

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНО-РОБАСТНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Введение. Современные требования к качеству готовой продукции и снижение затрат на её изготовление ставят новые задачи при проектировании систем управления технологическими процессами. Значительным резервом относительно выполнения этих требований, например, в металлургических технологических процессах является разработка и построение оптимальных электромеханических систем, обеспечивающих необходимые характеристики технологического оборудования. В первую очередь необходимо обеспечить функционирование технологического объекта в заданной точке или отработку заданной тахограммы движения, которые являются оптимальными с точки зрения сформированного критерия качества, в условиях действия как детерминированных, так и случайных возмущений, формирование необходимых динамических характеристик в различных режимах работы при наличии существенных нелинейностей и значительных изменений параметров, а также взаимных воздействий между отдельными подсистемами. Современная постановка задачи формирования динамики и статики электромеханических систем включает также и требования к инвариантности и робастности замкнутых систем относительно параметрических и координатных возмущений, характерных различным технологическим процессам. Эти задачи существенно усложняются при неполноте информации об объекте и изменении его параметров во времени.

Известно, что преднамеренная организация скользящих режимов в структурах систем управления, в том числе и различными электромеханическими объектами, позволяет обеспечить высокое качество процесса управления, инвариантность к внешним возмущениям, малую чувствительность к изменению динамических свойств объекта управления. Развитие теории систем с разрывными управлениями применительно к такому классу нелинейных систем позволяет разработать методы синтеза законов управления посредством преднамеренной организации скользящих режимов для данного конкретного класса систем с учетом их особенностей, то есть максимально использовать его особенности для достижения поставленных задач управления. Применительно к перспективным трехфазным автоматизированным синхронным электроприводам это означает обеспечение высокого качества управления, полное использование ресурса управления и связанное с этим близкое к предельному быстродействие системы управления, инвариантность к внешним возмущениям, малую чувствительность к изменениям динамических свойств объекта управления в сочетании с экономичностью.

На основании вышесказанного разработка новых и развитие существующих методов синтеза и анализа релейных систем управления различными электромеханическими объектами, надёжно функционирующими во всех режимах работы (в условиях действия значительных параметрических и координатных возмущений) и обеспечивающими формирование соответствующих динамических и статических характеристик системы с учётом ограничений на координаты – является актуальной проблемой. Основной задачей в рамках общей проблемы, на решение которой направлен проект, является развитие теории скользящих режимов, в том числе и скользящих режимов высших порядков путём интегрирования в них методов робастного управления, а именно методов Н-теории, μ -анализа и синтеза, LMI-теории (теории линейных матричных неравенств). Результаты теории будут использованы для синтеза систем управления, а также построения наблюдателей состояния различными функционально и параметрически неопределёнными электромеханическими объектами.

Анализ предыдущих исследований. Среди отечественных ученых, занимающихся исследованием различных электромеханических объектов с робастными системами управления, следует отметить проф., д-ра техн. наук Кузнецова Б.И. (УИПА, г. Харьков). В работах этой школы, в частности, рассмотрен синтез цифровых робастных систем для многоканальных электромеханических систем. Теория скользящих режимов и применения релейных управлений в электроприводах переменного тока активно разрабатывается и проводится под руководством проф., д-ра техн. наук Садового О.В. (ДГТУ, г. Днепропетровск). Эти разработки большей частью касаются повышения точности регулирования фазовых координат приводов переменного тока, оптимизации динамических режимов и уменьшения амплитуды высокочастотных пульсаций выходных токов преобразователя. Теория скользящих режимов, в том числе и системы с переменной структурой разрабатываются выходцами бывшего СССР под руководством С.В. Емельянова, В.И. Уткина, Ю.В. Орлова и др.

Кафедра АЭМС ДонГТУ имеет значительный опыт и научные достижения в теории релейного оптимального управления электроприводами постоянного и переменного тока. На протяжении уже более сорока лет под руководством проф., д-ра техн. наук Зеленова А.Б. разрабатываются и исследуются релейные системы управления разнообразными электромеханическими объектами. На кафедре также активно развивается новое научное направление – разработка и исследование высокоточных релейно-робастных систем управления функционально и параметрически неопределёнными электромеханическими объектами, в частности для электроприводов переменного тока, многомассовой электромеханической системой со сложной кинематической структурой (учёт упругих свойств связей, зазоров в механических передачах, явлений удара, автоколебаний) и т.п.

Цель работы (на данном этапе). Создание универсального стенда для апробирования, практической реализации и исследования новых робастных и разрывных релейно-робастных алгоритмов управления функционально и параметрически неопределёнными электромеханическими объектами.

Материал и результаты исследования. Далее показана возможность практической реализации разрывных алгоритмов для управления синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ) и питания от преобразователя частоты серии Sinamics s120 концерна Siemens, являющегося ключевым элементом созданной лабораторной установки (см. рис. 1).

В состав силовой/аппаратной части установки входят:

- синхронный серводвигатель с возбуждением от постоянных магнитов номинальной мощностью 1,5 кВт и частотой вращения 3000 об/мин со встроенным инкрементальным датчиком (2048 имп/об);
- выпрямительный модуль Smart Infeed;
- инверторный/двигательный модуль;
- блок управления CU320 частотным преобразователем и базовая панель оператора BOP20;
- линейный реактор, коммутационная аппаратура, силовой кабель и кабели связи, блоки питания управляющей электроники;
- программируемый контроллер s7-300, офисный ПК на базе процессора Intel, модуль связи MPI-USB.

Отличительной особенностью лабораторной 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, построенных из функциональных блоков с изменяемыми параметрами и системы связи между этими блоками [1]. Для того 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), могут быть реализованы системы слежения и позиционирования, системы стабилизации скорости, системы регулирования с внешним технологическим регулятором и т.п., к преобразователю могут быть подключены асинхронная машина с короткозамкнутым ротором, синхронная машина с постоянными магнитами или с обмоткой возбуждения в роторе, реактивный, линейные асинхронный и синхронный двигатели, и, что немаловажно, ни аппаратная, ни программная части преобразователя при этом не изменяются. Для понимания последующего материала и корректной оценки полученных результатов, рекомендуем обратиться к следующей документации [1-4].



Рис. 1 Преобразователь Sinamics s120, входящий в состав созданной лабораторной установки

Математическая модель СМПМ. Запишем уравнения напряжений в ортогональной системе координат dq , жёстко связанной с ротором СМПМ [5, 6]:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - p_0 \omega_{rm} \Psi_q; \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + p_0 \omega_{rm} \Psi_d, \end{cases} \quad (1)$$

и уравнения потокосцеплений:

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f; \\ \Psi_q = L_q i_q; \end{cases} \quad (2)$$

где $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_d, \Psi_q$ – напряжения, токи и потокосцепления в системе координат ротора;

R_s – сопротивление фазы статора, Ом;

L_d и L_q – полные индуктивности продольной (d) и поперечной (q) оси, Гн;

Ψ_f – потокосцепление постоянных магнитов на роторе, постоянная величина, рассматриваемое как потокосцепление обмоток фаз статора;

p_0 – число пар полюсов машины;

Уравнение движения ротора (механическое состояние СМПМ):

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J} (M_\varepsilon - M_{мех}); \\ \frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\omega_{rm} = \omega_r / p_0$ – механическая угловая частота вращения ротора, рад/с;

J – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу машины, кг·м²;

M_ε – электромагнитный момент, Нм;

$M_{мех}$ – механический момент, приложенный к валу машины как заданная функция времени, Нм;

$\omega_r = d\theta_r / dt = p_0 \omega_{rm}$ – электрическая угловая скорость ротора, эл. рад/с;

θ_{rm} – механический угол поворота ротора, измеряемый в геометрических радианах;

$\theta_r = p_0 \theta_{rm}$ – электрический угол поворота ротора, измеряемый в электрических радианах.

Выражение электромагнитного момента СМПМ, полученное из выражения полной мощности машины, составляющие которой приведены к вращающейся системе координат ротора [7]:

$$M_\varepsilon = \frac{3}{2} p_0 (\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q). \quad (4)$$

Выбирая (i_d, i_q, ω_{rm}) в качестве переменных состояния, получим систему дифференциальных уравнений, описывающую синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов в роторе:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J} (M_\varepsilon - M_{мех}); \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + p_0 \omega_{rm} \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - p_0 \omega_{rm} \frac{L_d}{L_q} i_d - p_0 \omega_{rm} \frac{\Psi_f}{L_q} + \frac{1}{L_q} u_q. \end{cases} \quad (5)$$

На основании уравнений (4) – (5), описывающих динамику СМПМ в ортогональной системе координат dq , жёстко связанной с ротором машины, получена и на рис. 2 представлена структурная схема СМПМ как объекта управления (ОУ). На рис. 3 представлена структурная схема канала регулирования скорости двигателя, полученная в результате линеаризации и декомпозиции системы (разделения процессов по темпам их протекания). Для этого случая система линейных дифференциальных уравнений, описывающая СМПМ в канале моментобразующей составляющей i_q статорного тока:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J} (M_\varepsilon - M_{мех}); M_\varepsilon = k_t i_q, \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (R_s i_q - k_e \omega_{rm} + u_q); \end{cases} \quad (6)$$

Покажем возможность практической реализации разрывных алгоритмов управления на примере следующего закона (для синтеза контуров регулирования использован метод релейно-модального управления [8, 9]):

$$U(\bar{\eta}) = -\text{sign}(\bar{\delta}^T \bar{\eta}) = -\text{sign}[\bar{\delta}^T y - \bar{m}_{11} y_1^* k^T p], \quad (8)$$

где $p = [1 \quad p \quad \dots \quad p^{n-1}]$ – векторный оператор дифференцирования;

$\bar{\delta}^T = k^T M^{-1} = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_n]$ – искомый вектор коэффициентов обратных связей;

$k^T = [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n]$ – вектор коэффициентов релейного регулятора в фазовом пространстве канонических координат ЭП, определяемый на основе желаемого характеристического полинома (ХП) (n-1)-ой степени:

$$H_{\text{ж}}(p) = p^{n-1} + A_{n-2} \omega_0 p^{n-2} + \dots + \omega_0^{n-1}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} k_n = 1; k_{n-1} = A_{n-2} \omega_0; k_{n-2} = A_{n-3} \omega_0^2; \\ \dots \\ k_2 = A_1 \omega_0^{n-2}; k_1 = \omega_0^{n-1}; \end{cases} \quad (10)$$

A_1, \dots, A_{n-2} – коэффициенты нормированного желаемого ХП [10, 11];

ω_0 – среднегеометрический корень, закладываемый при синтезе релейно-модальной САР (РМСАР);

$\bar{m}_{11} = e_1^T M^{-1}$ – первая компонента обратной преобразующей матрицы M^{-1} ;

M – преобразующая матрица, которая может быть определена на основе матрицы управляемости R и коэффициентов характеристического полинома системы $\det[pE - A] = g_n p^n + \dots + g_1 p + g_0$ в виде:

$$M = R \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_{n-1} & g_n \\ g_2 & g_3 & \dots & g_n & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n-1} & g_n & \dots & 0 & 0 \\ g_n & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Обобщённая структурная схема РМСАР, синтезированной в фазовом пространстве исходных координат для объекта управления n-го порядка, представлена на рис. 4. Здесь пунктиром показаны интегральные связи, которые на этапе синтеза могут быть введены в исходное математическое описание объекта управления для придания системе (r+1)-го порядка астатизма по задающему (r-го по возмущающему) воздействиям.

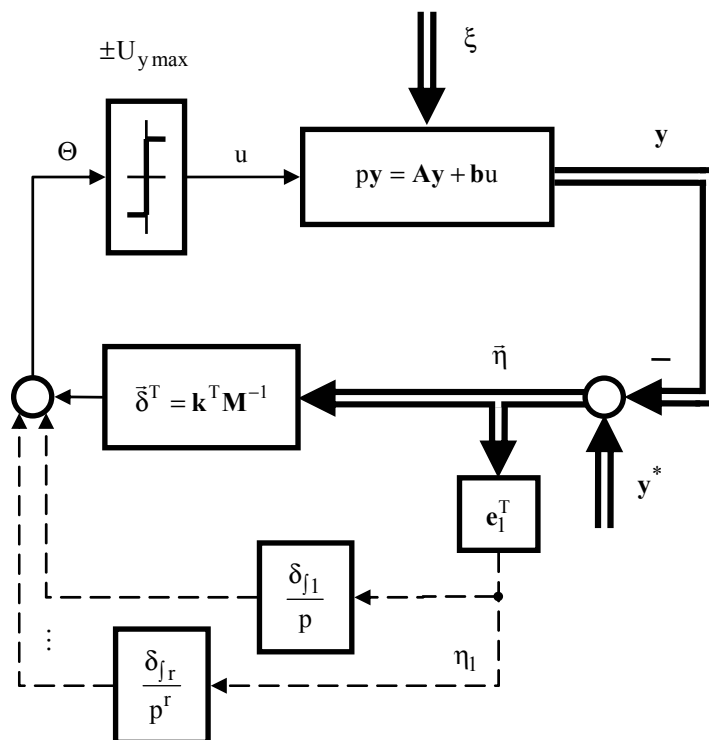


Рис. 4 Структурная схема РМСАР (фазовое пространство исходных координат)

На первом этапе нами построена «скоростная система» с программно реализованными разрывными регуляторами скорости, синтезированными в различных фазовых пространствах. Результаты исследования электропривода с релейным регулятором скорости, синтезированным в фазовом пространстве исходных координат с введением дополнительного сигнала рассогласования $\int(\omega_{rm}^* - \omega_{rm})dt$ и реализованном при помощи технологии DCC представлены на рис. 6. На вход PMCAP от внутреннего генератора формировались сигналы задания на скорость различной формы, амплитуды и частоты. По сути, электропривод работал в режиме слежения за заданной траекторией. На рис. 6, 7 красным цветом представлен сигнал задания в контур регулирования скорости, серым – реальная скорость машины и жёлтым – сигнал рассогласования по скорости. Вследствие достаточно длительного такта просчёта DCC структур – 1 мс, в регуляторе скорости частота скользящего режима не достигала и 1 кГц. В связи с этим и вследствие малой инерционности самой машины, внутренний подчинённый контур моментобразующей составляющей статорного тока «успевал обрабатывать» эти «медленные» изменения выходного напряжения регулятора скорости, что проявляется в т.н. «эффekte дрожания» скорости.

Отметим, что нам удалось реализовать разрывные алгоритмы с тактом просчёта 62,5 мкс на базе т.н. технологического регулятора, входящего в состав прошивки базового программного обеспечения. Идея, на основе которой это удалось сделать, состоит в том, что пропорциональная часть технологического регулятора была увеличена до максимального значения при ограничении выходного сигнала регулятора на заданном уровне (по сути – в контуре был реализован «бесконечный» коэффициент усиления). Техническая реализация этого варианта оказалась достаточно сложна, поскольку в распоряжении у пользователя нет свободных функциональных блоков прошивки с желаемым тактом просчёта, которые можно было бы задействовать для реализации заданного алгоритма, а в этом есть необходимость, поскольку, как видно из выражения (8) подсигнатурная функция значительно отличается от типового ПИД-закона регулирования, реализованного в технологическом регуляторе. Техническая сторона этого вопроса может быть интересна лишь узкому кругу специалистов и выходит за рамки данной статьи. Обсуждение возможности реализации разрывных алгоритмов, основные результаты, полученные в экспериментальной установке авторами вынесены в соответствующем топике на форуме сайта департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» Siemens-Россия, адрес в сети Internet: <http://automation-drives.ru/forum/> (тема – Sinamics s120 и DCC в разделе Приводная техника, преобразователи переменного тока).

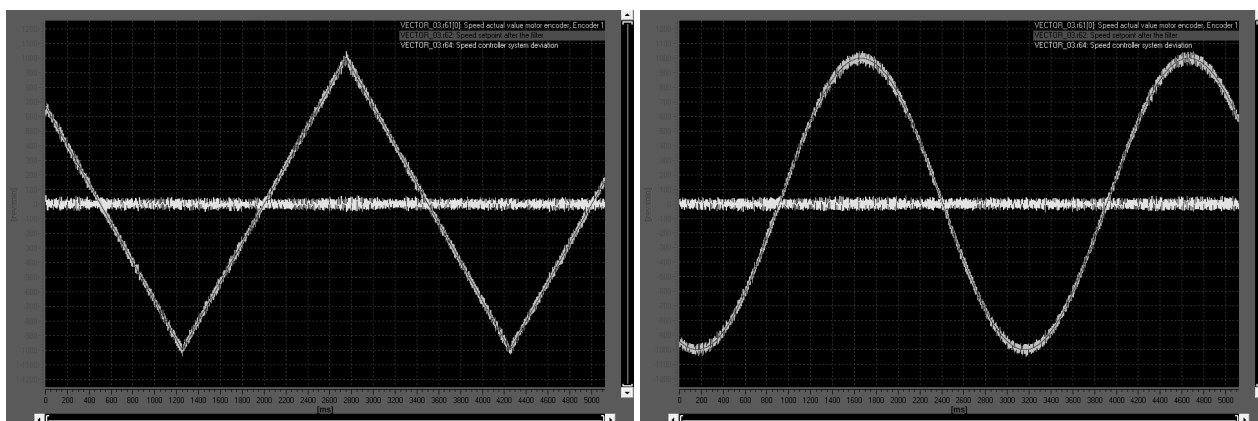


Рис. 6 Результаты работы электропривода с предлагаемым алгоритмом управления (программно реализован релейный регулятор скорости; такт просчёта DCC контуров 1 мс)

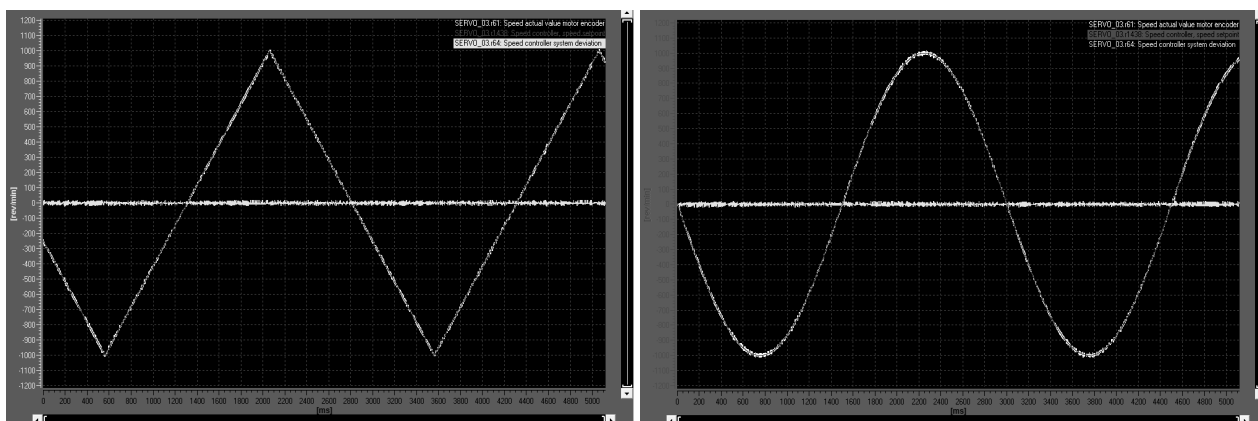


Рис. 7 Результаты работы электропривода с предлагаемым алгоритмом управления (программно реализован релейный регулятор скорости; такт просчёта контуров 62,5 мкс)

Результаты работы электропривода с реализованными разрывными алгоритмами на базе технологического регулятора представлены на рис. 7 – 10. Из графиков видно, что за счёт столь значительного уменьшения времени такта просчёта релейных регуляторов, в системе практически в несколько раз уменьшился «эффект дрожания» скорости, повысилась точность обработки заданных тахограмм движения электропривода. Отметим, что за счёт максимального приближения технологического регулятора к чистой знаковой функции (за счёт уменьшения величины ограничения выходного сигнала и последующего его умножения на большую величину) нам удалось на порядок улучшить результаты. Как видно из представленных диаграмм, сигналы задания и реальной скорости СМПП практически сливаются. Частота скользящего режима в контуре регулирования скорости при этом около 10 кГц. Как следует из рис. 9 ошибка регулирования скорости в режиме слежения снижена более чем на порядок, и точность воспроизведения заданной траектории превосходит наилучшие результаты, которые могут быть получены при работе преобразователя в Servo-режиме с импульсным датчиком скорости для базовой прошивки CU320, представленные на рис. 9.

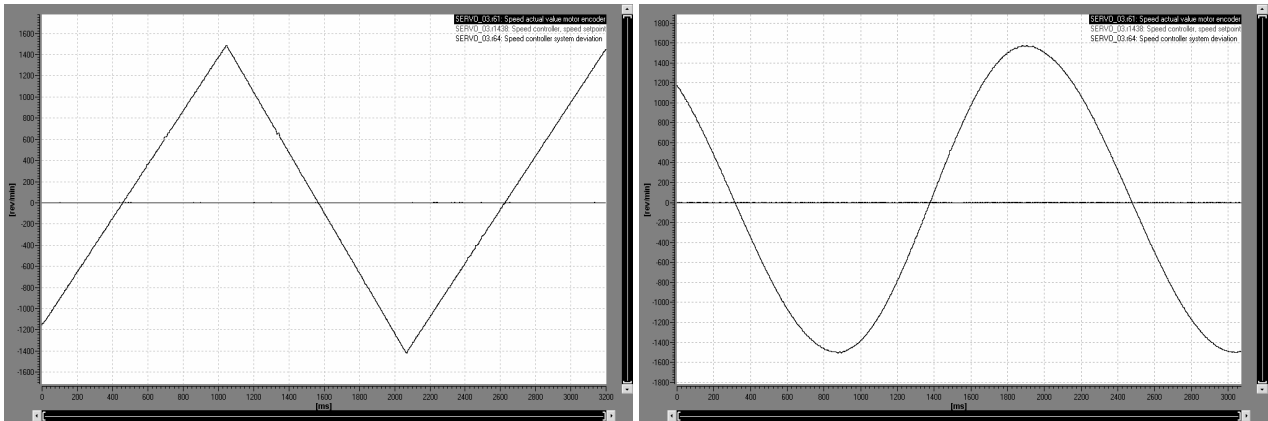


Рис. 8 Результаты работы электропривода с предлагаемым алгоритмом управления (программно реализован релейный регулятор скорости; такт просчёта контуров 62,5 мкс)

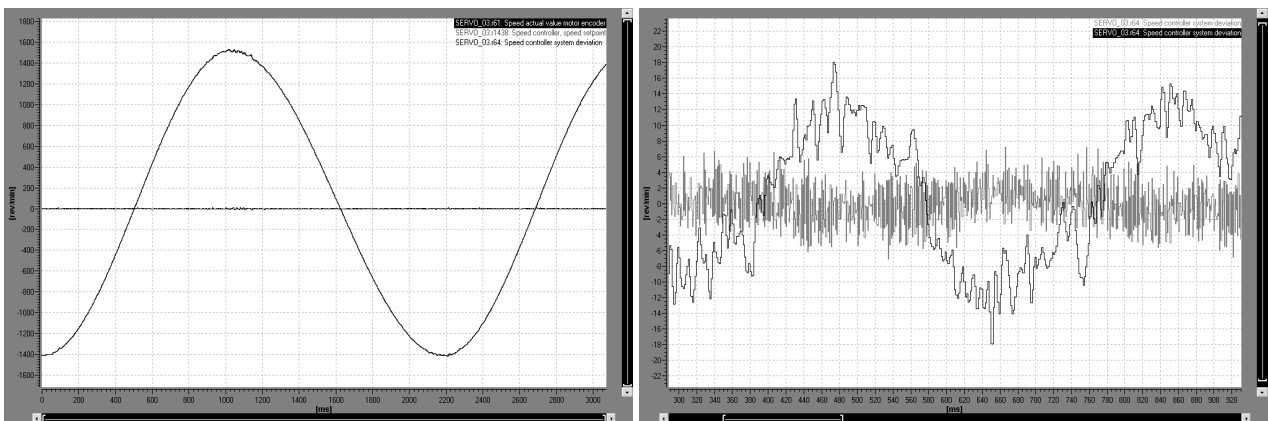


Рис. 9 Работа преобразователя в серво-режиме с базовой прошивкой CU320 (такт просчёта контуров 62,5 мкс)

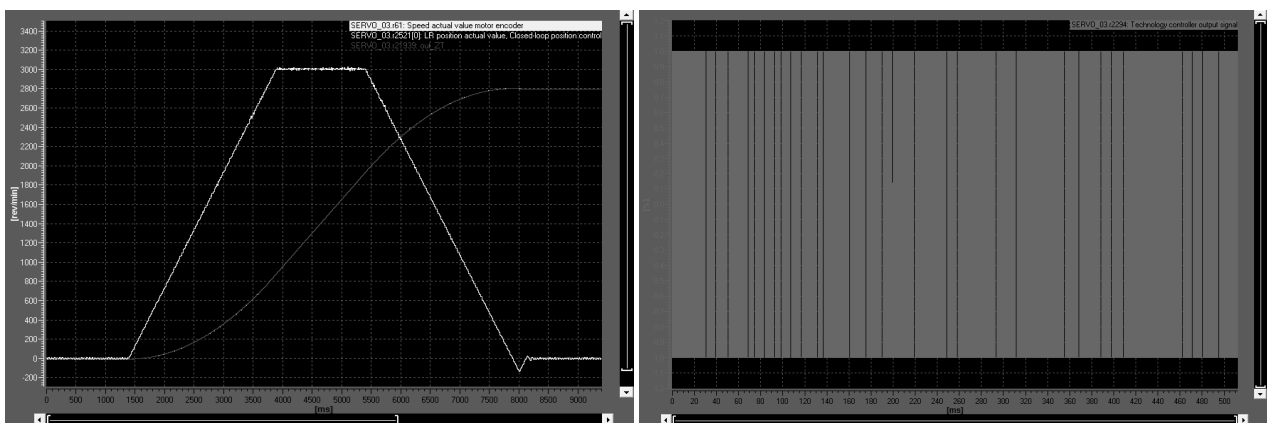


Рис. 10 Результаты работы электропривода с предлагаемым алгоритмом управления (программно реализован релейный регулятор положения; такт просчёта контуров 62,5 мкс)

Выводы. Создан универсальный стенд для апробирования, практической реализации и исследования новых релейно-робастных алгоритмов управления функционально и параметрически неопределёнными электромеханическими объектами. Предложены и реализованы в реальном железе разрывные алгоритмы релейного векторного управления синхронными машинами, проведены экспериментальные исследования работы электропривода в режимах стабилизации скорости СМППМ, позиционирования и слежения за заданной траекторией. Результаты экспериментов в системах с синтезированными разрывными алгоритмами управления *значительно превосходят* наилучшие результаты, которые могут быть получены, например, в новейших высокоточных электроприводах переменного тока серии Sinamics s120 известного мирового лидера по продаже электротехнического оборудования концерна Siemens. Так, только точность отработки сложных траекторий движения в сравнении с существующей 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. Это открывает широкие возможности при модернизации действующих электроприводов с данными преобразователями частоты путём их «безболезненного» перепрограммирования. Особенностью созданной лабораторной установки является возможность реализации в системе регулирования преобразователя частоты алгоритмов управления практически любой сложности и исключительно на программном уровне, что немаловажно в учебном процессе. Лабораторная 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 стенд будет доработан путём объединения на общем валу рассмотренного синхронного серводвигателя и асинхронной короткозамкнутой машины с питанием от отдельного преобразователя частоты серии Sinamics G110.

ЛИТЕРАТУРА

1. SINAMICS S120/S150 List Manual. Edition: 11/2009.
2. SINAMICS/SIMOTION DCC editor Description. Programming and Operating Manual. Edition: 10/2008.
3. SINAMICS/SIMOTION Description of the standard DCC blocks. Function Manual. Edition: 10/2008.
4. SINAMICS Free function blocks. Function Manual. Edition: 11/2009.
5. Полилов Е.В. Разработка математической модели и моделирование явнопольных синхронных машин в фазных координатах / Е.В. Полилов, А.Г. Щёлоков, Е.С. Руднев, А.Н. Степанов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008, № 30. – С. 207-210.
6. Полилов Е.В. Разработка Simulink-моделей и моделирование явнопольных синхронных машин в ортогональных координатах / Е.В. Полилов, А.И. Мотченко, А.Н. Степанов, Е.С. Руднев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. Вип. 4/2009 (57) частина 1. – С.102-106.
7. Chee-Mun Ong. Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1997. - 626 p.
8. Зеленов А.Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з електромашинними, електромагнітними та імпульсними перетворювачами: Навч. посібн. / А.Б. Зеленов, І.С. Шевченко, В.П. Яблонь, М.Г. Нікітін – Алчевськ: ДонДТУ, 2007. – 373 с.
9. Полилов Е.В. Выбор характеристического полинома и исследование влияния величины среднегеометрического корня на свойства многомассовой электромеханической системы с релейно-модальным управлением / Е.В. Полилов, А.И. Мотченко, А.Г. Щёлоков, П.В. Горелов // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С.50-58.
10. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
11. Голочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: Навч. посібн. – Донецьк: Норд-Прес, 2004. – 298 с.