

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 681.515.5

Шелег  
Евгений Александрович

**Система управления электроприводом с дифференциальными  
модальными регуляторами**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-53 80 01 «Автоматизация и управление технологи-  
ческими процессами и производствами»

---

Научный руководитель  
Хаджинов Михаил Касьянович  
кандидат технических наук, доцент

---

Минск 2017

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** Высококачественные Сервоприводы имеют, как правило, структуру подчинённого регулирования, с тремя контурами регулирования : положения, скорости и тока. Все понимают, что традиционная методика настройки регуляторов даёт не самый оптимальный вариант регулирования, но реальных попыток использовать модальные методы регулирования не предпринималось.

Есть только попытка настроить все регуляторы традиционного сервопривода на любой желаемый полином и тем самым осуществить модальное управление традиционными регуляторами. Развитие этого направления путём использования наблюдателя полной модели с встроенным модальным регулятором, будет давать громоздкое решение. Совершенствование теории модального управления в направлении создания модальных регуляторов для управления по производной позволяет высокоэффективно управлять по упрощенной модели и сделать более практичный модальный регулятор для сервопривода, базирующегося на единственном датчике - энкодере.

Суть данной инновации заключается в том, что мы вводим в состав регулирующего аппарата дополнительные дифференциальные вход контура оценивания и выход контура управления.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными исследованиями университета.** Диссертационная работа выполнена на кафедре систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках научно-исследовательских работ: "Дифференциальные модальные регуляторы системы управления сервоприводом".

**Цель и задачи исследования.** Основной целью диссертации является разработка нового метода управления, базирующегося на модальном методе управления системой. Основной задачей исследования является разработка метода по улучшению показателей быстродействия системы и ее стабилизация

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработать метод формирования дифференциального входа контура оценивания;
- 2) Разработать метод формирования дифференциального выхода контура управления;
- 3) применить полученные результаты исследования к конкретной системе

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработан новый тип модального регулятора (дифференциальный модальный регулятор) обладающий свойством идеального дифференцирования относительно уже имеющегося модального регулятора. Дифференциальный модальный регулятор строится на базе обычного модального регулятора и модели объекта управления и используется совместно с первым в виде пропорционально-дифференциального модального регулятора. Дифференциальный модальный регулятор, так же как обычный модальный регулятор, легко встраивается в модель объекта управления, но имеет более сложную структуру. Дифференциальный модальный регулятор контура оценивания  $dL$  создается дополнительными столбцами в матрицах  $B$  и  $D$  модели объекта, а дифференциальный модальный регулятор контура управления  $dK$  создается дополнительными строками в матрицах  $C$  и  $D$ .

2. Дополнительный дифференциальный модальный регулятор в контуре оценивания позволяет компенсировать различие объекта и его модели в наблюдателе, упрощенной отбрасыванием малых постоянных времени. Постоянная времени дифференциальной составляющей рассчитывается как сумма отброшенных постоянных времени.

3. В контуре управления дифференциальный модальный регулятор может компенсировать инерционность процесса дискретизации. Т.е. получить дискретные процессы в системе управления мало отличимые от непрерывных процессов по длительности и качеству.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 52-ой научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов.

**Опубликованность результатов.** По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы, включая 4 статьи в материалах конференций и 2 тезисов докладов научных конференций. Суммарный объем публикаций составляет около 8 печатных страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Она содержит 64 страниц основного текста, 40 рисунков на 25 страницах, 1 таблицу на 1 странице, 2 приложения на 12 странице, в списке использованных источников на 2 страницах представлено 20 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Рассмотрим, как формируются дифференциальный вход и выход. Формируем дополнительный вход  $L$  за интегратором. Сигнал этого входа является дифференциальным по отношению к сигналу входа модели  $L$  в этой же точке, так как не интегрирован. Но за интегратором сформировать вход нельзя, поэтому переносим этот вход через матрицы  $A^*$ ,  $K$  и  $C$  на вход модели. В результате получаем дополнительный дифференциальный вход модели  $dL$ , который отражается в матрице  $B$  дополнительным столбцом ( $dL = A \cdot L$ ), а переход через матрицы  $K$  и  $C$  отражается в матрице  $D$  так же дополнительным столбцом  $\begin{bmatrix} C \cdot L \\ K \cdot L \end{bmatrix}$ .

В результате преобразований получаем эквивалент регулятора по производной, т.е. дифференциальный модальный регулятор контура оценивания.

Матричное описание разомкнутой модели (3 входа, 2 выхода):

$$\begin{aligned} A^* &= A; & B^* &= [B \quad L \quad dL], \quad (dL = A \cdot L); \\ C^* &= \begin{bmatrix} C \\ K \end{bmatrix}; & D^* &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & C \cdot L \\ 0 & 0 & K \cdot L \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Проанализировав полученные с помощью пакета MATLAB передаточные функции по входам  $L$  и  $dL$ , видно, что они отличаются только множителем  $s$ , что как раз и свидетельствует о том, что вход  $dL$  является дифференциальным по отношению ко входу  $L$ . В общем виде передаточные функции по входам  $L$  и  $dL$  представлены ниже:

$$W_L = \frac{ch}{zn}; \quad W_{dL} = \frac{s \cdot ch}{zn}. \quad (2.7)$$

Далее сформируем дополнительный выход  $K$  до интегратора. Сигнал этого выхода является дифференциальным по отношению к сигналу выхода модели  $K$ , так как не интегрирован. Но перед интегратором сформировать выход нельзя, поэтому переносим этот выход через матрицы  $B$ ,  $L$ ,  $dL$  и  $A^*$  на выход модели. В результате получаем дополнительный дифференциальный выход модели  $dK$ , который отражается в матрице  $C$  дополнительной строкой

( $dK = K \cdot A$ ), а переход через матрицы  $B, L, dL$  отражается в матрице  $D$  так же дополнительной строкой  $[K \cdot B \quad K \cdot L \quad K \cdot A \cdot L]$ .

Таким образом получаем дифференциальный модальный регулятор контура управления.

Матричное описание разомкнутой модели (3 входа, 3 выхода):

$$A^* = A; \quad B^* = [B \quad L \quad dL], \quad (dL = A \cdot L);$$

$$C^* = \begin{bmatrix} C \\ K \\ K \cdot A \end{bmatrix}, \quad (dK = K \cdot A); \quad D^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C \cdot L \\ 0 & 0 & K \cdot L \\ K \cdot B & K \cdot L & K \cdot A \cdot L \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Проанализировав полученные с помощью пакета MATLAB передаточные функции по выходам  $K$  и  $dK$ , видно, что они отличаются только множителем  $s$ , что как раз и свидетельствует о том, что выход  $dK$  является дифференциальным по отношению к входу  $K$ . В общем виде передаточные функции по выходам  $K$  и  $dK$  представлены ниже:

$$W_K = \frac{ch}{zn}; \quad W_{dK} = \frac{s \cdot ch}{zn}. \quad (2.22)$$

где  $T_\Sigma = \sum T_i$  – сумам неучтенных постоянных времени;

$T_2$  – инерционность ПД-регулятора.

Структурная схема системы с дополнительным дифференциальным выходом  $dK$  и входом  $dL$  изображена на рисунке 1.

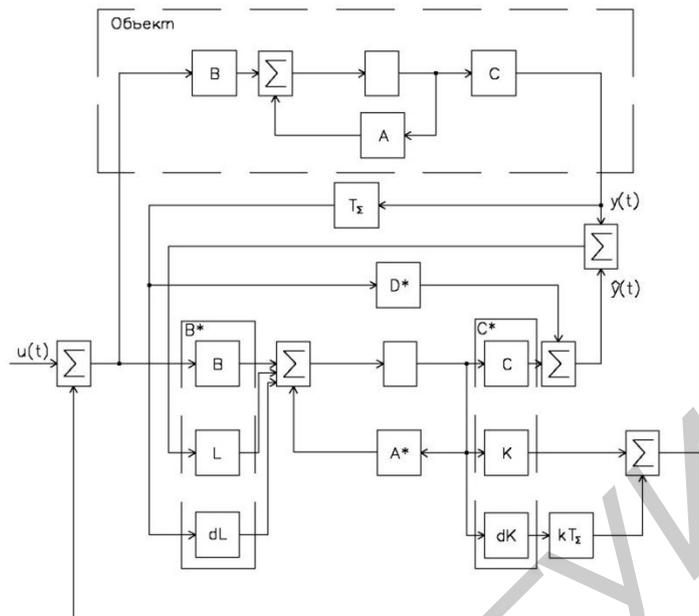


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления с дополнительным дифференциальным входом контура оценивания и дополнительным дифференциальным выходом контура управления

Из полученных данных можно сделать вывод, что разработан новый тип модального регулятора (дифференциальный модальный регулятор) обладающий свойством идеального дифференцирования относительно уже имеющегося модального регулятора. Дифференциальный модальный регулятор строится на базе обычного модального регулятора и модели объекта управления и используется совместно с первым в виде пропорционально-дифференциального модального регулятора. Дифференциальный модальный регулятор, так же как обычный модальный регулятор, легко встраивается в модель объекта управления, но имеет более сложную структуру. Дифференциальный модальный регулятор контура оценивания  $dL$  создается дополнительными столбцами в матрицах  $B$  и  $D$  модели объекта, а дифференциальный модальный регулятор контура управления  $dK$  создается дополнительными строками в матрицах  $C$  и  $D$ .

Для того, чтобы рассмотреть, как влияет дифференциальный модальный регулятор на построение модели в микропроцессорной среде, зададимся передаточной функцией статического объекта. Допустим, она имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{9}{s^3 + 1.91s^2 + 2.3s + 1} \cdot \frac{1}{(0.12s + 1)} \cdot \frac{1}{(0.07s + 1)} = \frac{1038.42}{(s + 13.87)(s + 8.32)(s + 0.68)(s^2 + 1.23s + 1.46)}$$

Для удобства изложения материала и дальнейшего описания метода и процесса моделирования представим передаточную функцию объекта в виде нескольких сомножителей. Первый множитель в дальнейшем будем рассматривать как упрощенную передаточную функцию объекта, на основании которой будет строиться упрощенная модель объекта. Остальные множители соответствуют малым постоянным времени объекта, находящимся за частотой среза, которыми мы пренебрегаем при создании модели объекта.

Таким образом, имея объект 5-го порядка, мы строим модель 3-го порядка. Это означает, что дифференциальный модальный регулятор в контуре оценивания позволяет ограничить модель электропривода в наблюдателе третьим порядком, т.е. упростить и ускорить процессы вычисления микроконтроллерной системы управления.

Далее, для компенсации несоответствия модели объекту, т.е. учета пренебрегаемых при создании модели постоянных времени объекта  $T_i$ , в цепи обратной связи объекта можно поставить ПД-регулятор, с помощью которого будут компенсироваться (а точнее их влияние будет снижаться) неучтенные постоянные времени.

Передаточная функция ПД-регулятора:

$$\frac{K_{pd}(T_{\Sigma}s + 1)}{(T_2s + 1)}, \quad (2.5)$$

Как видно, передаточная функция ПД-регулятора помимо числителя имеет еще и знаменатель, который вносит дополнительную инерционность  $(T_2s + 1)$ . Поэтому реализуем ПД-регулятор на базе модели, не внося дополнительной инерционности. Это осуществляется посредством введения в модель дополнительного дифференциального по отношению ко входу  $L$  входа  $dL$  [3,4].

Значит, дополнительный дифференциальный модальный регулятор в контуре оценивания позволяет компенсировать различие объекта и его модели в наблюдателе, упрощенной отбрасыванием малых постоянных времени. Постоянная времени дифференциальной составляющей рассчитывается как сумма отброшенных постоянных времени.

Также в процессе разработке нового метода регулирования было выявлено, что одно из возможных применений дифференциального выхода – это приближение характеристик управления к непрерывным при дискретном исполнении модели. Сигнал дифференциального выхода  $dK$  модели с коэффи-

циентом  $kT_{\Sigma}$  складывается с сигналом отрицательной обратной связи по управлению. Коэффициент  $k$  изменяется прямо пропорционально периоду дискретизации.

Относительно большие периоды дискретизации могут привести к потере системой устойчивости. Из этого можно сделать вывод, что введение в модель дополнительного дифференциального выхода позволяет увеличить максимальный период дискретизации, до которого система сохраняет устойчивость, и приблизить свойства управления объектом к непрерывным.

Это означает, что в контуре управления дифференциальный модальный регулятор может компенсировать инерционность процесса дискретизации, т.е. получить дискретные процессы в системе управления мало отличимые от непрерывных процессов по длительности и качеству.

Рассмотрим 3 варианта подключения дифференциального модального регулятора к нашей системе управления. В первом случае отрицательные обратные связи с выходов  $dK$  и  $K$  одновременно подключены к модели и объекту. Во втором случае обратная связь с выхода  $dK$  подключается только к модели, а с выхода  $K$  – к модели и объекту. В третьем случае обратная связь с выхода  $dK$  подключается только к объекту, а с выхода  $K$  – к модели и объекту.

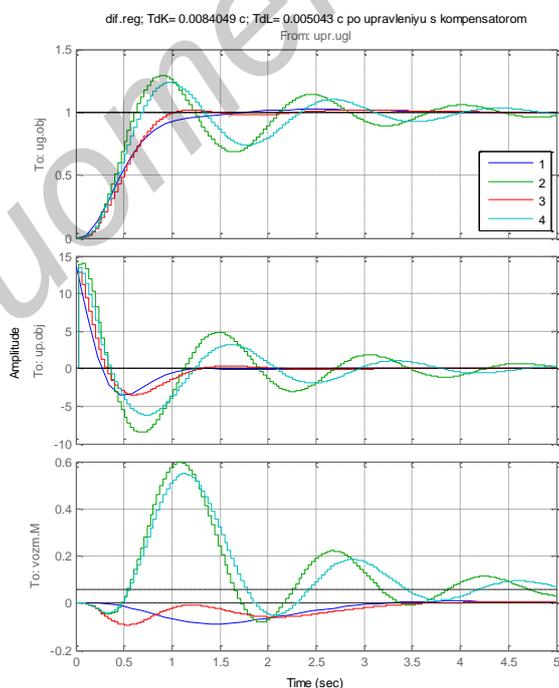


Рисунок 2 – Переходные характеристики системы управления сервоприводом с регулятором при подаче единичного ступенчатого воздействия

Анализируя полученные из графиков данные можно прийти к выводу, что различные подключения дифференциальных модальных регуляторов по-разному стабилизируют систему, при этом, каждый из предложенных вариантов справляется со своей задачей. Проанализируем каждый из методов в отдельности.

Самым оптимальным вариантом, при одинаковых условиях работы и воздействия на систему, является тот, при котором обратная связь с выхода  $dK$  подключается только к модели, а с выхода  $K$  – к модели и объекту. Именно этот метод лучше всего справился с обработкой возмущения в виде единичной ступеньки, сведя колебания к минимуму, а также приблизил переходный процесс к идеальному, тем самым увеличил быстродействие системы.

Это означает, что применение в контуре управления дифференциального модального регулятора позволяет максимально приблизить вид дискретного переходного процесса к непрерывному, соответствующему выбранной эталонной модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе разработки дифференциального модального регулятора была проанализирована литературные источники, связанная с модальным управлением и управлением сервоприводами.

Положения теоретического характера, полученные вследствие проведенного исследования, выносимые на защиту:

1. Разработан новый тип модального регулятора (дифференциальный модальный регулятор) обладающий свойством идеального дифференцирования относительно уже имеющегося модального регулятора. Дифференциальный модальный регулятор строится на базе обычного модального регулятора и модели объекта управления и используется совместно с первым в виде пропорционально-дифференциального модального регулятора. Дифференциальный модальный регулятор, так же как обычный модальный регулятор, легко встраивается в модель объекта управления, но имеет более сложную структуру. Дифференциальный модальный регулятор контура оценивания  $dL$  создается дополнительными столбцами в матрицах  $B$  и  $D$  модели объекта, а дифференциальный модальный регулятор контура управления  $dK$  создается дополнительными строками в матрицах  $C$  и  $D$ .

2. Дополнительный дифференциальный модальный регулятор в контуре оценивания позволяет компенсировать различие объекта и его модели в наблюдателе, упрощенной отбрасыванием малых постоянных времени. Постоянная времени дифференциальной составляющей рассчитывается как сумма отброшенных постоянных времени.

3. В контуре управления дифференциальный модальный регулятор может компенсировать инерционность процесса дискретизации. Т.е. получить дискретные процессы в системе управления мало отличимые от непрерывных процессов по длительности и качеству.

Положения прикладного характера, полученные вследствие проведенного исследования, выносимые на защиту:

1. Разработанные типы дифференциальных модальных регуляторов предлагается использовать в системе управления сервоприводом с единственным датчиком положения (энкодером).

2. Дифференциальный модальный регулятор в контуре оценивания позволяет ограничить модель электропривода в наблюдателе третьим порядком. Т.е. упростить и ускорить процессы вычисления микроконтроллерной системы управления.

3. Применение в контуре управления дифференциального модального регулятора позволяет максимально приблизить вид дискретного переходного процесса к непрерывному, соответствующему выбранной эталонной модели.

4. Введение дифференциальных частей в состав регулирующего аппарата и является инновационным введением в регуляторы данного типа.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Статьи в материалах международных конференций

1. Шелег Е.Е. Применение модального дифференциального регулятора в СУ сервоприводом / Е.Е.Шелег, М.К.Хаджинов // Информационные технологии и системы 2016 (ИТС 2016): материалы международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 26 октября 2016 - С. 86-87.

Библиотека БГУИР