

УДК 62-83:621.77

Полилов Е. В., канд. техн. наук,
Руднев Е. С., Горелов П. В., Скорик С. П., Батрак А. М.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Аннотация. На базе преобразователей частоты SINAMICS показана возможность создания универсальной экспериментальной установки для исследования алгоритмов идентификации, управления и наблюдения различных электромеханических систем со сложными параметрически и функционально неопределёнными объектами

Полилов Е. В., канд. техн. наук,
Руднев Е. С., Горелов П. В., Скорик С. П., Батрак А. М.

ДОСЛІДНИЙ СТЕНД ДЛЯ АПРОБАЦІЇ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Анотація. На базі перетворювачів частоти SINAMICS показана можливість створення універсальної експериментальної установки для дослідження алгоритмів ідентифікації, управління і спостереження різноманітних електромеханічних систем зі складними параметрично і функціонально невизначеними об'єктами.

Polilov E. V.
Rudnev E. S., Gorelov P. V., Skorik S.P., Batrak A. M.

RESEARCH STAND TO TEST THE ALGORITHM CONTROL OF COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Abstract. Based on frequency converters SINAMICS demonstrated the possibility of creating a universal experimental setup for the study of algorithms for identification, control and observation of various electromechanical systems with complex functional and parametric uncertain objects.

Введение. Разработка и внедрение новых алгоритмов идентификации, управления и наблюдения в различных электромеханических системах неразрывно связаны с этапом проведения натурных испытаний, отработкой отдельных узлов и всей системы в целом, верификацией и корректировкой основных идей и моделей, положенных в основу теоретических исследований. Ни для кого не секрет, что лабораторная база электротехнических специальностей большинства вузов Украины, в силу ряда причин, к сожалению, на сегодня морально устарела и не соответствует мировому уровню. Предлагаемые на рынке лабораторного оборудования «исследовательские» стенды, какой бы развитой ни была маркетинговая политика фирм-производителей, по глубокому убеждению авторов, пригодны лишь для учебного процесса, и скорее даже не в вузах, а в колледжах и техникумах. Интересные решения предлагает ряд зарубежных фирм, связанных с разработкой основанных на ПК/ПЛИС масштабируемых программно-аппаратных симуляторов, например, устройств силовой электроники и даже комплексных электромеханических систем, работающих в реальном времени, управляющих систем быстрого прототипирования и т.п. Однако стоимость подобного оборудования чрезмерно высока для университетов. Преодоление проблемы отсутствия должной лабораторной базы для исследований на сегодня состоит в создании молодыми учёными своими руками «индивидуальных» экспериментальных установок, ориентированных исключительно на решение постав-

ленных перед ними задач. Очевидно, этот процесс, нередко наталкивается и на отсутствие опыта создания подобных установок у исследователей, и включает проработку проекта макета «в бумаге», поиск и покупку подходящей элементной базы и программного обеспечения, монтаж и наладку оборудования, написание программного кода и т.п., что неизбежно в данной ситуации, и, как правило, занимает не менее трети всего времени обучения в аспирантуре.

Постановка задач. Основной целью работы является разработка концепции и создание универсальной экспериментальной установки для возможности практической реализации, апробирования и исследования новых алгоритмов идентификации, управления и наблюдения различных электромеханических систем со сложными параметрически и функционально неопределёнными объектами. В рамках реализованного проекта необходимо проработать и технически реализовать в установке «механизм» имитации различных технологических процессов.

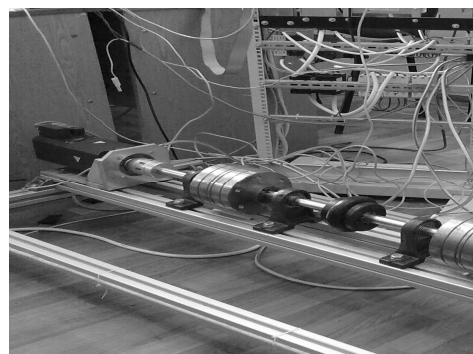


Рис. 1. Двигательный агрегат

© Полилов Е.В., Батрак А.М.,
Руднев Е.С., Скорик С.П., Горелов П.В., 2011

Материалы исследования. В состав аппаратной части экспериментальной установки входят:

- синхронные серводвигатели с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 1,5 кВт и частотой вращения 3000 об/мин со встроенным инкрементальным датчиком 2048 имп/об, используются как рабочая /нагрузочная машины (см. рис.1);
- выпрямительный модуль Smart Infeed;
- инверторные/двигательные модули;
- блок управления CU320 частотным преобразователем и базовая панель оператора BOP20;
- линейный реактор, коммутационная аппаратура, силовые кабели и кабели связи, блоки питания управляющей электроники;
- асинхронный КЗ электродвигатель мощностью 0,75 кВт, управляемый от преобразователя частоты SINAMICS G120 (нагрузочная машина);
- программируемый контроллер s7-300, офисный ПК на базе процессора Intel и модуль связи MPI-USB для конфигурирования, оптимизации и диагностики частотных преобразователей (см. рис.2);
- офисный ПК на базе процессора AMD со встраиваемой многофункциональной платой сбора, обработки данных и управления PCI-1711, системой MATLAB с входящими в её состав программой структурного моделирования Simulink, мастерскими реального времени Real-Time Workshop и Real-Time Windows Target (см. рис.3);
- упругая эластичная муфта CHALLENGE FFX с торовыми резинокордовыми эластичными элементами различной жёсткости, провалы, набор дисковых инерционных масс с возможностью установки желаемого соотношения моментов инерции, самоцентрирующиеся зажимные элементы, соединительные муфты ROTEX® GS с комплектом упругих зубчатых венцов различной жёсткости, а также станина с комплектом подшипниковых узлов.

Отличительной особенностью установки является возможность реализации алгоритмов управления в системе регулирования преобразователем практически любой сложности и *исключительно на программном уровне*. Существующая система управления преобразователем реализована программно в блоке управления CU320 и для пользователя она мнемонически представлена в виде схем, состоящих из функциональных блоков с изменяемыми параметрами и систем связи между ними [8]. Чтобы читателю оценить сложность внутренней структуры существующей системы управления преобразователем, авторам достаточно упомянуть, что только общее число изменяемых параметров в базовой прошивке текущей версии уже превышает десять тысяч! И это та плата, за счёт которой достигается максимальная гибкость и универсальность преобразователей этой серии. Выбирая лишь на программном уровне в ходе параметрирования необходимые законы регулирования (скалярный, векторный или серво), можно реализовать системы слежения и позиционирования, системы стабилизации скорости, системы регулирования с внешним технологическим регулятором и т.п.; к преобразователю можно подключить асинхронную машину с короткозамкнутым ротором (АДКР), синхронную машину с постоянными магнитами (СМПМ) или с обмоткой возбуждения в роторе, реактивный, линейные асинхронный и синхронный двигатели, и, что немало важно, ни аппаратная, ни программная части преобразователя при этом не изменяются. Результаты исследования, а также возможность практической реализации релейно-робастных алгоритмов управления в различных электромеханических системах с приводным синхронным серводвигателем (в рамках разрабатываемой экспериментальной установки) авторами рассмотрены в ряде научных статей [1-4].



Рис.2. Параметрирование и диагностика частотных преобразователей

При практической реализации релейно-робастных управлений нами учтён тот факт, что САР скорости СМПМ уже содержит внутренний контур регулиро-

вания q -составляющей статорного тока. В базовой прошивке преобразователя этот контур реализован с пропорционально-интегральным регулятором. Изме-

нить структуру этого регулятора, в том числе и алгоритмы переключения силовых ключей инверторной части доступными пользователю программными средствами не представляется возможным. Поэтому принято решение о реализации разрывных/робастных алгоритмов лишь в канале регулирования скорости и внешнем технологическом регуляторе в случае построения трёхконтурных САР без изменения структуры регулятора q -составляющей статорного тока и алгоритмов переключения силовых ключей инвертора. На самом деле этот факт даже на руку разработчикам, во-первых, это позволяет упростить конечный алгоритм релейного регулятора скорости, поскольку снижается порядок объекта управления (контур тока оптимизирован, в результате чего скомпенсирована электромагнитная постоянная времени), во-вторых, отпадает необходимость в «стыковке» разрывных управлений и имеющихся алгоритмов управления силовыми ключами (в инверторе разработчиками реализован т.н. Space Vector Modulation метод), оптимизированных под линейные законы изменения управляющего воздействия и, в-третьих, ввиду того, что частота ШИМ есть конкретная конечная величина, определяемая пользователем программно – это позволяет ограничить на допустимом уровне величину коммутационных потерь в силовых ключах, чего невозможно сделать при «прямом» разрывном управлении, поскольку частота скользящего режима теоретически ничем не ограничена, а точнее, не может быть контролируемо изменена.

Реализация любых алгоритмов управления различными электромеханическими объектами на базе созданной лабораторной установки представляется

возможной благодаря технологии программирования DCC (Drive Control Charts) [9, 10], технологии т.н. свободных функциональных блоков [11], а также технологического программного обеспечения SIMOTION SCOUT [12, 13]. Программирование, а точнее реализация той или иной структуры в системе регулирования преобразователем осуществляется на интуитивно понятном языке в графической форме. Иными словами, пользователю предоставляется достаточно мощный инструмент, позволяющий изменять структуру системы управления преобразователем в каждом конкретном случае и в соответствии с поставленными задачами. Единственным ограничением технологии DCC является то, что величина такта расчёта DCC структур в CU320 составляет 1 мс.

Среди большинства средств разработки ПО для реализации механизма полунатурного моделирования была выбрана система MATLAB с входящими в её состав программой структурного моделирования динамических объектов Simulink, мастерскими реального времени Real-Time Workshop и Real-Time Windows Target [7], в которых и создано программное обеспечение для управления преобразователями частоты. Эти программные продукты обеспечивают выполнение моделей Simulink в реальном времени непосредственно на ОС Windows для быстрого прототипирования или программно-аппаратного тестирования систем управления и обработки сигналов, посредством специализированных интерфейсных блоков позволяют организовать взаимодействие моделей Simulink с внешними устройствами, такими как датчики, сенсоры и исполнительные механизмы, проектирования и испытаний систем реального времени.

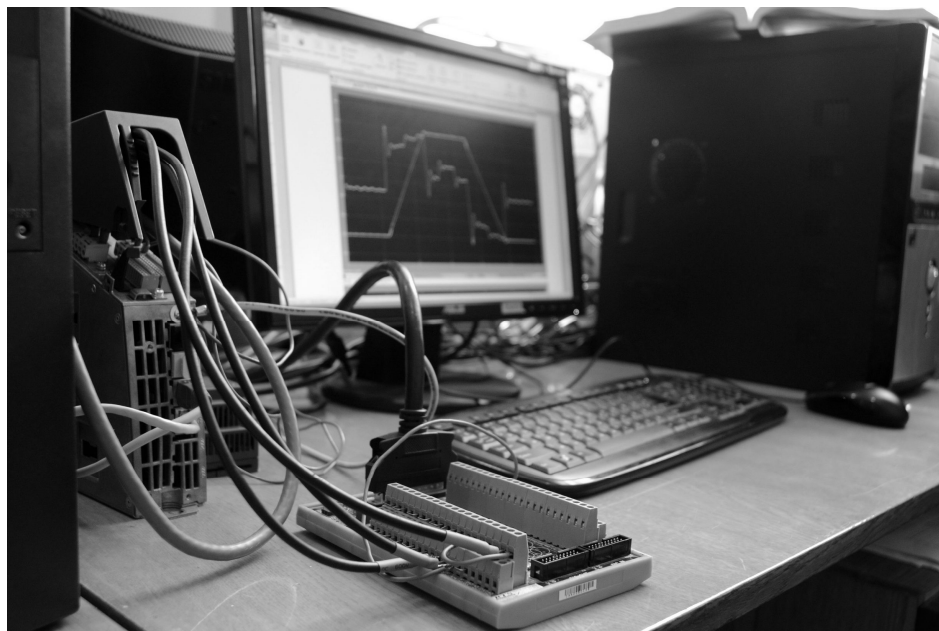


Рис.3. Модуль CU320 и управляющий ПК со встроенной платой PCI-1711

Для исследования алгоритмов управления и наблюдения *различных электромеханических систем* со сложными параметрически и функционально неопределёнными объектами, в том числе и многомассовой упруговязкой системы (с учётом упругостей и зазоров

в механических передачах, явлений удара, автоколебаний и т.п.) или, для исследования более комплексных объектов, например, модели процесса непрерывной прокатки рулонной стали с целью апробирования алгоритмов стабилизации межклетьевого натяжения и

толщины полосы и т.п., в лабораторной установке реализован чрезвычайно мощный и гибкий механизм т.н. полунатурного моделирования, а точнее – программной эмуляции технологических процессов.

На примере управления скоростью электропривода многомассового упруговязкого механизма в системе с подчинённым токовым контуром рассмотрим его более детально. Одна из трудностей, возникающих при попытках создания обобщённого описания многомассовой упруговязкой системы, состоит в многообразии форм связей, которые могут существовать между отдельными вращающимися массами механизма. Они могут образовывать рядную структуру, когда каждая из промежуточных масс упруго связана только с предыдущей и последующей массами, разветвлённую, когда с некоторой массой упруго связано несколько других масс, не связанных между собой, кольцевую, когда несколько масс связаны между собой упругими кинематическими связями в кольцо. Могут существовать и более сложные системы, являющиеся комбинациями перечисленных. Структурная схема псевдо-механической части системы при наличии упругой связи двигателя и исполнительного органа (ИО) для случая, когда i -я масса связана только с предыдущей $(i-1)$ -й и последующей j -й массами, представлена на рис.4. Располагая схемой расположения масс, зная характер и точки приложения внешних моментов и моментов трения, а также места включения зазоров, можно построить соответствующую структурную схему всей многомассовой системы. Очевидно, что какой бы сложной ни была исследуемая кинематическая структура, «связь» технологического процесса с электродвигателем осуществляется всего по двум координатам – скорости машины ω_i и моменту «нагрузки», в данном случае – $M_{ki} + k_{cki} p \delta\varphi_{ki}$. Таким образом, если программно смитировать модель механической части ИО (на рис. 4

обведена пунктиром), например, средствами Real-Time Windows Target, величину $M_{ki} + k_{cki} p \delta\varphi_{ki}$ можно считать «заданием» в быстродействующий/«безынерционный» контур регулирования момента нагрузочной машины, которая и сформирует этот момент на валу приводного двигателя. Тем самым в реальном «железе» лабораторной установки системы ПЧ-СДПМ-АДКР-ПЧ с «жесткой» механикой появляется возможность исследования многомассовых электромеханических систем любой сложности, причём каждый из параметров имитируемой части, например, момент инерции J_k k -й массы, величина зазора $2\varphi_{0ki}$ в передаче, жёсткость c_{ki} валов, коэффициенты k_{cki}, k_{cjk} вязкого трения в передаче и т.п. изменяются программно и по желанию исследователя.

Отметим, что двух-, трёх- и четырёхмассовые электромеханические системы в лабораторном стенде реализованы, в том числе и «в железе» посредством упругой эластичной муфты CHALLENGE FFX с набором торовых резинокордовых эластичных элементов различной жёсткости, набора дисковых инерционных масс с возможностью установки желаемого соотношения моментов инерций, а также соединительных муфт ROTEX® GS с комплектом упругих зубчатых венцов различной жёсткости (поставляются в четырёх различных твёрдостях по Шору, отличающихся и по цвету, из материалов от мягкого при кручении до твёрдого), причём различная геометрия и размеры зубцов венца позволяют вводить в них/муфты контролируемый зазор φ_{0ki} , подобно существующим в зубчатых передачах редукторов на реальных промышленных объектах. Это немаловажно, в том числе и для оценки корректности полученных экспериментальных данных в результате полунатурного моделирования.

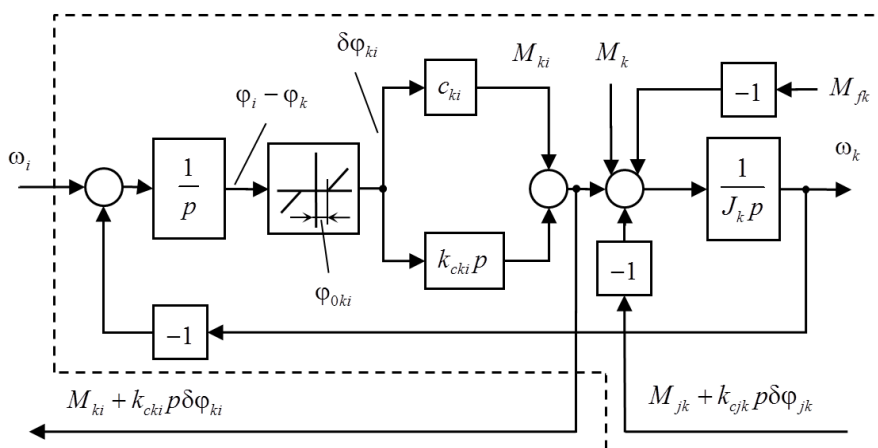


Рис.4. Структурная схема механической части ИО

Следующим этапом в создании стенда была поставлена задача идентификации и экспериментального определения динамических параметров имитируемых объектов управления, которая с успехом решена путём использования пакета расширений System Identification Toolbox системы MATLAB [14]. SIT со-

держит инструменты для создания математических моделей динамических систем, основанных на наблюдаемых входных/выходных данных. Особенностью является наличие гибкого пользовательского интерфейса, позволяющего организовать данные и модели. Набор инструментов поддерживает как пара-

метрические, так и непараметрические методы. Начиная с измерения входных и выходных данных, параметрическая модель должна уже быть определена для математического описания поведения системы в динамике; позволяет имитировать все стандартные модельные структуры, включая AR, ARX, ARMAX, ошибку выхода, Box-Jenkins, ARARX, ARMA, ARARMAX и т.д. Набор поддерживает обычные линейные модели, описанные в пространстве состояний, которые могут быть определены в дискретной или непрерывной временной области. Эти модели могут включать произвольное число входов и выходов.

На простом примере идентификации момента инерции J_d СДПМ покажем основные возможности реализованного в лабораторной установке механизма определения динамических параметров имитируемых объектов управления. Средствами базового программного обеспечения STARTER в исследуемый объект (в силовую часть) контролируемо генерировался входной сигнал, например, прямоугольной/синусоидальной формы нарастающей частоты в виде сигнала задания на момент электродвигателя. Одновременно с этим в процессе его «отработки» формировались массивы данных с интересующими координатами электропривода $M_d(t)$ и $\omega_d(t)$, которые сохранялись в виде файлов. Посредством графического интерфейса пакета или в командной строке MATLAB благодаря разработанным нами m-файлам осуществлялись требуемые этапы идентификации параметров. Так, зная, что структурно исследуемое

звено состоит из интеграла $\frac{1}{J_d p}$, охваченного отрицательной обратной связью с коэффициентом k_f , который характеризует внешнее вязкое трение, исследуется передаточная функция $\frac{1}{J_d p + k_f}$. Выбирая искомую модель в виде апериодического звена первого порядка $\frac{K}{(1+T_p s)}$, градиентным методом определяем параметры модели (рис. 5). Таким образом, сопоставив передаточные функции объекта и модели, можно вычислить искомые параметры:

$$k_f = 1 / 49,9257 = 0,02 \text{ Нм} \cdot \text{с};$$

$$J_d = 0,024821 / 49,9257 = 4,9716 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

что в точности соответствует паспортным данным.

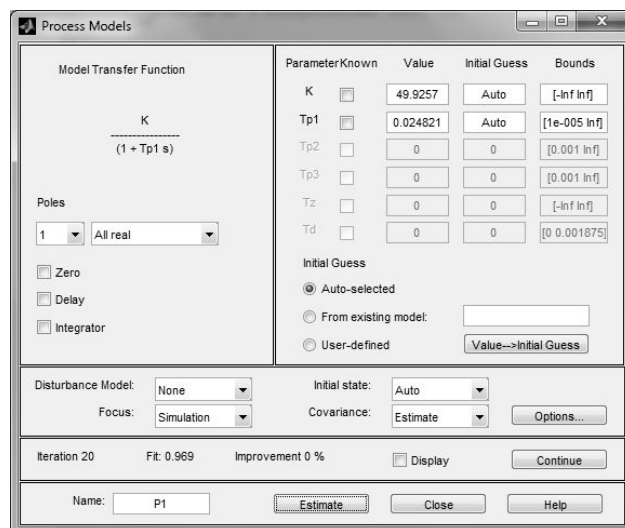


Рис.5. Окно идентификации J_d

На очередном этапе экспериментальных исследований в подтверждение результатов, полученных авторами на аналогичном оборудовании [5], была поставлена и успешно решена задача имитации технологического процесса стабилизации натяжения холоднокатаной полосы при смотке рулонов на НСХП. На основе разработанных ранее алгоритмов регулирования натяжения полосы [6], была составлена Simulink-модель управляющей программы лабораторной установки, имитирующей поведение электроприводов моталки и смежной клетки во взаимосвязи их через наматываемую полосу. Собственно модель части технологического процесса, как видно из рис.6, свёрнута в подсистему «Reel - Strip - Role Stand» и построена на основе математического описания системы моталка-полоса-клеть. Релейный регулятор с расчётными весовыми коэффициентами (собственно программное формирование подсигнатурной функции) представлен подсистемой «Regulator of a Strip Tension (RTS)». Сигнал задания, соответствующий требуемому по технологии характеру изменения натяжения (создание натяжения покоя, создание технологического натяжения и т.п.) реализуются подсистемой «Operators action (Тз, Н)», после чего он поступает на вход фильтрующего звена «Transfer Fcn n=2; G=10%; t=0.1 сек» для исключения скачков задающего воздействия и сглаживания этого сигнала до заданных параметров. Формирование требуемой тахограммы работы всего прокатного стана в модели реализовано в подсистеме «Speed of a Role Stand». Сигналы обратных связей по току I_q и скорости СДПМ поступают с выходов блоков «AI_1 Advantech PCI-1711 [auto]» и «AI_2 Advantech PCI-1711 [auto]» соответственно. Далее эти сигналы отфильтровываются от высокочастотных помех с помощью фильтров «butter Analog Filter Design». Окончательно сформированный алгоритм управления релейного РНП подаётся на вход блока «AO_1 Advantech PCI-1711 [auto]». Сигнал, пропорциональный статическому моменту, который необходимо сформировать в нагрузочной машине, поступает на вход блока «AO_2 Advantech PCI-1711 [auto]». Полученные экспериментальные данные

не отличаются от представленных ранее.

Выводы. Создана универсальная экспериментальная установка с возможностью практической реализации, апробирования и исследования новых алгоритмов идентификации, управления и наблюдения различных электромеханических систем. Посредством полунатурного моделирования в установке реализован «механизм» имитации различных технологических процессов. Предложены и реализованы в реальном железе разрывные алгоритмы релейного векторного управления синхронными машинами, проведены экспериментальные исследования работы электропривода в режимах стабилизации скорости СДПМ, позиционирования и слежения за заданной траекторией. Результаты экспериментов в системах с разрывными алгоритмами управления значительно превосходят наилучшие результаты, которые могут быть получены в новейших высокоточных электроприводах переменного тока известных мировых лидеров по продаже электротехнического оборудования. Так, только точность обработки сложных траекторий движения в сравнении с существующими САУ улучшена практически в десять раз и всё это в условиях действия как детерминированных, так и случайных возмущений при условии формирования необходимых динамических характеристик в различных режимах работы электропривода и значительном изменении его параметров. Особенностью установки является возможность реализации алгоритмов управления практически любой сложности и исключительно на программном уровне, что немаловажно и в учебном процессе. Это открывает широкие возможности при модернизации действующих электроприводов путём «безболезненного» перепрограммирования ПЧ.

Установка уже используется как полигон для апробации новых алгоритмов управления при подготовке аспирантов и магистров, а также при проведении практических и лабораторных работ по дисциплинам «Комплектные электроприводы» и «Системы оптимального и векторного управления электроприводами» при подготовке специалистов и магистров специальности 7.092203 и 8.092203 «Электромеханические системы автоматизации и электропривод». В ближайшее время планируется развить программную часть установки и отказаться от вынужденного промежуточного преобразования сигналов в аналоговую форму и обратно (а по сути, от платы PCI-1711) при передаче данных между процессорным модулем и управляющим ПК, посредством установки в CU320 дополнительного PROFINET-модуля SBE20 и организации системы клиент-сервер. Кроме того, планируется приобретение аппаратной платформы SIMOTION D425 для полноценного использования возможностей этой системы.

В настоящее время ведутся исследования новых fuzzy-разрывных и робастных алгоритмов управления различными электромеханическими системами, апробирована идея использования теории искусственных нейронных сетей для формирования и адаптации гиперповерхности скольжения в разрывных системах управления, исследованы новые разрывные алгоритмы идентификации, управления и наблюдения многомассовыми электромеханическими системами, в том числе и с использованием теории скользящих режимов высших порядков и т.п., что соответствует программам экспериментальных исследований диссертационных работ авторов.

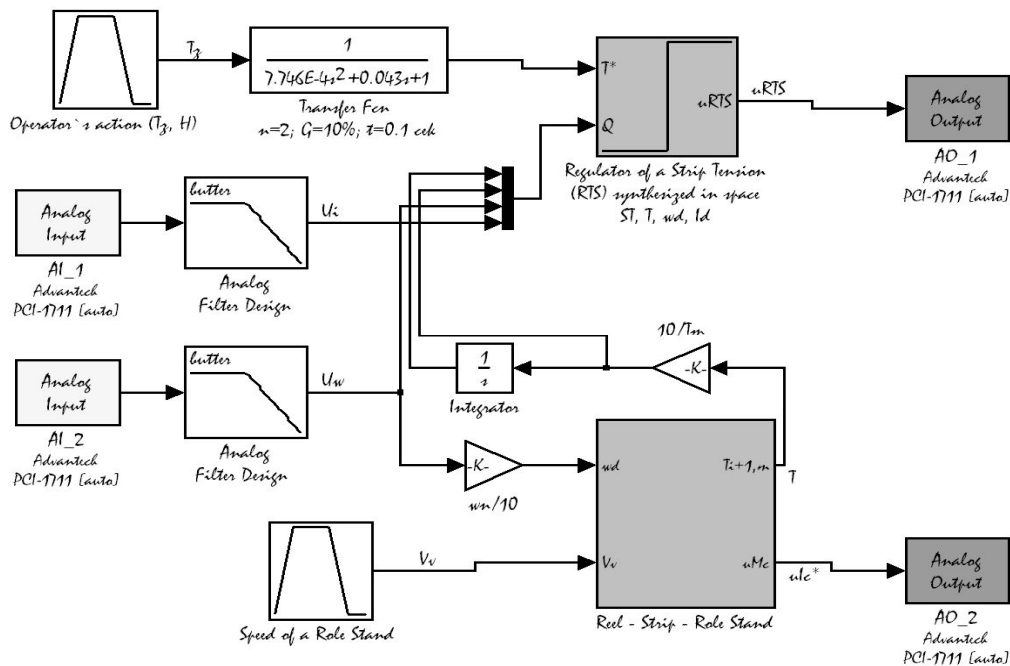


Рис.6. Simulink-модель управляющей программы

Список использованной литературы

1. Полилов Е.В. Практическая реализация разрывных алгоритмов в системах векторного управления синхронными электродвигателями / Е.В. Поли-

лов, А.М. Батрак, Е.С. Руднев // Вісн. Кременчуцьк. держ. ун-ту ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62). – Ч.1. – С.30-36.

2. Полилов Е.В. Практическая реализация и исследование разрывных алгоритмов управления синхронными электродвигателями / Е.В. Полилов, А.М. Батрак, Е.С. Руднев // Сб. науч. тр. Донбасского гос. технич. ун-та. – Алчевск: ДонГТУ. – 2010. – Вып. 31. – С.223-237.

3. Практическая реализация и исследование релейно-робастных алгоритмов управления синхронными электродвигателями / Е.В. Полилов, А.М. Батрак, А.И. Мотченко, Е.С. Руднев // Вісн. Нац. технич.ун-ту «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 28. – С.90-98.

4. Полилов Е.В. Практическая реализация разрывных алгоритмов в задачах управления автоматизированным синхронным электроприводом как средство при модернизации действующих электроприводов горно-металлургического комплекса / Е.В. Полилов, А.М. Батрак // Записки горного ин-та. – Санкт-Петербург: 2011.

5. Полилов Е.В. Разработка лабораторного макета для экспериментальных исследований электропривода моталок с различными системами оптимального релейного управления / Е.В. Полилов, А.Б. Зеленев, А.И. Мотченко // Електроромаш. та електрообладн. – К.: Техніка. – 2006. – С. 111-115.

6. Полилов Е.В. Особенности синтеза релейных САР натяжения полосы электропривода моталки НСХП без учёта упругости кинематических звеньев в пространстве исходных координат / Е.В. Полилов, А.Б. Зеленев, А.Г. Щёлоков // Вісн. Кременчуцьк. держ. політехн. ун-ту. – Кременчук: КДПУ. – 2004. – Вип. 2(25). – С. 57-61.

7. Real-Time Windows Target™ 3. User's Guide © COPYRIGHT 1999–2011 by The MathWorks, Inc.

8. SINAMICS S120/S150 List Manual. Edition: 11/2009.

9. SINAMICS/SIMOTION DCC editor Description. Programming and Operating Manual. Edition: 10/2008.

10. SINAMICS/SIMOTION Description of the standard DCC blocks. Function Manual. Edition: 10/2008.

11. SINAMICS Free function blocks. Function Manual. Edition: 11/2009.

12. SIMOTION SCOUT Communication. System Manual. Edition: 05/2009.

13. SIMOTION D4x5 Commissioning and Hardware Installation Manual. Edition: 08/2008.

14. System Identification Toolbox™ User's Guide. © COPYRIGHT 1988–2011 by The MathWorks, Inc.

Получено 12.07.2011



Полилов
Егор Владимирович,
к.т.н., доцент каф. АЭМС
ДонГТУ (г. Алчевск),
egor.polilov@gmail.com
моб.: (095) 808-29-15



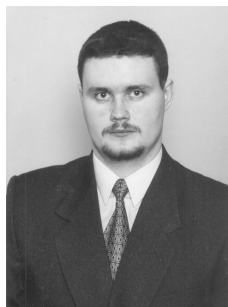
Батрак
Андрей Михайлович,
аспирант каф. АЭМС
ДонГТУ (г. Алчевск),
andrey_bat@rambler.ru
моб.: (099) 745-92-43



Руднев
Евгений Сергеевич,
ассистент каф. АЭМС
ДонГТУ (г. Алчевск),
rudnev_evgen@mail.ru
моб.: (050) 682-38-58



Скорик
Сергей Петрович,
аспирант каф. АЭМС
ДонГТУ (г. Алчевск),
skorik2007@mail.ru
моб.: (066) 420-14-84



Горелов
Павел Валерьевич,
ассистент каф. АЭМС
ДонГТУ (г. Алчевск),
darth_paul@pyramid.volvia.ua
моб.: (095) 334-27-87