

### Литература

1. Тулякова Т.В., Мордвинова Е.М., Сергеева А.В., Пасхин А.В. Способ переработки спиртовой барды в кормовой продукт. Патент РФ 2384203
2. Бирюков В.В. Основы промышленной биотехнологии. - М.: КолосС, 2004 - 296 с.
3. Зубов Д.В., Толченев А.А. Экспресс-методика контроля активности ферментного комплекса // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 1. № 2с. с. 389-392.
4. Зубов Д.В., Парамонов Е.А. Применение компьютерной обработки изображения для повышения точности анализа методом тонкослойной хроматографии // Инженерная физика. – 2008 №4 –с.53-58

### **Автоматизация стендового комплекса для изучения фототрофов и анализ возможностей повышения энергоэффективности процесса**

к.т.н. доц. Зубов Д.В., Строков С.С.  
Университет машиностроения  
zubov@msuie.ru

*Аннотация.* Рассмотрено создание системы автоматизации стендового комплекса для изучения фототрофов. Проведён анализ возможностей снижения энергозатрат.

*Ключевые слова:* автоматизация биотехнологических установок, энергобережение, фотозависимые микроорганизмы.

В традиционных процессах культивирования аэробных микроорганизмов основные энергозатраты приходятся на:

- перемешивание культуральной среды (для обеспечения массообмена с подаваемым на аэрацию воздухом, при этом среда может обладать значительной вязкостью);
- стерилизацию (как правило – термическую) аппаратов, питательных сред и подпиток;
- компримирование аэрирующего воздуха (расход аэрирующего воздуха примерно равен 1 объёму воздуха на 1 объём культуральной среды в минуту, при стерильном проведении процесса его приходится сжимать до 1,5–2,2 атм, которые теряются при прохождении стерилизующих фильтров и культуральной среды);
- стабилизацию температуры культуральной среды (как правило, путём подачи охлаждающей воды в рубашку аппарата).

При проведении фотозависимых процессов появляются дополнительные энергозатраты на освещение культуральной среды, которые можно существенно снизить, выбрав оптимальный режим освещения.

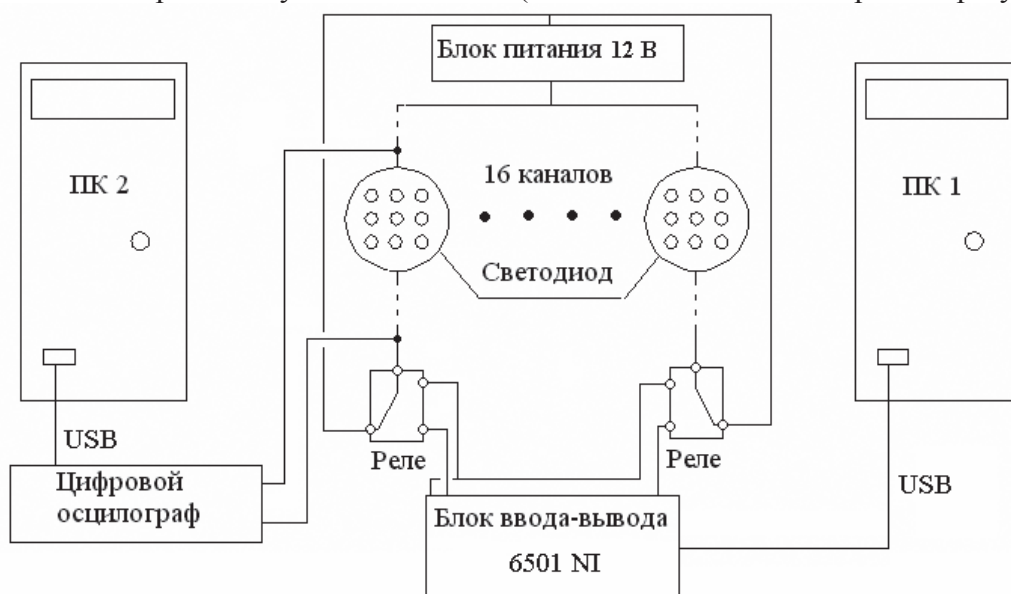
Изменение уровня освещённости среды течения процесса может быть целесообразным при периодическом культивировании фототрофных микроорганизмов – микроводорослей: при увеличении концентрации микроводорослей повышается оптическая плотность среды и на одну клетку микроводорослей в среднем приходится меньше световой энергии, необходимой для фотосинтеза органических веществ из углекислого газа. Соответственно, имеет смысл увеличивать освещённость в ходе процесса. Аналогичные соображения применимы для фотозависимых микроорганизмов (биосинтез в которых зависит от уровня освещённости), например дрожжей *Phaffia rhodozyma* [1]. При выборе режима освещения нужно учитывать, что высокий уровень освещённости может угнетать микроорганизмы и разрушать накопленные в культуральной среде продукты биосинтеза.

Другим способом снижения затрат на освещение является применение импульсных режимов [2]. Известно, что в процессе фотобиосинтеза можно выделить несколько стадий –

протекающие только при облучении светом и способные протекать в темноте. Длительность стадий может составлять порядка долей секунды. Понятно, что с помощью традиционных средств освещения (люминесцентные источники света, лампы накаливания) крайне трудно или вообще невозможно организовать подобный закон освещения. С появлением сверхъярких светодиодов, обладающих недостижимыми ранее параметрами светоотдачи и динамическими характеристиками, стало возможным кардинально решить проблемы с теплоотводом, управлять изменением освещённости и спектрального состава светового потока. Развитие светодиодных систем освещения, стремительное уменьшение их стоимости и повышение надёжности, открывает новые перспективы в использовании в промышленности фотозависимых микроорганизмов.

Для исследования открывающихся новых возможностей создан лабораторный стенд, состоящий из лабораторного фотобиореактора и установки для изучения влияния импульсного освещения на фототрофные микроорганизмы (на колбах и чашках Петри). Стенд позволяет осуществлять подбор оптимальных технологических режимов, изучать биохимические процессы фотозависимых микроорганизмов, обучать студентов соответствующих специальностей. На установке для изучения влияния импульсного освещения можно одновременно исследовать несколько режимов освещения, на лабораторном фотобиореакторе можно исследовать влияние остальных режимов проведения процесса.

Установка, схема которой изображена на рисунке 1, вмещает 32 колбы (или чашки Петри) с культурой фототрофов, разделённых светонепроницаемыми перегородками и подсвечиваемых снизу. В качестве источников света используются светодиодные лампы с рефлектором. Каждая лампа содержит 12 светоизлучающих диодов белого цвета типа RL – 3W744 (световой поток до 5 лм, потребляемая мощность – 0,05 Вт). В установке используются компьютер (для генерации формы импульсов), от которого поступают управляющие сигналы по интерфейсу USB на блок дискретного ввода-вывода 6501 NI, выходы которого соединены с твердотельными реле PVA1352, замыкающими/размыкающими линию подачи 12 VDC от батареи блоков питания (1 блок обслуживает 4 реле к которым подключено 8 светодиодных ламп). Вся конструкция помещена в термостатированную комнату, изолированную от постороннего освещения. В установке реализовано 16 независимых каналов освещения, каждый из которых обслуживает 2 колбы (для повышения достоверности результатов).

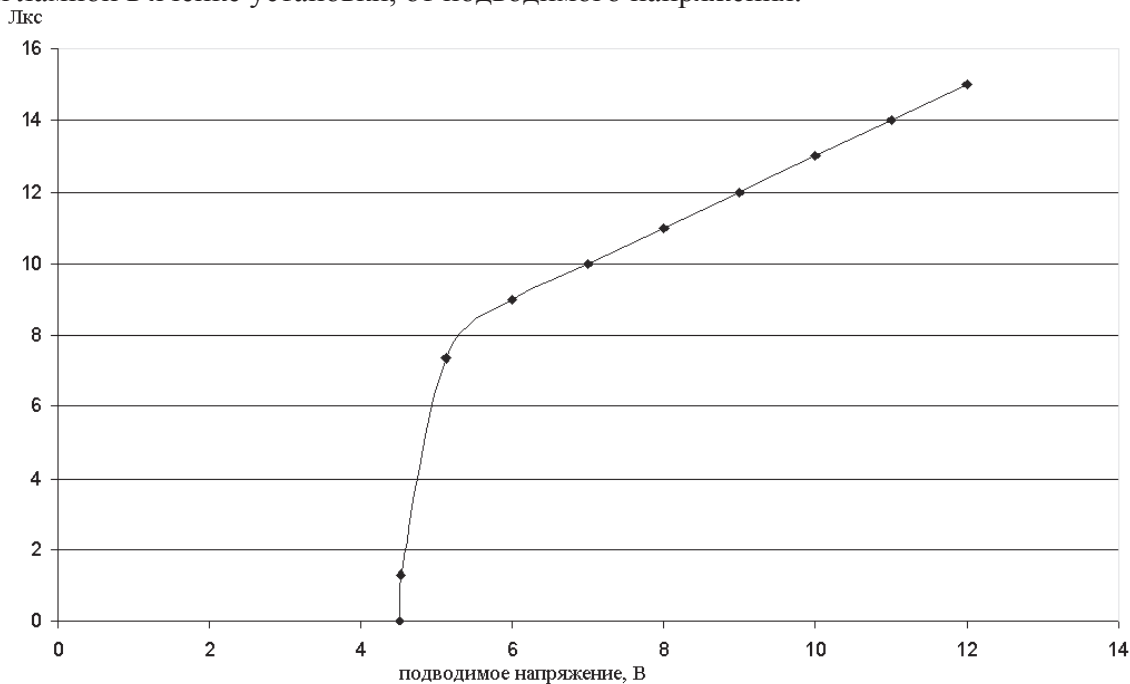


**Рисунок 1. Схема установки изучения для изучения влияния импульсного освещения**

Как показал эксперимент [3], установка обеспечивает импульсы длительностью 10 мс и длиннее с точностью до 2 мс. Для управления экспериментальной установкой с помо-

щью среды разработки LabVIEW 8.5 создана программа, рассчитанная на 16 дискретных выходов (с возможностью расширения до 24 выходов), в которой реализован заданный алгоритм освещения, включающий «быструю» и «медленную» фазу. Быстрая фаза освещения – вспышки длительностью 0,01..0,1 сек с интервалом 0,5-2 с; медленная фаза освещения – 0,25 до 2 секунд с интервалом от 3 до 10 секунд.

Возможности установки можно расширить, если начать управлять потоком света от светодиодов. Для этого была исследована зависимость освещённости, создаваемой светодиодной лампой в ячейке установки, от подводимого напряжения.



**Рисунок 2. Зависимость освещённости объекта от подводимого к светодиодной лампе напряжения**

Как видно из приведённых на рисунке 2 результатов, в диапазоне 6 – 12 В наблюдается практически линейное возрастание освещённости с 9 до 15 Лкс. Диапазон 4,5 – 6 В характеризуется сильной нелинейностью и для его использования требуется дополнительное исследование стабильности характеристики светодиодов во времени и разброс параметров характеристики для различных светодиодов.

Представленные на рынке доступные блоки аналогового вывода имеют диапазоны 0 – 1 В, 0 – 5 В, 0 – 10 В и не могут быть полезны в рассматриваемой установке (разумеется они могут быть применены для управления светодиодами номинального напряжения 5 В).

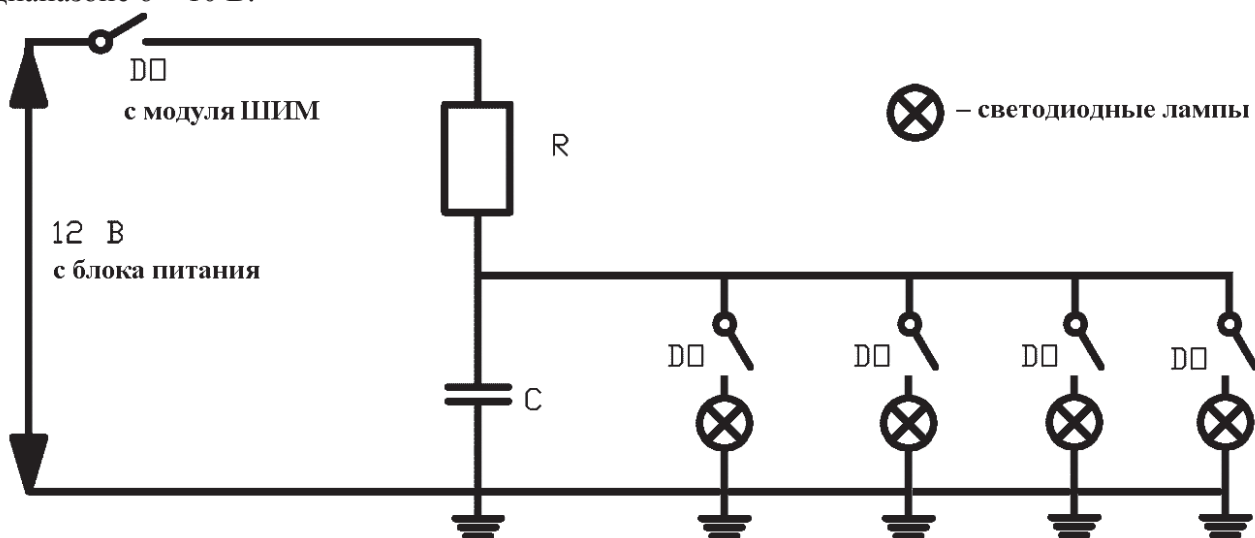
Для создания источника питающего напряжения 6 – 12 В можно воспользоваться имеющимся в наличии источником питания 12 В, блоком дискретного вывода с ШИМ-режимом работы и сглаживающей выходное напряжение RC-цепочкой, см. рисунок 3.

Поскольку длительность процесса культивирования составляет несколько суток, то для упрощения программы управления можно ограничиться ступенчатым изменением подаваемого на светодиоды напряжения по временному закону.

Модули дискретного вывода целесообразно использовать на базе ПЛК, настраиваемого с ПЭВМ с по интерфейсу Ethernet.

Для калибровки системы управления напряжением следует при включённых в режим мерцания дискретных выходов ДО варьировать скважность (0 – 100%) работающего в режиме ШИМ дискретного вывода, контролируя подаваемое на работающие светодиодные лампы напряжение. Составив таблицу соответствия «скважность – напряжение» для каждой линии, её следует использовать для программирования управляющего дискретными выходами кон-

троллера. При необходимости более точного управления освещённостью можно оснастить контроллер блоком аналогового входа 0 – 10 В. Введя в контроллер 4 контура регулирования по каналам «скважность – напряжение» по ПИ-закону можно добиться точного управления в диапазоне 6 – 10 В.



**Рисунок 3. Модифицированная схема генерации световых импульсов**

Другой составной частью стенда является фотобиореактор. Лабораторный фотобиореактор объёмом 3 л оснащён мешалкой с регулируемым числом оборотов, системами подачи охлаждающей воды, титрующего агента (раствор NaOH), воздуха. Существует возможность управления освещённостью (используется лампа накаливания, подаваемое напряжение на которую варьируется с помощью лабораторного автотрансформатора). Температура культуральной среды стабилизируется подачей охлаждающей воды по релейному закону с гистерезисом (в качестве датчика температуры используется первичный преобразователь TCM50, в качестве регулятора – измеритель-регулятор TPM202).

На созданном стенде исследовался процесс синтеза астаксантина клетками дрожжей *Phaffia*. В ходе процесса культивирования дрожжи размножаются и выделяют в культуральную среду продукты биосинтеза, которые окрашивают среду в красный цвет, при этом оптическая плотность среды увеличивается. Измеряя её, можно судить о протекании процесса. Для контроля оптической плотности были опробованы фотоэлементы площадью 3 см<sup>2</sup> и 25 см<sup>2</sup>, выход (фото Э.Д.С.) с которых подаётся на измеритель TPM-200, настроенный на вход 0..1 В и -50..50 мВ. Эксперимент показал, что фотоэлемент 3 см<sup>2</sup> не информативен, т.к. в начале процесса (при почти прозрачной среде) выдаёт Э.Д.С. порядка 80 мВ (слишком большое для диапазона -50..50 мВ), в середине и конце процесса около 1 мВ (что сравнимо с погрешностью измерения – 0,5 мВ). Был выбран фотоэлемент площадью 25 см<sup>2</sup> и диапазон 0..1 В, что позволило контролировать практически весь ход процесса с минимальной погрешностью. С помощью люксметра была построена статическая характеристика фотопреобразователей по каналу (освещённость, Лкс – фото Э.Д.С., мВ), которая оказалась близкой к линейному закону. Информация с TPM200 по протоколу RS-485 подаётся на преобразователь AC-4, и по каналу USB подаётся в компьютер с установленной SCADA системой Owen Process Manager, которая осуществляет индикацию, представление трендов и архивацию показаний. Разработанная технология может быть дешёвой альтернативой использования выносных камер для определения оптической плотности.

На рисунке 4 представлена схема управления освещённостью в лабораторном фотобиореакторе. Некоторым недостатком её является то, что на оптическую плотность влияют концентрации как клеток микроорганизма, так и продуктов биосинтеза. В случае с ярко окраш-

шенным продуктом, как например выделяемым дрожжами *Phaffia rhodozyma* (они же – *Xanthophyllomyces dendrorhous*) каротиноидом астаксантином, который характеризуется насыщенным красным цветом, – целесообразно дополнить схему ещё одним фотоэлементом, снабжённым цветным светофильтром, пропускающим только свет с частотой, соответствующей продукту. В результате представляется возможным оценивать как концентрацию продукта, так и клеток продуцента в режиме on-line. Разумеется, погрешность такого измерения существенно выше, чем у лабораторного анализа, но с учётом его корректировок может быть полезным инструментом.

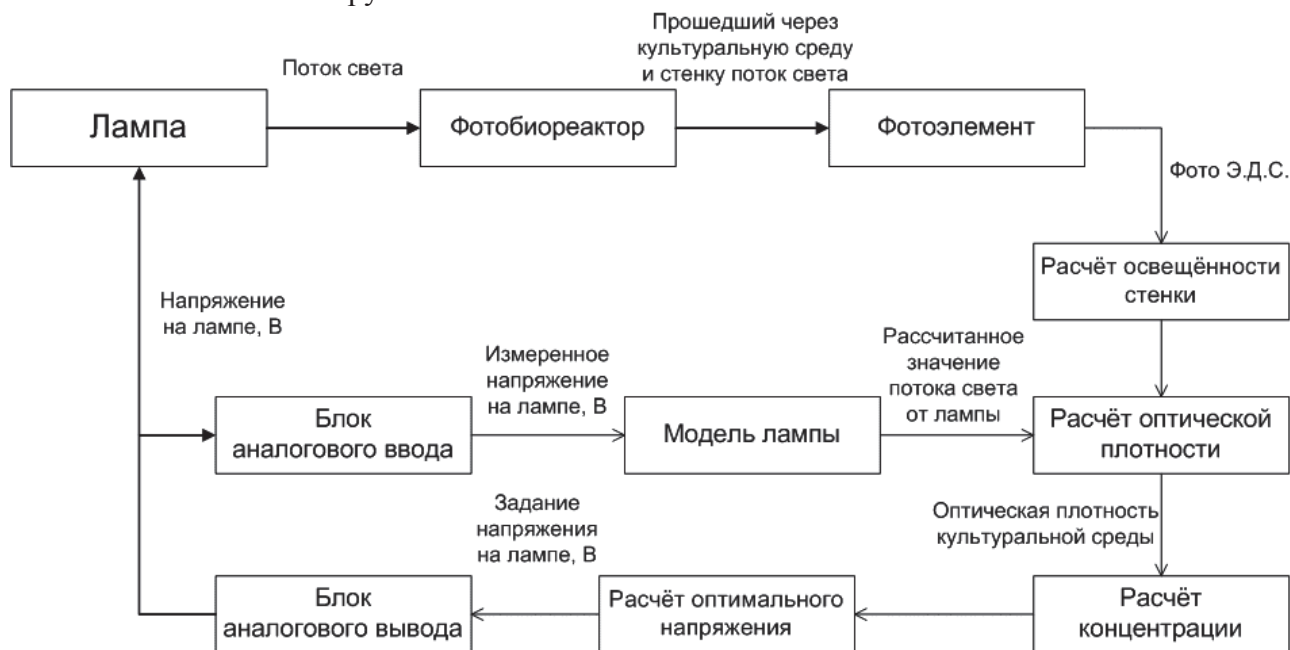


Рисунок 4. Схема управления освещённостью в лабораторном фотобиореакторе

*Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ, проект № 7.6102.2011 по теме: «Разработка систем энергоэффективного управления процессами биосинтеза».*

#### Литература

1. Захаров З.В., Герман Л.С., Петрищева О.А., Жарко М.Ю. Культивирование дрожжей *Phaffia Rhodozyma* при постоянном и периодическом освещении // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 4. № 2.
2. Мальцевская Н.В., Бирюков В.В. Влияние прерывистого освещения на процесс роста фототрофного микроорганизма *Chlorella Sp.* // Биотехнология, 2011. № 1. с. 47.
3. Зубов Д.В., Строков С.С., Ефремов Д.А. Автоматизация лабораторного стенда для исследования процессов культивирования фотозависимых микроорганизмов // Труды XIX Всероссийской научно-методической конференции Телематика'2012, т. 1, с.68-69

#### **Моделирование системы управления с регулятором дробного порядка и исследование её устойчивости**

к.т.н. доц. Зубов Д.В., аспирант Студеникин Г.И.  
 Университет машиностроения  
 zubov@msuie.ru

*Аннотация.* Рассмотрена возможность создания систем управления с регуляторами дробного порядка, их преимущества и возникающие при реализации слож-

ности.

*Ключевые слова:* дифференциал Римана — Ливилля, устойчивость систем автоматизации.

Задачами исследования являются:

- составление передаточной функции регулятора дробного порядка, анализ переходного процесса замкнутой системы;
- анализ устойчивости системы при помощи метода расширенных частотных характеристик;
- вычисление оптимальных настроек регулятора методом незатухающих колебаний.

Одной из актуальных проблем математического моделирования является проблема обеспечения адекватности математических моделей исследуемым объектам. Динамические системы, как объект моделирования, традиционно изучались путем использования классического математического анализа, в частности аппарата интегро-дифференциальных уравнений в обыкновенных и частных производных. Классический анализ предполагает, что интегралы и производные имеют порядки, выражаемые целыми числами.

Между тем, поведение целого ряда объектов и процессов не соответствует в полной мере используемым математическим моделям, необходимо разрабатывать и использовать уточненные модели, в том числе с использованием производной и интеграла нецелых порядков (нецелые порядки могут быть дробными, иррациональными и комплексными числами). Хотя история возникновения и развития дробного исчисления насчитывает уже более трех столетий, прикладное применение усложнялось сложностью вычислений, но при появлении компьютерных программ для математических расчетов данная проблема отпадает.

Важное место в общей теории обработки сигналов, моделировании и автоматическом управлении занимают операционные методы анализа. Преобразование Лапласа является одним из наиболее распространенных операционных методов, который позволяет анализировать динамические системы в переходном режиме. В рамках этого преобразования рассматриваются два пространства: пространство оригиналов (сигнальное пространство) и пространство изображений сигналов (изображение по Лапласу). Математической моделью переходного процесса динамической системы в первом пространстве являются интегро-дифференциальные уравнения. Во втором (преобразованном) пространстве математической моделью переходного процесса являются алгебраические уравнения.

Применения дробного исчисления в автоматическом управлении можно подразделить на две группы. Первую образуют методы математического и компьютерного моделирования систем дробного порядка, в которых проявляются свойства дробной динамики. Ко второй относятся методы использования дробного исчисления для синтеза систем управления динамическими системами как целого, так и дробного порядков, в частности, синтеза контроллеров нецелого порядка.

Математическая модель линейной динамической системы с постоянными параметрами дробного порядка в случае единственной переменной имеет вид:

$$\begin{aligned} a_n D^{\alpha_n} y(t) + a_{n-1} D^{\alpha_{n-1}} y(t) + \dots + a_0 D^{\alpha_0} y(t) = \\ = b_m D^{\beta_m} x(t) + b_{m-1} D^{\beta_{m-1}} x(t) + \dots + b_0 D^{\beta_0} x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $a_i$ ,  $b_j$  – коэффициенты уравнения,  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  – дробные порядки дифференциальных операторов,  $y(t)$  – функция выхода динамической системы (функция состояния),  $x(t)$  – функция входа динамической системы (функция управления). В случае нулевых начальных условий передаточная характеристика динамической системы в области преобразования по Лапласу принимает вид:

$$W(p) = \frac{b_m p^{\beta_m} + b_{m-1} p^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0 p^{\beta_0}}{a_n p^{\alpha_n} + a_{n-1} p^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0 p^{\alpha_0}} \quad (2)$$

Для вычисления производных и интегралов дробных порядков в системах управления широко используются различные аппроксимационные зависимости, базирующиеся на классической теории дробномерных дифференциальных операторов, построенных на основании частотных методов теории автоматического управления и представляющих собой приближенную динамическую модель звена с дробномерным дифференциальным оператором. Такой подход является приближенным и не имеет строгого математического обоснования. Поэтому для вычисления производных и интегралов дробных порядков чаще используется формула Грюнвальда-Летникова [1], в соответствии с которой дробная производная  $p^\alpha \eta_1(t)$  определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} p^\alpha \eta_1(t) &= \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T^\alpha} \sum_{i=0}^{N-1} s_i = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T^\alpha} \sum_{i=0}^{N-1} D(\alpha, i) \eta_1(t - iT) = \\ &= \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T^\alpha} \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^i \frac{\Gamma(\alpha + 1)}{\Gamma(i + 1) \Gamma(\alpha - i + 1)} \eta_1(t - iT) \end{aligned}$$

Также может использоваться дифференциал Римана — Лиувилля:

$$I^\alpha(f(x)) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^x f(t)(x-t)^{\alpha-1} dt.$$

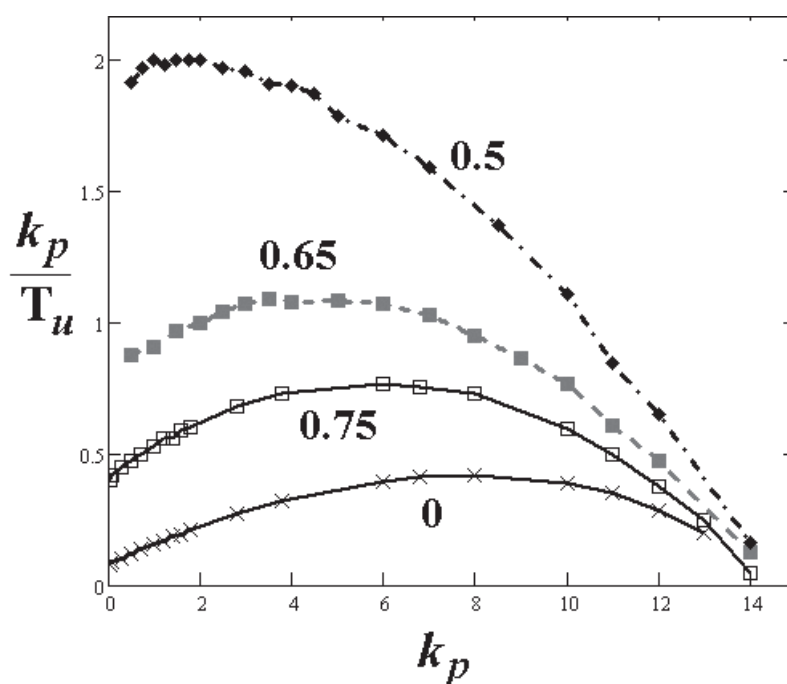


Рисунок 1. Кривые равной колебательности

В качестве объекта исследования было взято аperiodическое звено первого порядка с запаздыванием, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_o(p) = \frac{k_0 \cdot e^{-\tau p}}{T \cdot p + 1},$$

с параметрами объекта равными:  $k_0 = 1.35$ ,  $\tau = 15$ ,  $T = 180$ .