

УДК 681.518.5

А.В. Кычкин, Д.А. Даденков, А.Б. БилаловПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА
ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ
НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Рассматривается комплексная задача построения автоматизированной информационной системы (АИС) полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов. Разработаны структурная схема и математическое обеспечение системы моделирования. Выполнена практическая реализация программно-аппаратного комплекса на базе микропроцессорных средств автоматизации фирмы Siemens. Предложен алгоритм работы программируемого логического контроллера (ПЛК). При создании программного обеспечения ПЛК SIMATIC S7-300 использован программный пакет STEP 7, а для конфигурирования, программирования и тестирования программной части АИС-утилиты SIMATIC Manager. Оценка точности и адекватности формирования статической нагрузки выполнена с применением программного пакета MatLab, произведен анализ результатов моделирования типовых статических нагрузок и механических характеристик, снятых при натурной имитации на реальном оборудовании. Разработанная виртуальная установка позволяет выбрать необходимые параметры модели нагрузки, строить механические характеристики технологического механизма и двигателя, выполнять настройки систем управления электроприводов для различных практических приложений в промышленности, робототехнике и транспорте. Работа выполнена в соответствии с государственным заданием (заказ-наряд 1047) по теме «Создание мобильной интеллектуальной платформы на базе технологии виртуальной реальности, элементов и систем управления, пригодных для эксплуатации в экстремальных условиях внешней среды».

Ключевые слова: автоматизированная информационная система, полунатурное моделирование, статическая нагрузка электропривода, программно-аппаратный комплекс, программируемый логический контроллер, программное обеспечение.

A.V. Kichkin, D.A. Dadenkov, A.B. Bilalov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR HALF-SIZED
MODELING OF ELECTRIC DRIVES STATIC LOAD**

The paper deals with complex task of designing computerized information system for half-sized modeling of electric drives static load. A structural scheme and mathematical support for modeling system have been developed. Software and hardware implementation has been completed on the basis of Siemens microprocessor automation equipment. There has been suggested algorithm for programmable logic controller performance. STEP 7 software package was used when developing programmable logic controller SIMATIC S7-300 software, and SIMATIC Manager utility was used for configuration,

programming and testing of computerized information system software. Accuracy and validity assessment of the static load is carried out with the help of MatLab software package. The results of common static load modeling and mechanical characteristics have been analyzed while using natural imitation real-life equipment. The developed virtual tool makes it possible to choose necessary parameters for load model, to create mechanical characteristics for technological mechanism and engine, to adjust electric drives control systems for practical applications in industry, robotics, and transport. The total work has been completed in accordance with the Government order (service order 1047) for "Development of mobile intelligent platform on the basis of virtual reality technology, control elements and systems, adaptable for use in extreme environment conditions".

Keywords: automated information system, half-sized modeling, electric drives static load, software and hardware complex, programmable logic controller, software.

Большая часть электроэнергетических потребностей и задач в обеспечении качества работы современной роботизированной промышленности и транспорта приходится на долю электрических приводов. Особую важность приобретают процессы высокоточной настройки и корректной эксплуатации приводной техники, позволяющие сократить энергопотребление разрабатываемых технологических систем управления (СУ) и повысить эффективность их работы в режиме реального времени (РРВ).

Для эффективного проектирования и выбора приводной техники целесообразна адекватная оценка механических характеристик рабочих механизмов и реакции электропривода на них. Это необходимо для настройки привода под определенный тип нагрузки и обеспечения оптимального течения технологического процесса. Однако на практике подобные исследования зависимостей нагрузки на внедряемый электропривод проводятся не всегда. Таким образом, задача разработки автоматизированной информационной системы (АИС), осуществляющей стендовое полунатурное моделирование различных видов статических нагрузок электропривода в РРВ, представляется актуальной и практически значимой.

Структура АИС полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов

Целью разрабатываемой АИС является автоматизация процессов сбора, передачи, обработки информации, визуального контроля параметров и управления в режиме реального времени. В качестве основных выделены следующие функции:

– автоматизированная проверка готовности и контроль работоспособности систем стенда, управляющих запуском и моделированием режимов нагрузки двигателей;

- автоматизированное измерение и обработка контролируемых параметров стенда и состояния оборудования в РРВ;
- наглядное представление данных и осциллографирование параметров электроприводов в различных режимах нагрузки.

На основании приведенных функций, а также с учетом существующих решений по анализу и синтезу структур информационно-измерительных и управляющих систем, [1, 2, 3] построим обобщенную структурную схему АИС полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов, рис. 1.

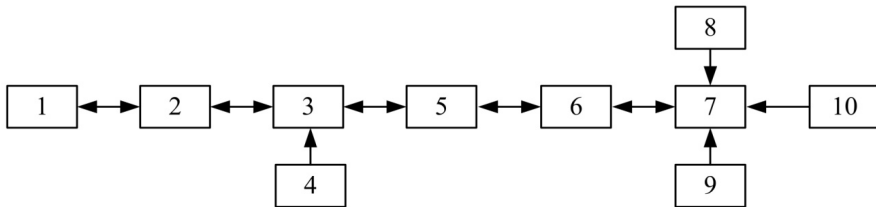


Рис. 1. Структурная схема АИС полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов

На рисунке приняты обозначения: 1 – набор датчиков и исполнительных устройств электромашинного агрегата; 2 – частотные преобразователи; 3 – программируемый логический контроллер (ПЛК); 4 – программное обеспечение (ПО) имитации статической нагрузки; 5 – значение имитируемого процесса 1..N; 6 – коммуникационный драйвер; 7 – ПО среды исполнения РРВ; 8 – база данных среды исполнения РРВ; 9 – графическая среда исполнения; 10 – ПО конфигурирования.

Математическое обеспечение АИС полунатурного моделирования электроприводов

При исследовании электропривода наибольший интерес представляет реакция электродвигателя электромашинного агрегата на типовые статические нагрузки, создаваемые подключенными механизмами [4]. Под механической характеристикой будем понимать зависимость между угловой скоростью и моментом сопротивления, приведенными к валу двигателя $\omega = f(M_c)$.

Уравнение динамики электромеханической системы имеет следующий вид:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где M , J , ω , M_c – соответственно электромагнитный момент, развиваемый машиной, ее момент инерции и частота вращения, а также момент сопротивления на валу.

Из (1) следует, что для устойчивой работы двигателя, приводящего в действие какой-либо механизм, необходимо определенное сочетание параметров механических характеристик двигателя $M(\omega)$ и нагрузки $M_c(\omega)$. Двигатель работает устойчиво, когда жесткость его механической характеристики в точке статического равновесия (при $M = M_c$) меньше жесткости нагрузки:

$$\frac{dM}{d\omega} = \frac{dM_c}{d\omega}, \quad (2)$$

Таким образом, выполнение условия (2) при имитации нагрузки на виртуальной модели и реальной установке является основным условием работы асинхронного двигателя (АД) на устойчивой части механической характеристики.

Чаще всего используются следующие типовые статические нагрузки электропривода:

– с моментом сопротивления M_c , не зависящим от скорости ω . Такой характеристикой обладают подъемные краны, лебедки, поршневые насосы при неизменной высоте подачи. Если нагрузить машину положительным моментом, то при его значениях, больше максимального электромагнитного момента в двигательном режиме, появляется ускоряющий момент, и частота вращения начинает стремительно падать по кривой механической характеристики. В таком случае получение статически устойчивых точек является невозможным;

– с моментом сопротивления M_c , линейно зависящим от скорости ω . Зависимость присуща приводу генератора постоянного тока с независимым возбуждением, работающему на постоянную нагрузку. Если представить момент нагрузки линейной функцией, проходящей через начало координат, получаем следующее:

$$M_c = \alpha \cdot \omega, \quad (3)$$

где α – жесткость механической характеристики. Таким образом, изменяя угол наклона характеристики относительно оси момента, получаем статически устойчивую работу двигателя во всем диапазоне скоростей;

– с моментом сопротивления M_c , зависящим от квадрата угловой скорости ω . Примерами служат характеристики вентиляторов, центробежных насосов, гребных винтов. При работе двигателя на вентиляторную нагрузку наблюдается полная статическая устойчивость, которая обеспечивает выполнение условия (2) в двигательном режиме.

Программно-аппаратная реализация АИС

Для полунатурного моделирования была разработана программно управляемая подсистема имитации на базе ПЛК, аналогичная [5]. В качестве базового контроллера выбран SIMATIC S7-300 фирмы *Siemens*. Принцип работы и состав подсистемы, а также переход от подсистемы с реальным объектом с учетом результатов моделирования в *MatLab* к структуре подсистемы имитации пояснены на рис. 2.

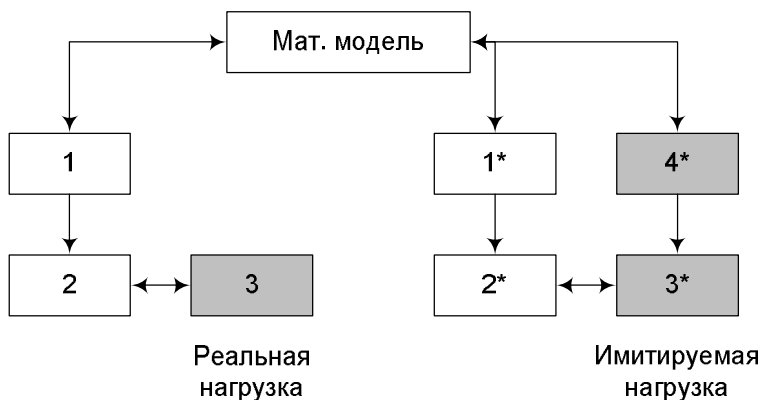


Рис. 2. Схема перехода от структуры с реальным объектом к подсистеме имитации нагрузки

Слева на рисунке показана упрощенная схема управления технологическим механизмом 3, являющимся реальной нагрузкой АД 2, подключенному к СУ 1.

Справа показана упрощенная схема управления имитируемым технологическим механизмом, реализующим нагрузку АД 2* с СУ 1* на основе двигателя постоянного тока 3*, управляемого системой имитации нагрузки 4*. Блок математического моделирования, реализуемый в пакете *MatLab*, используется для уточнения параметров СУ 1 и 1*, а также формирования характеристик системы имитации нагрузки 4*. Блок управления двигателем постоянного тока реализован на основе микропроцессорного преобразователя *SIMOREG DC MASTER*.

Левая часть каждой подсистемы, включающая АД с СУ, остается постоянной. В правой части происходит замена технологического механизма на двигатель постоянного тока с СУ. В результате имитации производится задание момента сопротивления на валу, близкое к реальному объекту, вследствие чего процессы в АД будут совпадать с процессами при работе на реальную нагрузку. Таким образом, подсистема имитации может быть использована при проведении исследовательских и инженерных работ по настройке СУ приводами на различные виды технологических механизмов, включая производственные и транспортные задачи.

Конфигурация ПЛК *SIMATIC S7-300* включает в себя:

- стойку, используемую для размещения и соединения модулей между собой;

- модуль ввода и вывода дискретных сигналов *SIPLUS SM 323*, который используется для преобразования входных дискретных сигналов контроллера в его внутренние логические сигналы, а также для преобразования внутренних логических сигналов контроллера в его выходные дискретные сигналы;

- центральный процессор *CPU 315-2PN/DP* с встроенным интерфейсом ведущего *DP*-устройства, используемый для размещения и обработки программы пользователя. Процессор является активным узлом сети *PROFIBUS*, который циклически обменивается данными со «своими» ведомыми *DP*-устройствами.

Память CPU ПЛК логически разделена на области. Программа пользователя располагается в загрузочной и в рабочей памяти. Принцип работы ПЛК заключается в обработке по прикладной программе пользователя данных с модулей входов (например, сигналов от привода) и последующей выдачей управляющих сигналов, посредством модулей выходов и модулей связи, обеспечивающих подключение исполнительных устройств.

Для создания ПО ПЛК *SIMATIC S7-300* АИС используется программный пакет *STEP 7*, включающий модули для разработки программных и аппаратных средств, в рамках одного проекта. На основе требований к программной и аппаратной частям АИС осуществлены создание и конфигурирование промышленной сети РРВ, рабочих программ и блоков данных.

Для конфигурирования, программирования и тестирования программной части АИС использовалась утилита *SIMATIC Manager*. Программа *SIMATIC Manager* является структурированной программой, а это означает, что данные и установки для системы автоматизации структурированы внутри проекта и представлены в виде объектов (блоков), обладающих определенными функциями, соответствующими их положению в сетевой и иерархической структуре системы.

Алгоритм работы программы ПЛК разбит на логические блоки:

- установление соединения между *SIMATIC S7-300* и универсальным преобразователем *SIMOREG DC MASTER* по сети *PROFIBUS*;
- выполнение действий согласно слову управления, приходящему из системы диспетчерского управления *WinCC*;
- расчет и задание по выбранному закону момента и обмен телеграммами с *SIMOREG DC MASTER*;
- пересчет параметров, принимаемых в телеграмме, в вид, пригодный для отображения системой диспетчерского управления *WinCC*.

В результате на экран панели оператора выполняется вывод трендов. В зависимости от выбранного режима отображаются механические характеристики производственных механизмов.

Оценка точности и адекватности формирования статической нагрузки с использованием программного пакета *MatLab*

MatLab совместно с *Simulink* и *SimPowerSystem* позволяет исследовать процессы и параметры электрических машин, которые зачастую не доступны в реальных объектах. В библиотеках этих пакетов имеются различные элементы и измерительные приборы, позволяющие исследовать электрическую цепь любой сложности [6]. С целью оценки формирования статической нагрузки электропривода была разработана виртуальная лабораторная установка, включающая блоки моделирования АД и блок задания момента.

Виртуальная установка позволяет выбрать необходимые параметры модели нагрузки, строить механическую характеристику технологического механизма и двигателя, что необходимо для анализа.

Ниже на рис. 3, 4, 5 представлены результаты моделирования типовых статических нагрузок в *MatLab* и механические характеристики при натурной имитации на реальном оборудовании в РРВ. Незначительные отклонения от результатов моделирования связаны

с инерционностью подсистемы имитации. Цифрой 1 обозначен график механической характеристики при моделировании в *MatLab*, 2 – график механической характеристики при натурной имитации.

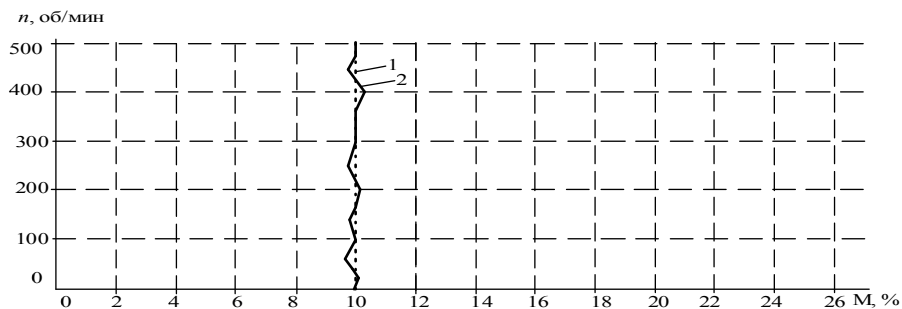


Рис. 3. Режим постоянного задания момента сопротивления

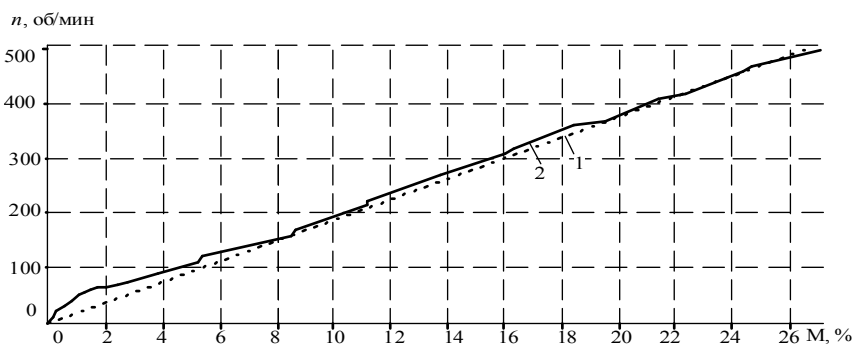


Рис. 4. Задание момента сопротивления в зависимости от скорости на валу

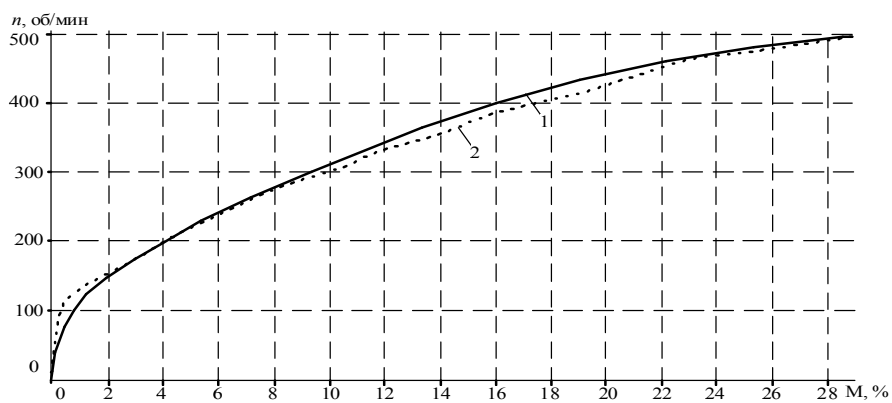


Рис. 5. Задание момента сопротивления в зависимости от квадрата скорости на валу

Точность процесса имитации нагрузки непосредственно связана с понятием ошибки. Для количественной оценки ошибки предложено использовать среднюю абсолютную ошибку [7]:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i^3(t) - y_i^M(t)|}{y_i^3(t)} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где n – количество измерений; y^M – значение модели нагрузки в *MatLab*; y^3 – экспериментальное значение ряда, полученное на стенде.

Помимо точности процесса имитации не менее важной является оценка адекватности разработанной системы. Под адекватностью полунатурного моделирования нагрузки будем понимать степень соответствия результатов, полученных при эксперименте на стенде, данным по разработанной модели в *MatLab*. Для оценки адекватности теоретических значений используется критерий согласия χ^2 .

Согласно критерию принимаются две последовательности значений – модели F^M и экспериментальные значения F^3 . Необходимо проверить гипотезу F^M на адекватность. Для этого рассчитаем величину V [7]:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i^M - y_i^3)}{y_i^M}. \quad (5)$$

Расчеты показали, что для всех режимов имитации нагрузки ошибка лежит в пределах от 2 до 6 %. При этом точность процесса полунатурного моделирования составляет от 94 до 98 %. Адекватность предложенного метода полунатурного моделирования принимается с вероятностью от 95 до 99 %, что свидетельствует о достаточно высоком качестве работы АИС.

Таким образом, АИС полунатурного моделирования типовых статических нагрузок электропривода в РРВ, включая режимы постоянного задания момента сопротивления, задания момента сопротивления в зависимости от скорости на валу, задания момента сопротивления в зависимости от квадрата скорости на валу, показала высокую точность и адекватность в рамках предложенной программно-аппаратной реализации.

Практическое применение АИС предложенной программно-аппаратной реализации способствует корректной настройке СУ электроприводов под произвольные виды нагрузок, имитируемые стендом, для приложений реального времени промышленности, робототехники, транспорта и др.

Библиографический список

1. Друзьякин И.Г. Технические средства автоматизации. Конспект лекций: учебное пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 251 с.
2. Siemens Industry Online Support. – URL: <http://support.automation.siemens.com/> (дата обращения: 15.04.2013).
3. Кычкин А.В. Модель синтеза структуры автоматизированной системы сбора и обработки данных на базе беспроводных датчиков // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 1. – С. 15–20.
4. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
5. Темичев А.А., Кычкин А.В. Программный симулятор ПЛК VIDA350 системы энергоменеджмента // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь, 2011. – № 5. – С. 210–220.
6. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
7. Мыльников Л.А. Моделирование систем: практикум. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 42 с.

Сведения об авторах

Кычкин Алексей Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aleksey.kychkin@gmail.com).

Даденков Дмитрий Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dadenkov@mail.ru).

Билалов Альберт Борисович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: albert_bil@mail.ru).

About the authors

Kichkin Aleksey Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation Microprocessors, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail aleksey.kychkin@gmail.com).

Dadenkov Dmitry Alexandrovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer at the Department of Automation Microprocessors, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: dadenkov@mail.ru)

Bilalov Albert Borisovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer at the Department of Automation Microprocessors, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: albert_bil@mail.ru).

Получено 05.09.2013