

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В последние годы в мировой практике при решении вопросов создания автоматизированных технологических комплексов в различных отраслях промышленности, а также предоставления услуг по их обслуживанию специалисты оперируют термином инжиниринг, в общем, и электротехнический инжиниринг в частности. Понятие инжиниринг включает в себя выполнение следующих основных этапов: исследование объекта, проектирование, монтаж, наладку, сервисное обслуживание. Инжиниринг электромеханических систем подразумевает возможность двух вариантов проектирования автоматизированных электроприводов – в составе вновь создаваемых машин и механизмов и при реконструкции имеющихся действующих комплексов [1].

Если во втором случае технологические и технические параметры объекта в какой-то степени известны, то для первого случая реальный физический объект отсутствует вовсе, что затрудняет или даже делает невозможным решение многих необходимых вопросов.

Поскольку электроприводы и системы автоматизации являются основой электротехнических систем, то эффективность их использования с учетом адаптации к технологическим режимам работы машин и установок непосредственно влияет на производительность оборудования и качество продукции, а также обеспечивает практическую реализацию энергосберегающих аспектов.

Поэтому, для решения вышеизложенных вопросов одним из составляющих этапов электротехнического инжиниринга является использование компьютерных технологий исследования и оптимизации систем автоматизированных электроприводов производственных машин и механизмов, при этом, наиболее часто применяемым программным средством в настоящее время является среда *MATLAB* [1].

В этой связи, материал данной работы посвящен рассмотрению актуальных вопросов исследования электромеханических систем с точки зрения идентификации и оптимизации их параметров с помощью имитационных компьютерных стендов на базе виртуальных моделей, т.е. для случая отсутствия физической модели или объекта как такового. Данный подход позволяет еще на стадии проектирования сравнить несколько вариантов построения автоматизированного технологического комплекса, выбрать лучший на основании соответствующих критериев оптимальности и, тем самым, избежать возможных просчетов по результатам технической реализации объекта.

Вопросы получения идентифицированной передаточной функции электромеханической системы путем аппроксимации экспериментальной переходной характеристики объекта методом виртуального моделирования освещены в работе [2]. Показан вариант аппроксимации силовой части систем регулируемого электропривода с вентильными преобразователями переходными характеристиками третьего и второго порядка с непрерывными передаточными функциями вида:

$$W_3(p) = \frac{b_0}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3} \quad \text{или} \quad W_2(p) = \frac{K}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}.$$

Приведены соответствующие математические зависимости преобразования непрерывной формы к дискретному виду и обратно, что позволяет определять коэффициенты передаточной функции.

Работа [3] непосредственно посвящена оптимизации электромеханических систем с ПИД-регулятором технологического параметра (скорости) на входе методом компьютерного моделирования в среде *MATLAB*. Идея заключается в нахождении скорректированных значений составляющих ПИД-регулятора относительно найденных предварительно (если математическое описание объекта известно) или заданных произвольно (если описание отсутствует). Корректировка коэффициентов ПИД-регулятора производится с помощью специализированного пакета расширения *Simulink Response Optimization* в соответствие с устанавливаемыми требуемыми показателями качества переходного процесса: длительность, время нарастания, максимальное перерегулирование, максимальное недорегулирование, начальное и желаемое конечное значение выходного сигнала, начальное и конечное время моделирования.

В данной работе сделана попытка реализации комплексного инжинирингового подхода в плане использования при проектировании объектов компьютерных технологий. На основе материалов работ [2, 3] рассмотрен следующий вариант последовательных этапов исследования: получение экспериментальной характеристики электромеханической системы с помощью ее виртуальной модели; нахождение коэффициентов идентифицированной передаточной функции; предварительное определение составляющих ПИД-регулятора; оптимизация параметров ПИД-регулятора с учетом специфики объекта; анализ полученных результатов.

В качестве объекта исследования применена имитационная модель электропривода переменного тока с фазовым управлением по системе тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель (ТРН-АД), которая представлена на рис. 1.

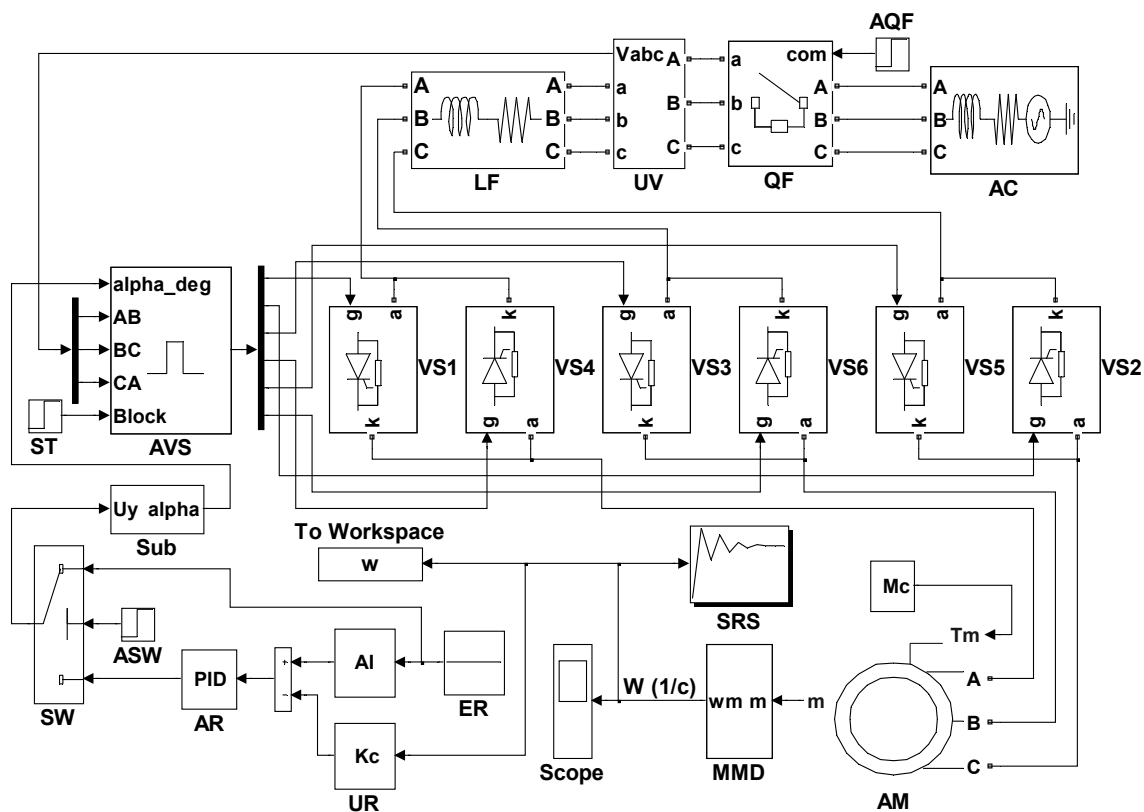


Рис. 1. Модель электропривода переменного тока по системе ТРН-АД.

Для ее синтеза использованы инструментальные средства трех пакетов системы *MATLAB*: основного *Simulink* (управляюще-информационный канал с ПИД-регулятором скорости), а также специализированных *SimPowerSystems* (виртуальные блоки силового канала) и *Simulink Response Optimization* (канал оптимизации настроек ПИД-регулятора). При разработке модели учитывались рекомендации и общие подходы, изложенные в работах [4, 5, 6].

Ниже приведено функциональное назначение блоков модели, в скобках указаны параметры, которые вводятся в поля окон настройки элементов.

*M* – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (номинальная мощность, линейное напряжение, частота, активные сопротивления и индуктивности статора и ротора, взаимная индуктивность, момент инерции, число пар полюсов).

*Mc* – блок задания нагрузки (величина статического момента).

*VS1 ... VS6* – тиристоры ТРН, включенные по два в каждую фазу и соединенные встречно параллельно (сопротивление в открытом и закрытом состояниях, падение напряжения на тиристоре).

*AVS* – система импульсно-фазового управления (частота сети, ширина управляющих импульсов).

*ST* – блок разрешения (нулевой сигнал) или запрета (единичный) на работу СИФУ.

*Sub* – подсистема формирования требуемого диапазона углов управления тиристорами ТРН (минимальное и максимальное значения).

*AC* – трехфазная питающая сеть переменного тока (линейное напряжение, частота, активное сопротивление и индуктивность источника).

*QF* – автоматический выключатель (сопротивление в замкнутом и разомкнутом состояниях).

*AQF* – блок управления автоматом (включение единичным сигналом, отключение – нулевым).

*UV* – блок датчиков напряжений питающей сети для синхронизации работы СИФУ (линейные или фазные напряжения).

*LF* – трехфазный токоограничивающий реактор для обеспечения электромагнитной совместимости электропривода с сетью (активное сопротивление и индуктивность).

*ER* – блок задания требуемой скорости (величина сигнала и время его подачи).

*AI* – датчик интенсивности для ограничения ускорения привода (темп нарастания сигнала заданной скорости).

*AR* – ПИД-регулятор скорости (пропорциональная, интегрирующая и дифференцирующая составляющие, ограничения выходного сигнала).

*UR* – датчик скорости для формирования отрицательной обратной связи (коэффициент передачи).

*MMD* – блок выделения контролируемых параметров (скорость и момент двигателя).

*SRS* – блок оптимизации параметров ПИД-регулятора скорости (требуемые параметры переходного процесса).

*Scope* – осциллограф для визуализации контролируемых параметров (число входов, время моделирования).

*To Workspace* – блок вывода значений скорости в рабочую область для последующей обработки (обозначение контролируемого параметра).

*SW* – ключ переключения режимов работы модели (численное значение уставки срабатывания).

*ASW* – блок управления ключом (единичный сигнал коммутирует верхний вход, нулевой – нижний).

Экспериментальная переходная характеристика по скорости (рис. 2) получается в результате прямого запуска системы ТРН-АД.

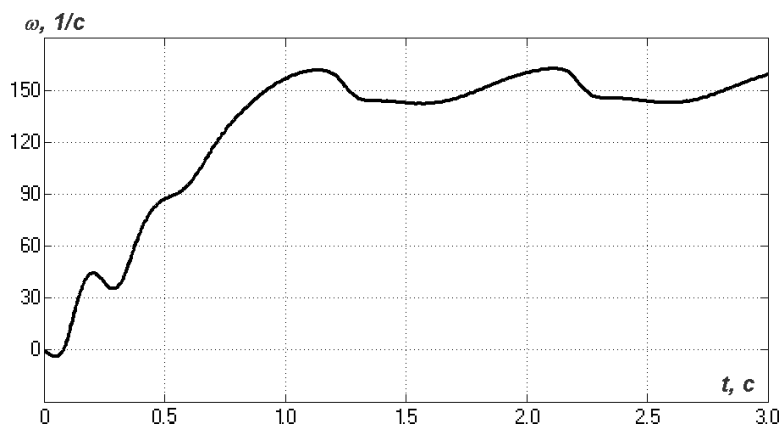


Рис. 2. Экспериментальная переходная характеристика

В этом случае на вход управления подсистемы *Sub* через верхний вход ключа *SW* скачком подается постоянный сигнал с выхода блока *ER*. Тиристоры ТРН практически мгновенно открываются, и на статорную обмотку электродвигателя подается максимальное напряжение.

Для определения коэффициентов идентифицированной передаточной функции системы согласно методике, изложенной в работе [2], используются инструментальные средства пакета LabVIEW, которые обрабатывают дискретные численные значения экспериментальной скоростной характеристики, взятые из рабочей области системы *MATLAB*.

Для нашего варианта получены следующие величины коэффициентов:

$b_0 = 5.21794e10$ ,  $a_1 = 9963.7$ ,  $a_2 = 1.58203e8$ ,  $a_3 = 3.47862e9$  - при аппроксимации переходной характеристикой третьего порядка;

$K = 15$ ,  $a_0 = 7.06541e-6$ ,  $a_1 = 0.0423903$  - в случае аппроксимации переходной характеристикой второго порядка.

Следующим шагом исследования является нахождение зависимостей для вычисления составляющих ПИД-регулятора скорости. Соответствующие формулы можно получить, используя классическую методику, аналогично системам с подчиненным регулированием координат.

Для третьего порядка приближенно, пренебрегая составляющей полинома знаменателя в третьей степени:

$$K_{\text{П}} \approx \frac{a_2}{a_{\text{C}} T_{\mu} b_0 K_{\text{C}}}, \quad K_{\text{И}} \approx \frac{a_3}{a_{\text{C}} T_{\mu} b_0 K_{\text{C}}}, \quad K_{\text{Д}} \approx \frac{a_1}{a_{\text{C}} T_{\mu} b_0 K_{\text{C}}}.$$

Для второго порядка:

$$K_{\text{П}} = \frac{a_1}{a_{\text{C}} T_{\mu} K K_{\text{C}}}, \quad K_{\text{И}} = \frac{1}{a_{\text{C}} T_{\mu} K K_{\text{C}}}, \quad K_{\text{Д}} = \frac{a_0}{a_{\text{C}} T_{\mu} K K_{\text{C}}}.$$

В приведенных выражениях  $K_{\text{C}}$  – коэффициент передачи отрицательной обратной связи по скорости;  $T_{\mu}$  – постоянная времени, учитывающая быстродействие тиристоров ТРН;  $a_{\text{C}}$  – настроечный параметр контура скорости (стандартное значение равно двум).

Вычисленные составляющие ПИД-регулятора скорости вводятся в окно настроек параметров блока *AR*. При моделировании замкнутой системы ТРН-АД ключ *SW* коммутирует нижний вход.

Для получения результатов моделирования без оптимизации параметров регулятора необходимо запускать процесс кнопкой основного окна модели. На рис. 3 изображены диаграммы скорости электродвигателя при использовании вычисленных значений коэффициентов ПИД-регулятора для стандартной настройки по идентифицированным передаточным функциям третьего (рис. 3, а) и второго (рис. 3, б) порядков.

Чтобы скорректировать составляющие ПИД-регулятора путем оптимизации переходного процесса требуется запускать модель кнопкой окна настроек блока оптимизации *SRS*. Для этого случая диаграммы имеют вид, представленный на рис. 4. а (третий порядок) и рис. 4. б (второй порядок).

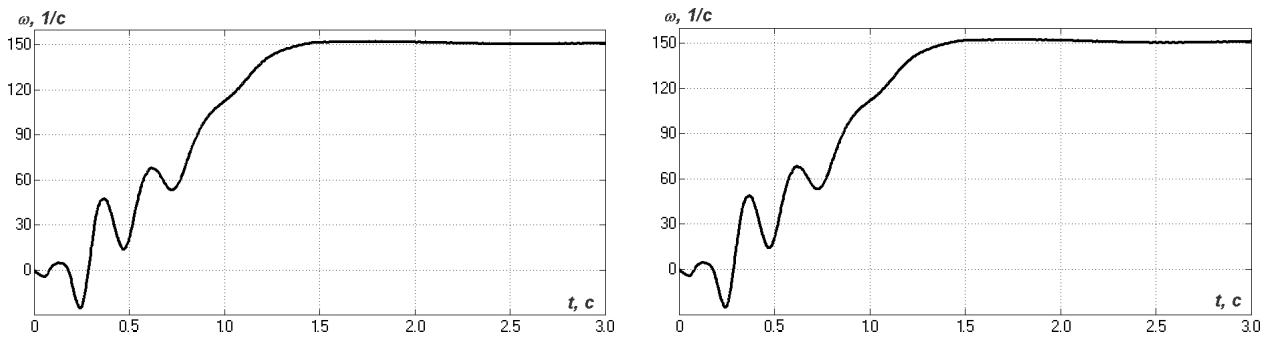


Рис. 3. Диаграммы скорости электродвигателя при аппроксимации системы передаточными функциями третьего (а) и второго (б) порядками

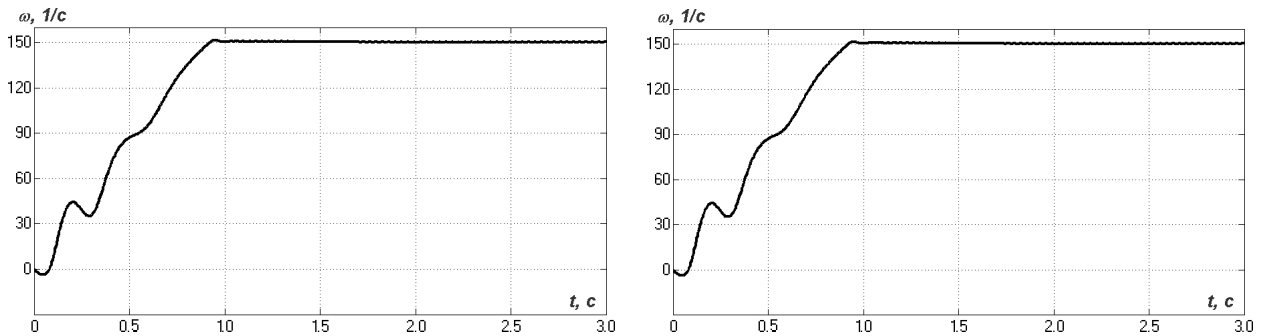


Рис. 4. Диаграммы скорости двигателя при оптимизации переходного процесса по скорости для третьего (а) и второго (б) порядков

Для удобства сравнения значения коэффициентов ПИД-регулятора скорости до и после оптимизации сведены в табл. 1.

Таблица 1-

**Численные значения составляющих ПИД-регулятора скорости**

Величина		$K_P$	$K_I$	$K_D$
Третий порядок	Начальная	2.2728	49.9749	1.4314e-4
	Скорректированная	15.1520	333.1661	9.5428e-4
Второй порядок	Начальная	2.1185	49.9750	3.5309e-4
	Скорректированная	14.1230	333.1667	24.000e-4

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что предложенная методика инженерингового подхода к применению компьютерных технологий для исследования электромеханических комплексов на стадии проектирования, когда физический объект отсутствует, позволяет определить необходимые свойства и параметры системы для принятия решения о практической целесообразности ее технической реализации и внедрения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации / [М.П. Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козярук и др.]; под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
2. Майданский И.Я. Аппроксимация переходной характеристики виртуальной модели электромеханической системы // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Осроградського. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63) частина 1. – С. 150-154.
3. Чермалых А.В., Майданский И.Я., Михайлов А.А. Оптимизация электромеханических систем с ПИД-регулятором методом компьютерного моделирования // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технического журнала «Электроинформ». – Львов: ЕКОинформ, 2009. – С. 17-20.
4. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
5. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.