих воздействий в соответствии с уникальными свойствами ортогональной функции Уолша с целью исключения влияния различных случайных возмущений на результирующую переходную характеристику (кривую разгона) при определении динамических параметров конкретного управляемого технологического параметра;

– программное определение динамических параметров: коэффициента передачи $K_{об}$ постоянной времени T_0 , времени запаздывания t_3 по результирующей кривой разгона;

– определение рациональных значений динамической настройки параметров выбранного типового закона, в пределах ПИ – ПИД, по каждому контуру управления, гарантирующих устойчивость при соответствующих динамическим параметрам объекта управления: коэффициенту передачи регулятора k_p , времени изодрома $T_{из}$, времени предварения T_p в соответствии с принятым методом оптимизации параметров переходного процесса в контуре [4].

Функция "Управление" при наличии сигнала рассогласования осуществляет программную реализацию следующих операций:

– формирование эффективной реализации типовых ПИ или ПИД законов управления в каждом контуре управления при заданных значениях постоянных скоростей исполнительных механизмов и заданных значениях зон нечувствительности и гистерезиса в релейных характеристиках в этих контурах.

– осуществляет остановку процедуры интегрирования при достижении управляющих воздействий предельно возможных значений в каждом контуре управления при срабатывании конечных выключателей ИМ.

Важной отличительной особенностью обеспечивающей эффективность адаптации МРК к объекту управления является формирование для каждого контура управления рабочей градуировочной характеристики. Суть этой программно реализуемой процедуры заключается в приведении, как правило, нелинейной градуировочной характеристики датчика технологического параметра к линейной градуировочной характеристике автоматического или ручного задатчика этого параметра.

Определение рабочей характеристики для каждого контура осуществляется с использованием реперных точек градуировочных характеристик датчика и задатчика, используемых при формировании контура управления.

Промежуточные значения между опорными точками всех характеристик в реальных условиях функционирования рассчитываются по методу линейно-кусочной аппроксимации.

Использование рабочей характеристики позволяет значительно повысить оперативность решения задачи по адаптации каждого конкретного контура управления [1].

Результаты многолетней работы по теоретическому обоснованию, математическому описанию, технической реализации и практическому использованию рассмотренного метода адаптации МРК к автоматизируемому технологическому процессу подробно изложены в работе [1].

ОСНОВНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОВЫШЕННУЮ ТОЧНОСТЬ АДАПТАЦИИ

Основным фактором, определяющим эффективность адаптации МРК к управляемому технологическому процессу, является точность определения динамических параметров в каждом контуре управления. В производственных условиях наличие случайных помех и неконтролируемых технологических возмущений, оказывающих значительное влияние на величины определённых динамических параметров, особенно коэффициента передачи объекта управления определяет причину существенных ошибок при настройке контуров управления.

Использование ортогональных функций Уолша для устранения влияния различных возмущений предложено Г.Ф. Обуховым [2, 3] ещё в конце прошлого века.

Влияние различных возмущений можно полностью компенсировать путем использования плана тестирующих воздействий в соответствии с ортогональной функцией Уолша вида

$$\Psi_n = \prod_{k=1}^{n+1} \text{Sign} \sin \frac{2^k \pi \tau}{T}, \text{ при } 0 \leq \tau \leq T \quad (1)$$

где Ψ_n – сигнум (знаковая) функция, определяющая направление входного возмущающего тестирующего воздействия при снятии одной кривой разгона: T – общий интервал времени, необходимый для снятия всех кривых разгона в соответствии с планом;

$m = T/\Delta\tau$ – количество кривых разгона, необходимых для выполнения плана, заданного функцией;

n – максимальная степень аппроксимирующего полинома, которым может быть представлена траектория внешнего возмущающего воздействия;

$\Delta\tau$ – продолжительность одного определения параметра по кривой разгона.

Общее количество кривых разгона в зависимости от степени аппроксимирующего полинома определяется выражением

$$m = 2^{n+1}$$

Изменение переключающей функции в зависимости от степени компенсируемого полинома ($n = 0, 1, 2, 3, n$) представлен на рис. 1.

Функция Ψ_n компенсирует все возмущения, траектория которых может быть аппроксимированная полиномами степени $0 - n$. Для практической реализации полезно помнить следующие правила. Функция $\Psi_n(\tau)$ может быть получена из функции $\Psi_{n-1}(\tau)$ с использованием свойств (рис.1) при n – чётных свойств центральной симметрии, при n – нечётных свойств осевой симметрии.

Важное значение имеет выбор величин $\Delta\tau = 1,5 \div 2T_3$, где T_3 – эквивалентная постоянная времени $T_3 = T_0 + t_3$. Здесь T_0 и t_3 – соответственно постоянная времени, характеризующая инерционность параметра, и время запаздывания параметров в данном контуре.

Эффективность использования функций Уолша при планировании идентифицирующих воздействий подтверждена применением функции на опытном стенде полностью имитирующем локальный контур управления температурой рабочего пространства нагревательной электрической печи.

Используя известные параметры объекта $K_{об}$, T_0 и t_3 программно определяются величины динамических

параметров настройки регулятора в соответствии с рекомендациями приведенными в работе [4, 5]:

$$k_p = \frac{T_0}{2 \cdot k_{об} \cdot \tau_3}; T_{из} = T_0; T_{п} = 0,1 \div 0,15T_0 \quad (2)$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора, $T_{из}$ – время издрода, $T_{п}$ – время предварения, гарантирующие устойчивую работу контура, управляющего работой объектом с самовыравниванием, составляющих более 90% всех промышленных контуров управления.

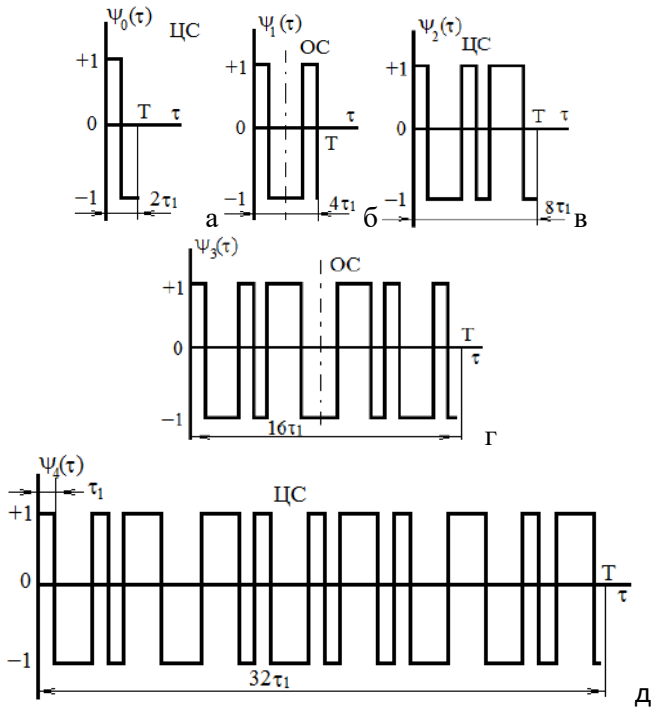


Рис.1 Графическое изображение переключающей функции для случаев $n=0, 1, 2, 3, 4$

Для объектов без самовыравнивания, в структуре которых есть интегрирующие элементы, определение динамических настроек регулятора осуществляется в соответствии с выражением

$$k_p = \frac{T_{инт}}{2 \cdot k_{об} \cdot \tau_3}; T_{из} = 4\tau_3; T_{п} = 0,15 \div 0,2T_{из},$$

где $T_{из}$ – время издрода, с.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО КОНТУРА

В рассматриваемой адаптивной системе управления технологическими параметрами для повышения оперативности работы МРК программный синтез цифрового аналога ПИД закона управления осуществлен в соответствии с выражением:

$$x(\tau) = x(0) + k_p \left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^\tau \varepsilon(\tau) d\tau + T_{п} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right), \quad (3)$$

где $x(0)$, $x(\tau)$ – начальное и текущее значения положения выходного вала исполнительного механизма контура; $\varepsilon(\tau) = Y_3(\tau) - Y(\tau)$ – сигнал рассогласования между заданным $Y_3(\tau)$ и текущим $Y(\tau)$ значениями регулируемого параметра; k_p , $T_{из}$, $T_{п}$ – параметры настройки регулятора (2) соответственно заранее определенных значений с использованием динамических параметров объекта.

В общем виде выражение (3) можно представить в виде:

$$[x_3(\tau) = k_p \left[T_{п} \frac{d^2\varepsilon(\tau)}{d\tau^2} + \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{\varepsilon(\tau)}{T_{из}} \right] d\tau + x_0 + k_p \left[\varepsilon_0 + \frac{T_{п}\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right] \quad (4)$$

где $\varepsilon_0 = \varepsilon(\tau=0)$ – определяет начальное состояния управляемого параметра в момент включения МРК.

В установившемся режиме $\varepsilon_0(\tau)$ и $\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}$ равны нулю.

Поскольку в промышленных системах автоматического управления используются ИМ постоянной скорости, то текущее значение $x(\tau)$ с достаточной для практических целей точностью ($\pm 2\%$) можно определить соответствие с выражением

$$x(\tau) = x_0 + k_{им} \int_0^\tau S(\tau) d\tau \quad (5)$$

где $S(\tau) = \{-1, 0, +1\}$ – сигнум функция, определяющая текущее состояние ИМ: +1 – движение на увеличение $x(\tau)$; 0 – $x(\tau) = \text{const}$ неподвижное состояние ИМ; -1 – движение на уменьшение $x(\tau)$; $k_{им}$ – техническая скорость ИМ, используемого в данном контуре.

МРК должен так управлять параметром путем изменения управляющего воздействия на ИМ во всех контурах управления, чтобы функция ошибки $\delta(\tau)$

$$\delta(\tau) = x_3(\tau) - x(\tau) \quad (6)$$

была бы минимальной или практически нулевой на достаточно большом интервале времени.

В случае, наиболее приемлемым для повышения оперативности управления, рассматриваемой системы для формирования управляющей функции принято условие

$$S(\tau) = \text{Sign}(\delta(\tau)) \quad (7)$$

Предложенный метод реализации ПИД или ПИ законов управления в соответствии с (7) возможно является не самым лучшим, но практическая выгода от удобства его реализации в промышленных условиях очевидна и проверена в реальных производственных условиях [6, 7, 9].

Для предотвращения возможности автоколебательного режима работы синтезируемого контура управления переключение управляющей функции $S(\tau)$ осуществляется с зоной нечувствительности δ_1 и гистерезисом δ_2 в соответствии с условиями

$$S(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{при } \delta(\tau) \geq \delta_1^* \\ 0, & \text{при } |\delta(\tau)| < (\delta_1^* - \delta_2^*) + \delta_1^* \\ -1, & \text{при } \delta(\tau) < -\delta_1^* \end{cases} \quad (8)$$

где δ_1^* – заданная величина зоны нечувствительности контура (записана в памяти МРК); δ_2^* – заданная зона гистерезиса функции переключения контура, хранящаяся в памяти МРК.

Полученные динамические настройки могут корректироваться в процессе эксплуатации МРК в режиме "НАСТРОЙКА" при изменении технологических условий работы МРК.

В процессе наладки энергосберегающий цифровой системы управления тепловым режимом 100-тонной нагревательной печи №2 толкательного типа широкополосного стана горячей прокатки 2500 в качестве локального уровня управления использована рассмотренная методика адаптации МРК к процессу нагрева, что значительно упростило и ускорило технологическую наладку системы [10].

В результате опытно-промышленной системы автоматического управления тепловым режимом на печи №2 стана 2500 получено снижение удельного количества природного газа на 2% при одновременном увеличении температуры раската полосы на 4 °С и снижении затрат

электроэнергии при прокатке каждой 20-тонной непрерывно литой заготовки на 0,02 МВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свободно программируемые МРК способны самостоятельно в диалоговом режиме обеспечить адаптацию всех используемых локальных контуров управления на локальном уровне.

Предлагаемые в работе операции все реализованы и апробированы в реальных условиях промышленного производства.

Использование методики адаптации позволяет значительно повысить производительность наладочных работ в 2-3 раза, одновременно повышая квалификацию операторов наладчиков по технологическим вопросам

ЛИТЕРАТУРА

1. Парсункин, Б.Н. Локальные контуры системы автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Т.У. Ахметов; под ред. Б.Н. Парсункина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 406 с.

2. Парсункин, Б.Н. Формирование тестирующих сигналов для идентификации теплоэнергетических объектов / Б.Н. Парсункин, Г.Ф. Обухов, А.В. Леднов // Известия вузов. Теплоэнергетика. –1988. – №6. – С.65-70.

3. Парсункин, Б.Н. Самонастраивающаяся система для управления тепловым режимом печей / Б.Н. Парсункин, Д.Г. Шестеркин, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. –1987. – №11. – С.102 – 104.

4. Флер Р., Оттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: учебн. пособие. –М.: Альтекс, 2009. – 197 с

5. Парсункин, Б.Н. Идентификация элементов систем автоматизации и оптимизация контуров управления технологическими процессами / Б.Н. Парсункин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 1997. – 134 с.

6. Парсункин, Б.Н. Система визуализации при создании адаптивного комплекса локального уровня управления в АСУ ТП промышленного производства / Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. // Электротехнические системы и комплексы.–2015.–№ 2(27). – С.44-47.

7. Парсункин Б.Н. Адаптация и оптимизация настройки контуров цифрового управления: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 1991. 134с.

8. Кулаков Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справочное пособие. Минск: Высш. шк., 1984. – 192с.

9. Парсункин, Б.Н. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Б.Н. Парсункин, Б.К. Сенчикин, С.М. Андреев, М.Ю. Рябчиков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №4(36), С.69-73.

10. Парсункин, Б.Н. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, М.В. Бушманова, С.В. Булычева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2007. 315 с.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DIGITAL ADAPTIVE STABILIZING LOCAL CONTROL CIRCUITS IN CENTRALIZED APCS

B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, A.R. Bondareva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. A general solution to the current problem of software synthesis of adaptive digital stabilizing circuits for controlling technological parameters in energy-saving centralized automated process control systems was proposed.

The software adaptation problem of the microprocessor regulatory controller (MRC) is solved in the interactive mode by performing three functions: "calibration", "setting", "control".

This allows to programmatically create compact, high-speed, object-oriented systems of the local (lower) control level in centralized APCS with minimal costs.

The practical use of such an automatic adaptive system for energy-saving control of the thermal regime of the heating method furnace allowed, while reducing the specific fuel consumption by 2%, to increase the average rolling temperature of the billet after the roughing group by 4 °C, while reducing the average energy spent during rolling of each 20-ton continuous billet by 0.02 MW.

Keywords: adaptation, stabilizing circuit, automatic control, dialog mode, adaptation functions, testing effect, Walsh function

REFERENCES

1. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ahmetov U.G. Lokalnye stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva [Local stabilizing circuits of automatic control in automatic control

systems of industrial production processes]. Magnitogorsk, NMSTU, 2012. 406 p.

2. Parsunkin B.N. Obuhov G.F., Lednov A.V. Formation of test signals for identification of thermal power objects [Formirovanie testiruyushchikh signalov dlya identifikatsii teploenergeticheskikh ob'ektov], *Izvestiya vuzov. Teploenergetika*. [The

news of universities. Thermal engineering]. 1998, no.6, pp.65-70.

3. Parsunkin B.N., Shesterkin D.G., Obuhov G.F. and others. Self-adjusting system for control of conditions of furnaces [Samonastraivayushchayasya sistema dlya upravleniya teplovym rezhimom pechej], *Stal' [Steel]*, 1987, no.11, pp. 102-104.

4. Fler P., Ottenburger F. Vvedenie v ehlektronnuyu tekhniku regulirovaniya [Introduction to electronic control engineering]: textbook, Moscow, Alteks, 2009, 197 p.

5. Parsunkin B.N. Identifikatsiya elementov sistem avtomatizatsii i optimizatsiya konturov upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Identification of automation system elements and optimization of technological process control circuits], Magnitogorsk, NMSTU, 1997, 134 p.

6. Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Visualization system for creating an adaptive complex of a local level control in APCS of industrial production [Sistema vizualizatsii pri sozdanii adaptivnogo kompleksa lokal'nogo urovnya upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva],

Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы, [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015. Vol. 27, no. 2, p. 44–47.

7. Parsunkin B.N. Adaptatsiya i optimizatsiya nastrojki konturov cifrovogo upravleniya: ucheb. posobie [Adaptation and optimization of digital control circuit configuration: tutorial]. Magnitogorsk, NMSTU, 1991, 134 p

8. Kulakov G.T. Inzhenernye ekspres-metody rascheta promyshlennykh sistemre-gulirovaniya: spravochnoe posobie [Engineering rapid methods of calculation of industrial control systems]. Minsk: Graduate School, 1984, 192 p.

9. Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreev S.M., Ryabchikov M.Yu. Blast furnace performance improvement by means of automatic control optimization of natural gas and technical oxygen submission in blasting. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2007, Vol. 4, no. 36, pp. 69-73.

10. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bushmanova M.V. Statistical research and modeling of economic and technological processes of metallurgical production. Magnitogorsk, NMSTU, 2007. 315 p.



Парсункин, Б.Н., Программная реализация цифровых адаптивных стабилизирующих локальных контуров управления в централизованных АСУ ТП /Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.Р. Бондарева // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №1(23). С.16-20.

B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, A.R. Bondareva Software implementation of digital adaptive stabilizing local control circuits in centralized APCS. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2021, no.1(23), pp.16-20. (In Russian).

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ МИКРОКЛИМАТА ЧАСТНОГО ДОМА

О.Л. Юдина

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия

olga_yudina98@mail.ru

Аннотация. В загородном доме, расположенный в п. Кассельский Челябинской области, отсутствует теплый пол, регулирование температуры воздуха происходит вручную с помощью выносного пульта газового котла или открывания форточек. Исходя из этих факторов, появилась необходимость создания системы управления микроклиматом, которая будет регулировать температуру воздуха с минимальными затратами ресурсов. Потребность в управлении системой отопления возникла из-за частого отсутствия жильцов дома, работы системы отопления в холостую, невозможности дистанционного контроля параметров. Цель работы - разработать систему управления для стабилизации температуры жилых помещений. Принцип работы системы: когда заканчивается тепловая энергия в доме, т.е. в доме становится холодно, регуляторы подают сигналы на сервоприводы, сервоприводы в свою очередь открывают клапаны, подавая теплоноситель в радиаторы, нагревая комнаты. Если температура не растет или растет не быстро, а регуляторы полностью открыли клапаны, то ПЛК необходимо увеличить уставку задания температуры обратной воды. Аналогично происходит и в обратную сторону процесса. В ходе работы разработана математическая модель автоматизированной системы управления микроклиматом в частном доме. Рассчитаны коэффициенты воздействия соседних комнат через внутренние перегородки, а также воздействие температуры окружающей среды через внешние перегородки. Также для данной системы была разработана структурная схема.

Ключевые слова: микроклимат дома, управление микроклиматом, частный дом, энергосбережение, энергоресурсы, отопление, температура.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из перспективных сегментов рынка недвижимости являются индивидуальные загородные дома. Данный сегмент рынка стал популярен благодаря смене приоритетов жителей городов, которые все больше стали задумываться о своем здоровье, приобретая дома в поселках, где есть все комфортные условия для проживания и свежий воздух.

Одним из параметров комфортных условий для жизни в поселке является возможность индивидуального регулирования параметров микроклимата при минимальном потреблении энергетических ресурсов. В целях повышения энергосбережения, обеспечения безопасности и комфорта для каждого члена семьи в жилых помещениях часто используют средства автоматизации. Обычно в системах автоматического управления микроклиматом имеется индикация параметров, интерфейс пользователя в виде небольшого графического дисплея и функциональной клавиатуры, исполнительные механизмы регулирования. Также бывает необходимо дистанционно отслеживать параметры или управлять устройством дистанционно[1].

Система автоматического управления микроклиматом (климат-контроль) позволяет дистанционно управлять отоплением дома, кондиционированием, вентиляцией и теплым полом в зависимости от режимов работы, а также от климатических зон дома. Использование системы климат-контроль позволяет: централизованно управлять системами дома, автоматически поддерживать заданные параметры микроклимата, экономить потребление энергетических ресурсов[2].

В загородном доме, расположенный в п. Кассельский Челябинской области, отсутствует теплый пол, регулирование температуры воздуха происходит вручную с помощью выносного пульта газового котла или открывания форточек. Исходя из этих факторов, появилась необходимость создания системы управления микроклиматом, которая будет регулировать температуру воздуха с минимальными затратами ресурсов. Потребность в управлении системой отопления возникла из-за частого отсутствия жильцов дома, работы системы отопления в холостую, невозможности дистанционного контроля параметров.

МЕТОДЫ ИСЛЕДОВАНИЯ

В работе необходимо провести исследования с использованием методов: математического анализа и вычислительной математики при расчёте коэффициентов воздействий соседних комнат; математической статистики для обработки экспериментальных данных; математического моделирования для исследования системы.

ОПИСАНИЕ ТИПОВОГО ЗАГОРОДНОГО ДОМА

Автоматизированная система управления микроклиматом представляет собой систему, предназначенную для поддержания заданных климатических характеристик в жилом доме с помощью управления вентиляцией, кондиционированием воздуха и отоплением в автоматическом режиме.

Использование системы управления микроклиматом обусловлено следующими факторами:

- значительное влияние на здоровье человека;
- минимизация потребления энергоресурсов;
- возможность создания климатических зон в помещениях дома;

- разнообразие климатических режимов;
- дистанционный контроль за выполнением заданных параметров.

К минусам данной системы можно отнести:

- непростая и трудозатратная процедура монтажа оборудования;
- высокая стоимость.

Исходя из перечисленных достоинств и недостатков было принято решение создать автоматизированную систему управления микроклиматом в собственном загородном доме (коттедже), расположенный в п. Кассельский Челябинской области.

Одноэтажный дом площадью 80 м² имеет 8 жилых помещений. Высота потолков 2,9 м. Наружные стены и фундамент выполнены из шлакоблока, внутренние стены выложены из кирпича. Каркас крыши сделан из бруса и досок, в качестве кровельного материала использована коричневая металлочерепица – разновидность профилированного листа из тонколистовой оцинкованной стали. Наружная отделка здания выполнена долговечным материалом металлическим сайдингом, под которым располагается теплоизоляционный материал стекловата. Стекловата – разновидность минеральной ваты, сделанная при помощи излишков стекольной промышленности. Поглощение воды такое же, как и у минеральных волокон, показатели теплопроводности немного выше, материал не горит, плотность до 30 кг/м³. План дома с существующей системой отопления показан на рис. 1.

Остекление в коттедже выполнено с помощью пластиковых окон. Пластиковые окна в коттедже – это экономически выгодный вариант остекления, а также долговечный и экологически безопасный материал, обладающий высокими показателями по шумо- и теплоизоляции. Всего в доме шесть больших окон размером 1,2×1,3 м и три маленьких размером 0,6×1,3 м. Входная дверь выполнена из металла, обладающая рядом неоспоримых преимуществ: простота эксплуатации, высокий уровень безопасности, влагостойкость и пожаробезопасность. Межкомнатные двери изготовлены из МДФ. Мелкодисперсионная фракция (МДФ) имеет плотность и вес, большие, чем у натуральной древесины, материал отличается огнеупорностью, шумо- и теплоизоляцией, устойчив к механическим воздействиям.

Большая часть внутренних стен дома покрыта обоями, на кухне выложен фартук из плитки, стены и пол санузла и котельной покрыты керамической плиткой. Пол в прихожей, холле, гостиной выстлан ламинатом, в кухне линолеумом, в спальнях ковролином.

Отопительная система коттеджа водяная однотрубная. Водяная система отопления основана на теплообмене между теплоносителем, который циркулирует по контуру, и воздухом обогреваемого помещения. Принцип действия горизонтальной однотрубной системы заключается в следующем: теплоноситель циркулирует в магистральной трубе, образующей собой замкнутый контур, который начинается и заканчивается в теплогенераторе. Магистральные трубы выполнены из полимерного материала. Они не подвержены коррозии, бесшумны, без проблем переносят мороз. Также установлены дюралевые секционные радиаторы. Радиаторы соединены между собой «по диагонали». Схема соединения «по диагонали» однотрубной системы отопления показана на рис. 2.

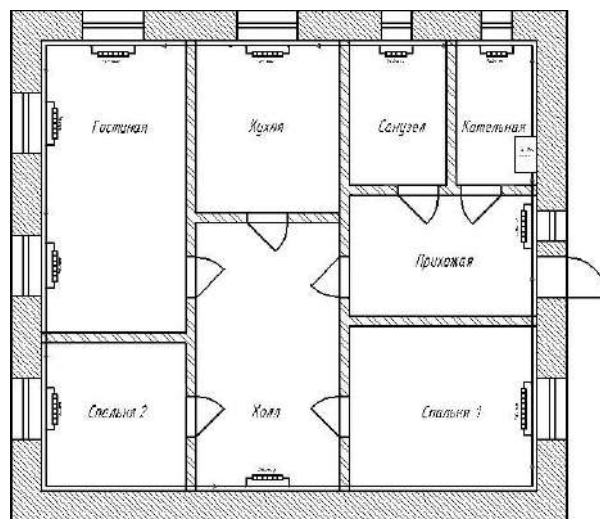


Рис. 1. План дома с существующей системой отопления

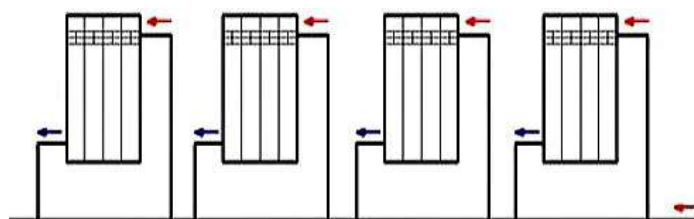


Рис. 2. Схема соединения радиаторов «по диагонали» однотрубной системы отопления

Собственная система отопления в частном доме намного предпочтительнее, чем подключение к центральному отоплению. Исчезает зависимость от поставщиков, роста тарифов, изношенных сетей и прочих проблем. Установка собственного котла требует определенных первоначальных вложений, которые впоследствии окупаются заметной экономией на обогреве дома. Существуют качественные и относительно недорогие газовые устройства, обеспечивающие отопление и подачу горячей воды для бытовых нужд. Одним из подобных устройств является двухконтурный котел Navien Ace [3].

Наличие в доме газовых приборов предъявляет повышенные требования к обустройству циркуляции в помещениях. Нарушение тяги может стать причиной отравления продуктами сгорания. Площадь частного дома 80 м², поэтому для нормальной работы автономного отопления вполне достаточно естественной тяги. Для котла мощностью до 30 кВт необходимо иметь продушину диаметром в 15 см согласно СНиП 2.04.05–91[4]. Вентиляционный канал оснащен пластиковым патрубком и снаружи закрыт металлической сеткой, закрывающей доступ грызунам и препятствующей попаданию мусора. Верхний край вытяжной трубы закрыт «зонтиком», защищающим вытяжной канал от атмосферных осадков. С внутренней стороны на трубе установлен обратный клапан, который препятствует произвольному выходу воздуха наружу. Вытяжка установлена непосредственно над отопительным котлом, тогда как воздуховод смонтирован за топливной камерой. На кухне и санузле установлены вентиляционные решетки.

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СХЕМА ОТОПЛЕНИЯ

Гидравлическая схема отопления загородного дома показывает основную магистраль (трубопровод) с расположением радиаторов в каждой комнате, количество секций радиаторов, устройства для регулирования потока теплоносителя – двухходовый клапан и сервопривод, газовый котел. Отопительная система коттеджа однотрубная. Вода циркулирует в магистральной трубе и радиаторах, образуя собой замкнутый контур, который начинается и заканчивается в газовом котле. Перед входом в радиаторы установлены двухходовые клапаны с сервоприводами. Клапан может повысить температуру радиатора, открыв вентиль, или понизить, перекрыв поток горячей воды. Гидравлическая схема отопления представлена на рис. 3.

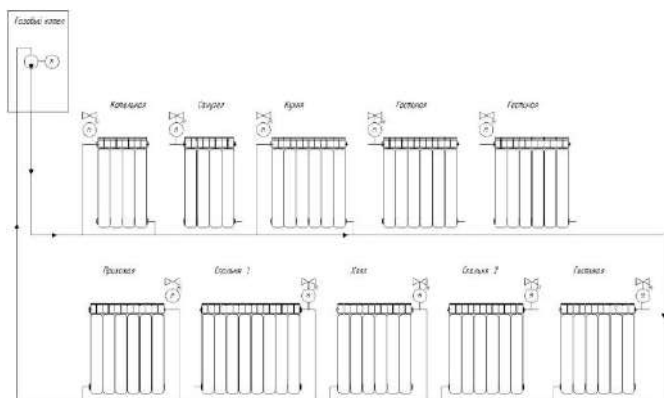


Рис. 3. Гидравлическая схема отопления

ОБЩАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ МИКРОКЛИМАТА ЧАСТНОГО ДОМА

Количество энергии, затраченное на отопление дома, напрямую зависит от тепловых потерь здания: чем больше тепла уходит впустую, тем большей мощности требует система отопления. Тепло в частном доме утекает через окна и входные двери, стены и плиты перекрытия, фундамент, крышу. Помимо этого, существуют неучтенные потери тепла, возникающие из-за не герметичности конструкции здания: наличия трещин и зазоров, отверстий для подведения коммуникаций, - так называемые мостики холода[5]. Жителям многоквартирных домов повезло больше – со всех сторон соседи, поэтому основные тепловые потери идут через окна и выходящие на улицу стены. Среднестатистические тепловые потери частного и многоквартирных домов представлены на рис. 4.

В частном доме п.Кассельский восемь комнат, каждая из восьми комнат воздействует на другую переносом тепла. Воздействие температур жилых помещений представлено на рис. 5.

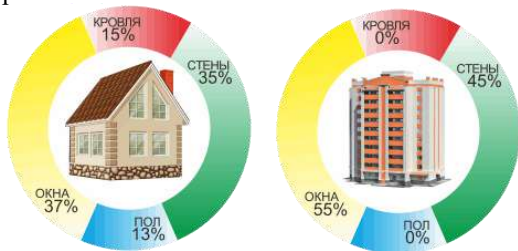


Рис. 4. Среднестатистические тепловые потери частного и многоквартирных домов

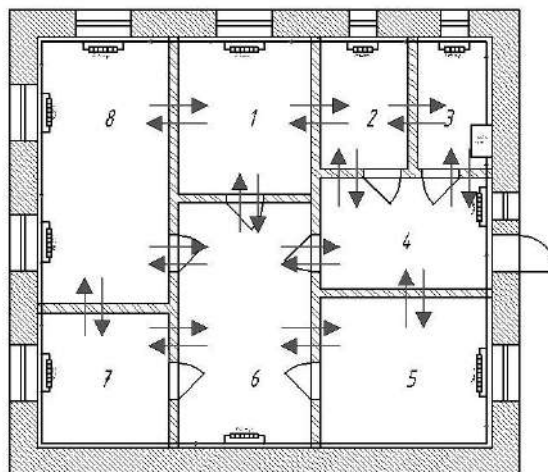


Рис. 5. Воздействие температур жилых помещений

Для поддержания параметров микроклимата в каждой комнате частного дома используются сервоприводы с двухходовыми клапанами, датчики температуры, регуляторы. В комнатах располагаются датчики температуры, которые передают данные регуляторам по протоколу 1-Wire. Нормально открытый сервопривод ИМ принимает сигнал от регулятора и закрывает клапан, когда, нагрев произошел до нужной температуры. Для взаимодействия с системой управления и задания ее параметров используется панель оператора и мобильный телефон по GSM модулю (когда жильцы находятся вне дома). Отслеживание состояния системы управления климат-контролем осуществляется также с помощью панели оператора и мобильного телефона[6].

Контроллер и пульт управления предназначены для управления работой сервоприводов, регулирования и контроля показателей. Мобильный телефон предназначен для получения информации о системе, выбора режима, задания параметров.

Структурная схема автоматизированной системы управления параметрами микроклимата частного дома представлена на рис. 6.

В замкнутой однотрубной системе отопления циркулирует вода, которая начинает и заканчивает свое движение в газовом котле, поступает в радиаторы, отдавая тепло комнатам $q_1...q_{10}$. На каждую комнату воздействуют соседние комнаты с коэффициентами $K_{12}...K_{87}$, также, как и сама комната воздействует на другие.

Когда заканчивается тепловая энергия в доме, т.е. в доме становится холодно, регуляторы 1-10 подают сигналы на сервоприводы, сервоприводы в свою очередь открывают клапаны, подавая теплоноситель в радиаторы, нагревая комнаты. Если температура не растет или растет не быстро, а регуляторы полностью открыли клапаны, то ПЛК необходимо увеличить уставку задания температуры обратной воды. Аналогично происходит и в обратную сторону процесса.

Если в комнатах становится жарко, регуляторы 1-10 подают сигналы на сервоприводы, сервоприводы в свою очередь закрывают клапаны, прекращая подачу теплоносителя в радиаторы, температура в комнатах понижается. Если температура не понижается или снижается медленно, а регуляторы полностью закрыли клапаны, то ПЛК автоматически уменьшает уставку задания температуры обратной воды.

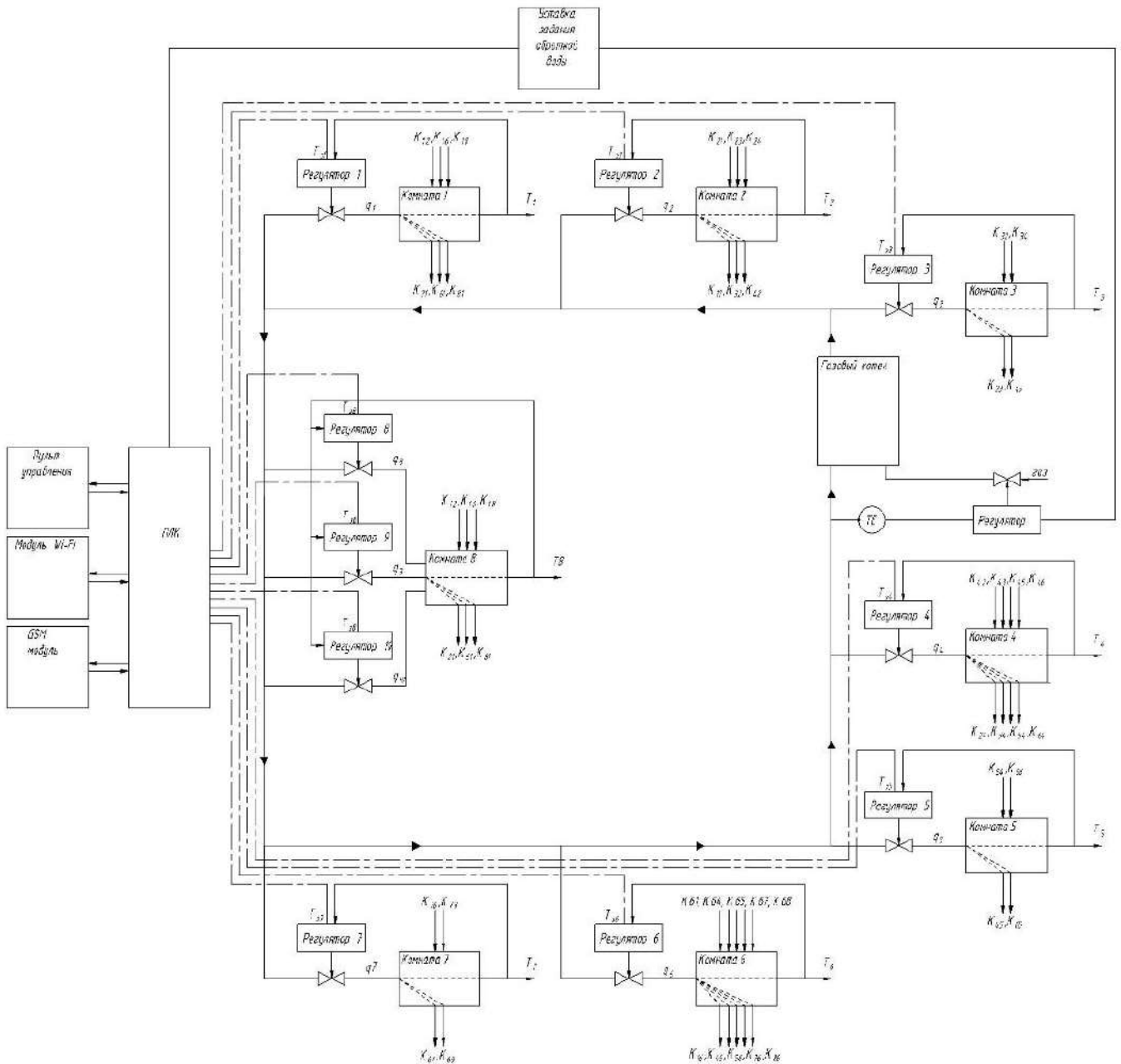


Рис. 6. Структурная схема автоматизированной системы управления микроклиматом в загородном доме

Для расчета коэффициентов воздействий температур соседних комнат через межкомнатные перегородки необходимо найти объем каждого жилого помещения V , рассчитать количество тепла Q , выделяемого радиаторами в каждой комнате. Теплоотдача одной секции радиатора 180Вт, высота потолка 2,9 м. Количество тепловой энергии K , затрачиваемое на обогрев одного куба помещения:

$$K=Q/V=(N \cdot 180)/V$$

где K – количество тепловой энергии, затрачиваемое на обогрев одного куба комнаты, (Вт/м³); V – объем комнаты, (м³); N – количество секций радиаторов; Q – количество тепла, выделяемое радиаторами комнаты, (Вт).

В табл. 1 представлен расчет количества тепловой энергии, затрачиваемое на обогрев одного куба каждой комнаты.

Таблица 1

Расчет количества тепловой энергии, затрачиваемое на обогрев одного куба каждой комнаты

№ комн.	Ширин, м	Длина, м	$V, \text{ м}^3$	N	$Q, \text{ Вт}$	$K, \text{ Вт/м}^3$
1	2,85	3,4	3,4	6	1080	38,43
2	1,85	2,85	2,85	4	720	47,09
3	1,6	2,85	2,85	4	720	54,45
4	3,45	2,85	2,85	6	1080	37,88
5	3,45	2,85	2,85	8	1440	50,50
6	2,85	5,3	5,3	6	1080	24,66
7	2,85	2,92	2,92	6	1080	44,75
8	2,85	5,77	5,77	18	3240	67,94

Коэффициенты теплопотерь через внутренние перегородки рассчитываются исходя из отношения количества тепловой энергии K , затрачиваемое на обогрев соседней комнаты, на количество тепловой энергии K рассчитываемой комнаты.

Таблица 2
Коэффициенты теплопотерь через внутренние перегородки

№ комн.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1,23	-	-	-	0,64	-	1,77
2	0,82	-	1,16	0,8	-	-	-	-
3	-	0,86	-	0,7	-	-	-	-
4	-	1,24	1,44	-	1,33	0,65	-	-
5	-	-	-	0,75	-	0,49	-	-
6	1,56	-	-	1,54	2,05	-	1,82	2,76
7	-	-	-	-	-	0,55	-	2,76
8	0,57	-	-	-	-	0,36	0,66	-

Для расчета коэффициентов теплопотерь через внешние ограждающие конструкции необходимо принять всю площадь внешних стен за 1, пропорционально площади стен рассчитать коэффициенты теплопотерь. Коэффициенты теплопотерь через внешние ограждающие конструкции представлены в табл. 3.

Таблица 3
Коэффициенты теплопотерь через внешние ограждающие конструкции

№ комн.	Ширина, м	Длина, м	Площадь внешних стен, м ²	Коэффициент
1	2,85	3,4	8,27	0,08
2	1,85	2,85	5,37	0,05
3	1,6	2,85	12,91	0,12
4	3,45	2,85	8,27	0,08
5	3,45	2,85	23,64	0,22
6	2,85	5,3	8,27	0,08
7	2,85	2,92	16,73	0,15
8	2,85	5,77	25,00	0,23
			108,4	1,00

Рассмотрим оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в обслуживаемой зоне помещений жилых зданий и общежитий по ГОСТ 30494-2011 [7] для определения требуемой температуры каждой комнаты. Определим сиг-

налы задания для каждой комнаты $T_{31} \dots T_{38}$ (требуемая температура комнаты). В табл. 4 представлены сигналы задания (требуемые температуры комнат).

Таблица 4
Сигналы задания (требуемые температуры комнат)

№ комнаты	Наименование помещения	Сигнал задания	Требуемая температура, °С
1	Кухня	T_{31}	21
2	Совмещенный санузел	T_{32}	23
3	Котельная	T_{33}	18
4	Прихожая	T_{34}	20
5	Спальня 1	T_{35}	23
6	Холл	T_{36}	20
7	Спальня 2	T_{37}	23
8	Зал	T_{38}	21

На вход контура регулирования температурой комнаты подается значение требуемой температуры в комнате T_3 , сигнал поступает на элемент сравнения ЭС1, откуда вычитается сигнал T_5 , который сравнивает коэффициент теплопотерь через внешние ограждающие конструкции K_4 и температуру в комнате T_4 :

$$T_1 = T_3 - T_5 = T_3 - (T_4 - K_4) = T_3 - T_4 + K_4$$

Далее сигнал проходит через ПИД-регулятор, поступает на элемент сравнения ЭС2, где суммируются коэффициенты воздействий K_1, K_2, K_3 соседних комнат:

$$T_3 = T_2 + K_1 + K_2 + K_3$$

После элемента сравнения ЭС2 сигнал поступает на аperiodическое (инерционное) звено первого порядка [8,9]:

$$T_4 = \frac{k}{Ts+1}$$

где T – постоянная времени звена, k – коэффициент передачи (усиления) звена. Данные коэффициенты не рассчитываются, подбираются исходя из площади комнаты.

Модель контура регулирования температурой комнаты показана на рис. 7 [10]. Модель идентична для каждой комнаты. Модель контура регулирования температурой жилых помещений показана на рис. 8.

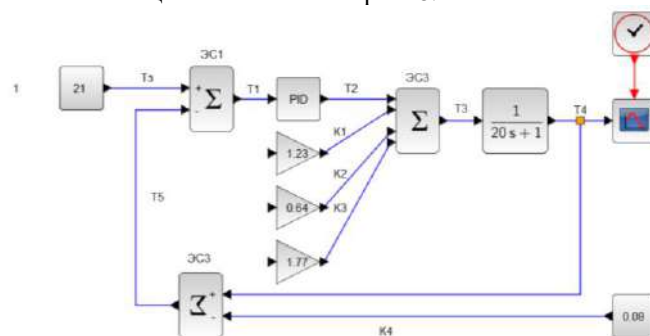


Рис. 7. Модель контура регулирования температурой комнаты

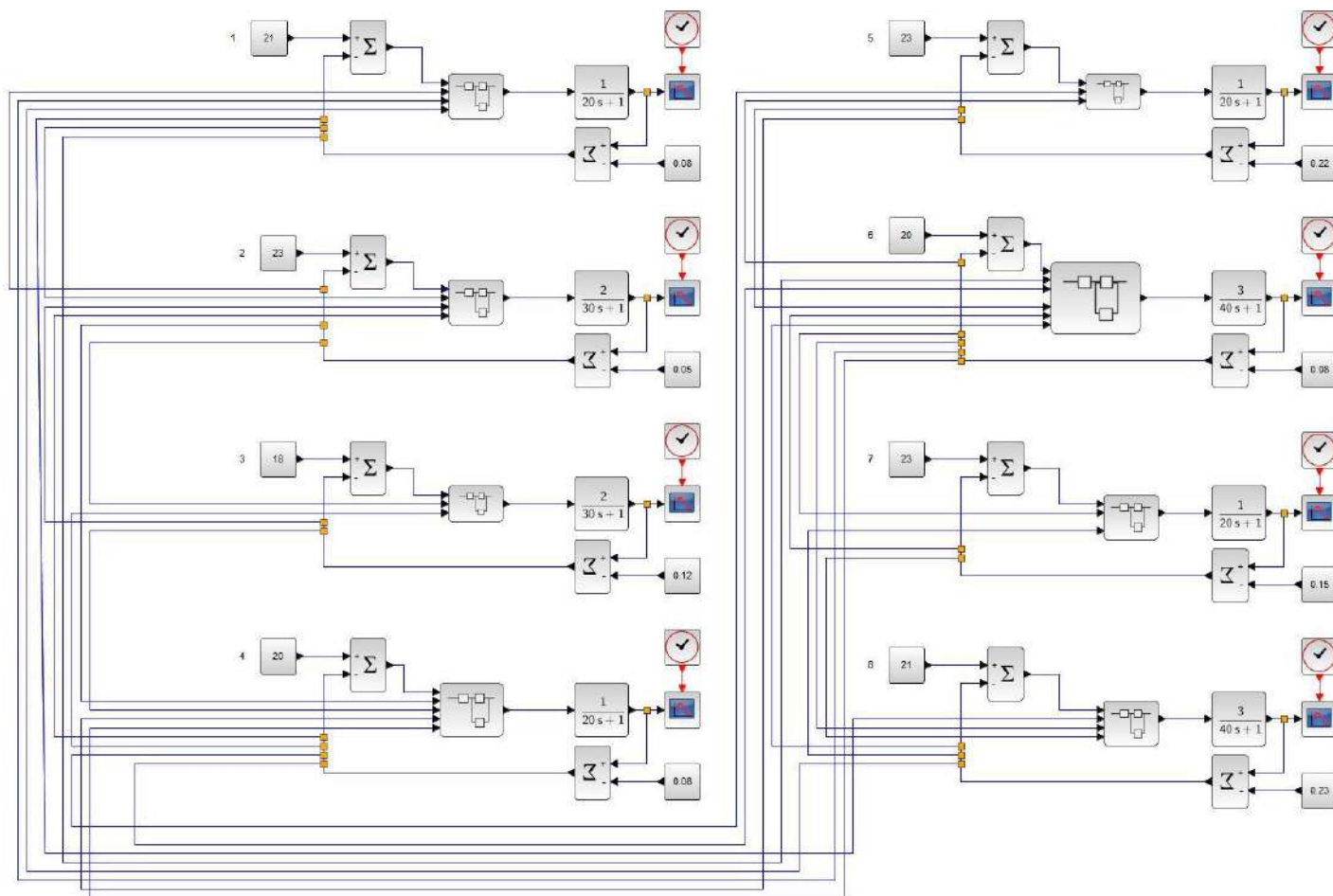


Рис.8. Модель контура регулирования температурой жилых помещений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

В результате выполнения научной работы была исследована и разработана автоматизированная система управления параметрами микроклимата в частном доме. Изучен объект управления (частный дом), его систему отопления, основные характеристики. Рассмотрены тепловые потери частного и многоквартирного домов. Данная система осуществляет автоматизированное управление температурой воздуха с учетом взаимовлияния температур соседних комнат, обеспечивает контроль температуры воздуха с помощью сервоприводов с клапанами по температуре обратной воды, расход газа.

Разработана математическая модель автоматизированной системы управления микроклиматом в частном доме. Рассчитаны коэффициенты воздействия соседних комнат через внутренние перегородки, а также воздействие температуры окружающей среды через внешние перегородки.

Также для данной системы была разработана структурная схема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахманов, В.Х. Информационно-измерительная система дистанционного контроля параметром микроклимата / В.Х. Абдрахманов, К.В.Важдасев, Р.Б.Салихов // Журнал электротехнические и информационные комплексы систем. – 2016. – Т.12, №3. С.91-99. - ISSN: 1999-5458

2. Колодкина А.С., Оптимальное управление энергопотреблением и микроклиматом больших многозонных зданий / А.С. Колодкина, О.Ю. Марьясин, А.А. Огарков // Управление большими системами: сборник трудов. – 2018. - №75. С.146-169. - SSN: 1819-2440.

3. Технические характеристики газового котла Navien Ace: [сайт]. – <https://expert-dacha.pro/otoplenie/kotlyot/gazovye-k/proizvoditeli-gaz-k/navien/ace.html>.

4. СНиП 2.04.05. Свод правил отопление, вентиляция и кондиционирование: постановлением Государственного комитета СССР по строительству и инвестициям от 28 ноября 1991 г.. N 137: в ред. Изменение 3: дата введения 1992-01-01 / Управлением стандартизации и технических норм в строительстве Госстроя СССР. – Москва: Росстандарт, 2013. – V, 127. – Текст непосредственный.

5. Крамчанинов С.С., Разработка системы автоматизации загородного дома и ведения домашнего хозяйства (умный загородный дом) / С.С. Крамчанинов, Л.В. Черкезова // Журнал молодой исследователь Дона. – 2017. - №3(6). С.40-44.

6. Кавецкая Е.А., Автоматизированная система управления как современная технология управления информационными и инженерными системами здания / Е.А. Кавецкая, Е.В. Толкачева // Журнал актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т.3, №4(14). – С.836-838.

7. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures: Межгосударственный стандарт: издание официальное: принят протоколом Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (МНТКС), от 8 декабря 2011 г. № 39: взамен ГОСТ 30494-96: дата введения 2013-01-01 / ОАО "СантехНИИ-проект", ОАО "ЦНИИПромзданий". – Москва: Стандартинформ, 2019. – Текст непосредственный.

8. Парсункин, Б.Н. Системы автоматизации и управления: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г.И. Носова. - Магнитогорск: Изд - во Магнитогорск. гос. техн. ун - та,

2015. - 326с. - ISBN 978-5-9967-0639-7. – Текст: непосредственный.

9. Парсункин, Б.Н. Локальные контуры системы автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Т.У. Ахметов; под ред. Б.Н. Парсункина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 406 с.

10. Парсункин, Б.Н. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, М.В. Бушманова, С.В. Булычева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2007. 315 с.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF MICROCLIMATE PARAMETERS OF THE PRIVATE HOUSE

O.L. Yudina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. In a country house located in the village of Kasselsky, Chelyabinsk region, there is no warm floor, the air temperature is controlled manually using the remote control of the gas boiler or opening the vents. Based on these factors, it became necessary to create a microclimate control system that would regulate the air temperature with a minimum cost of resources. The need to control the heating system arose due to the frequent absence of residents of the house, the operation of the heating system at idle, the impossibility of remote control of parameters. The purpose of the work is to develop a control system for stabilizing the temperature of living quarters. The principle of the system: when the heat energy in the house runs out, i.e. it becomes cold in the house, the regulators send signals to the servos, the servos, in turn, open the valves, supplying the coolant to the radiators, heating the rooms. If the temperature does not rise or does not rise quickly, and the regulators have fully opened the valves, then the PLC needs to increase the return water temperature setpoint. Similarly, it happens in the opposite direction of the process. In the course of the work, a mathematical model of an automated micro-climate control system in a private house was developed. The coefficients of the effect of neighboring rooms through internal partitions, as well as the effect of ambient temperature through external partitions, have been calculated. A block diagram was also developed for this system.

Keywords: home microclimate, microclimate control, private house, energy saving, energy resources, heating, temperature.

REFERENCES

1. Abdraxmanov V.X., Vazhdaev K.V., Salixov R.B. Information-measuring system for remote control of microclimate parameters [Informacionno-izmeritel'naya sistema distantsionnogo kontrolya para-metrom mikroklimate], Zhurnal e'lektrotexnicheskie i informa-cionny'e komplekсы` system, [Journal of electrical and information systems systems]. – 2016. – T.12, №3. S.91-99. - ISSN: 1999-5458.

2. Kolodkina A.S., Mar'yasin O.Yu., Ogarkov A.A. Optimal management of energy consumption and micro-climate of large multi-zone buildings [Optimal'noe upravlenie e'nergopotrebleniem i mikroklimate bol'shix mnogozonny'x zdaniy], Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov, [Management of large systems: a collection of works]. – 2018. - №75. C.146-169. - SSN: 1819-2440.

3. Technical characteristics of gas boiler Navien Ace [exnicheskie xarakteristiki gazovogo kotla Navien Ace]. Available at: <https://expert-dacha.pro/otoplenie/kotlyot/gazovye-k/proizvoditeli-gaz-k/g-k-navien/ace.html>.

4. SNiP 2.04.05. The set of rules for heating, ventilation and air conditioning: by the decree of the USSR State Committee for Construction and Investments of November 28, 1991 N 137: as amended. Change 3: date of introduction 1992-01-01 / by the Department of Standardization and Technical Norms in Construction of the USSR State Construction Committee. - Moscow: Rosstandart, 2013. - V, 127. - Direct text.

5. Kramchaninov S.S., Cherkesova L.V. Development of an automation system for a country house and housekeeping (smart country house) [Razrabotka sistemy` avtomatizacii zagorodnogo doma i vedeniya domashnego khozyajstva (umny`j zagorodny`j dom)], Zhurnal molodoj issledovatel` Dona [Don's Young Explorer Magazine] – 2017. - №3(6). C.40-44.

6. Kavecckaya E.A., Tolkacheva E.V. Automated control system as a modern technology for managing information and engineering systems of a building [Avtomatizirovannaya sistema upravleniya kak sovremennaya texnologiya upravleniya in-formacionny`mi i inzhenerny`mi sistemami zdaniya], Zhurnal aktual'ny'e problemy` aviatsii i kosmonavtiki [Journal

of Actual Problems of Aviation and Cosmonautics.] – 2018. – T.3, №4(14). – С.836-838.

7. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures: Interstate standard: official edition: adopted by the protocol of the Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, Technical Regulation and Conformity Assessment in Construction (MNTKS), dated December 8, 2011 No. 39: instead of GOST 30494-96: date of introduction 2013-01-01 / JSC "San-techNIiproekt", JSC "TsNIIPromzdaniy". - Moscow: Standartinform, 2019. - Direct text.

8. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Automation and control systems: textbook. Allowance [Sistemy` avtomatizacii i upravleniya: ucheb. posobie] Magnitogorsk state technical un-

t them. G.I. Nosov. - Magnitogorsk: Publishing house - in Magnitogorsk. state tech. un - that, 2015. - 326s. - ISBN 978-5-9967-0639-7. - Text: direct.

9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ahmetov U.G. Lokalnye stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva [Local stabilizing circuits of automatic control in automatic control systems of industrial production processes]. Magnitogorsk, NMSTU, 2012. 406 p.

10. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bushmanova M.V. Statistical research and modeling of economic and technological processes of metallurgical production. Magnitogorsk, NMSTU, 2007. 315 p.

Юдина, О.Л. Автоматизированная система управления параметрами микроклимата частного дома /О.Л. Юдина // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №1(23). С.21-28.

O.L. Yudina Automated control system of microclimate parameters of the private house. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2021, no.1(23), pp.21-28. (In Russian).