

*к.т.н. Полилов Е.В.,
Руднев Е.С.,
Батрак А.М.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЫВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Показано можливість створення універсального стенду для практичної реалізації та дослідження нових релейно-робастних алгоритмів керування функціонально й параметрично невизначеними електромеханічними системами на базі електроприводу змінного струму. На програмному рівні реалізовано розривні керування для управління синхронної машини зі збудженням від постійних магнітів при живленні від перетворювача частоти Sinamics s120.

***Ключові слова:** розривне керування, ковзний режим, синхронний електропривод.*

Показана возможность создания универсального стенда для практической реализации и исследования новых релейно-робастных алгоритмов управления функционально и параметрически неопределёнными электромеханическими системами на базе электропривода переменного тока. На программном уровне реализованы разрывные алгоритмы для управления синхронной машиной с возбуждением от постоянных магнитов при питании от преобразователя частоты Sinamics s120.

***Ключевые слова:** разрывное управление, скользящий режим, синхронный электропривод.*

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 необходимо использовать 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 оптимального релейного управления электроприводами постоянного и переменного тока. На протяжении уже более сорока лет под руководством проф., д.т.н. Зеленова А.Б. разрабатываются и исследуются релейные системы управления разнообразными электромеханическими объектами. Под руководством докторанта Полилова Е.В. на кафедре 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 на базе синхронной машины, 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 (рисунок 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.



Рисунок 1 – Преобразователь Sinamics s120, входящий в состав созданной универсальной лабораторной установки

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.

Реализация разрывных алгоритмов управления синхронной машиной с возбуждением от постоянных магнитов на базе созданной лабораторной установки стала возможной благодаря технологии программирования DCC (Drive Control Charts) [2, 3], используемой исключительно в этой серии преобразователей, а также технологии т.н. свободных функциональных блоков [4]. Программирование, а точнее реализация той или иной структуры в систему 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. Как результат, на рисунке 2 представлен вариант реализации релейных регуляторов скорости в двух фазовых пространствах, а именно, в фазовых пространствах исходных и канонических координат. Единственным ограничением данной технологии является то, что величина такта расчёта DCC структур в CU320 составляет 1 мс, в то время как такт расчёта контуров системы управления в режимах Servo и Vector напрямую зависит от устанавливаемой частоты ШИМ инвертора и требуемой точности поддержания координат электропривода. Так, например, для частоты ШИМ в 16 кГц такт расчёта контуров базовой системы управления составляет 62,5 мкс. Максимальная частота ШИМ для прошивки CU320 последней версии – составляет 32 кГц, таким образом, в случае необходимости, может быть достигнут и в два раза меньший такт.

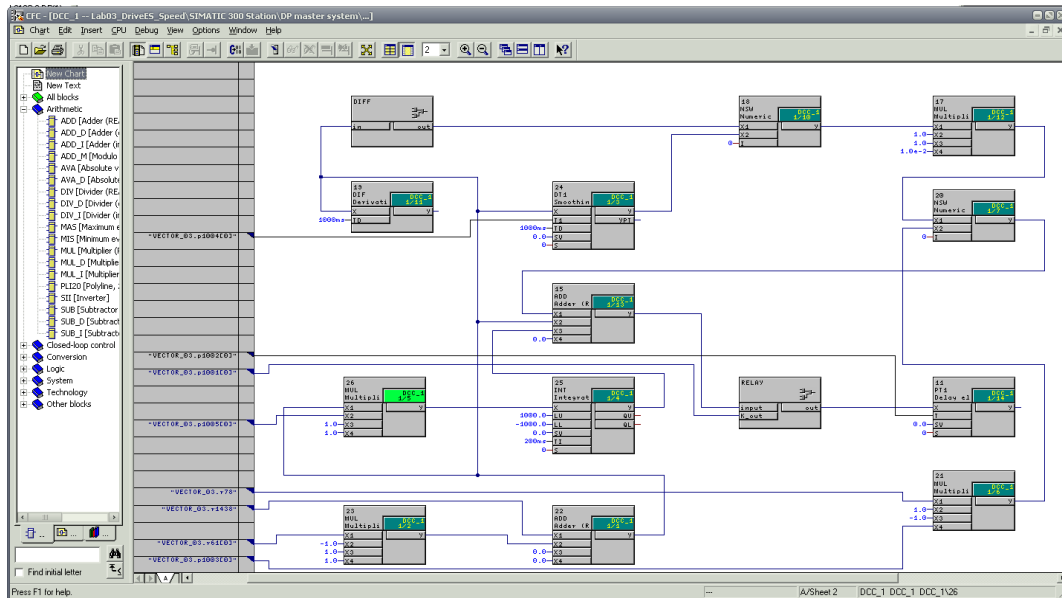


Рисунок 2 – Редактор DCC с программно реализованными релейными РС

При практической реализации разрывных управлений нами учтён тот факт, что САР скорости СМПМ уже содержит внутренний контур регулирования q -составляющей статорного тока. В базовой прошивке преобразователя этот контур реализован с пропорционально–интегральным регулятором. Изменить 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 разрывного алгоритма лишь в канале регулирования скорости без изменения структуры регулятора q -составляющей статорного тока и алгоритмов переключения силовых ключей инвертора. На самом деле, 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, в-третьих, ввиду того, что частота ШИМ есть конкретная 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.

Итак, в соответствии с методом релейно-модального управления [5, 6] алгоритм релейного регулятора скорости СМППМ в фазовом пространстве исходных координат:

$$U(\boldsymbol{\eta}) = -\text{sign}[\boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{\eta}], \quad (1)$$

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

$\boldsymbol{\delta}^T = \mathbf{k}^T \mathbf{M}^{-1}$ – вектор коэффициентов обратных связей;

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

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

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

где A_1, \dots, A_{n-2} – коэффициенты желаемого ХП [7, 8];

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

\mathbf{M} – преобразующая матрица, которая может быть определена на основе матрицы управляемости $\mathbf{R} = [\mathbf{b} \mid \mathbf{A}\mathbf{b} \mid \dots \mid \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b}]$ и коэффициентов характеристического полинома системы $\det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}] = g_n p^n + \dots + g_1 p + g_0$ в виде:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_{n-1} & g_n \\ g_2 & g_3 & \dots & g_n & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n-1} & g_n & \dots & 0 & 0 \\ g_n & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

\mathbf{A} , \mathbf{b} – матрица динамики объекта управления и вектор-столбец коэффициентов управления.

Структурная схема РМСАР, синтезированной в фазовом пространстве исходных координат для объекта управления n -го порядка, представлена на рисунке 3. Здесь пунктиром показаны интегральные связи, которые при необходимости 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. Отметим, что вектор y^* задающих воздействий формируется задатчиком траекторий движения с заданным характером изменения регулируемой координаты, собранный нами в виде подсистемы с использованием технологии DCC.

Результаты исследования электропривода с разрывными алгоритмами управления, реализованными при помощи технологии DCC представлены на рисунке 4. Здесь красным цветом представлен сигнал задания в контур регулирования скорости, серым – реальная скорость машины и жёлтым – сигнал рассогласования по скорости. Отметим, что вследствие достаточно длительного такта просчёта DCC структур – 1 мс, в регуляторе скорости частота скользящего режима не достигает и 1 кГц. В связи с этим и вследствие малой инерционности самой машины, внутренний подчинённый контур моментобразующей составляющей статорного тока «успевает обрабатывать» эти «медленные» изменения выходного напряжения регулятора скорости, что проявляется в т.н. «эффекте дрожания» скорости.

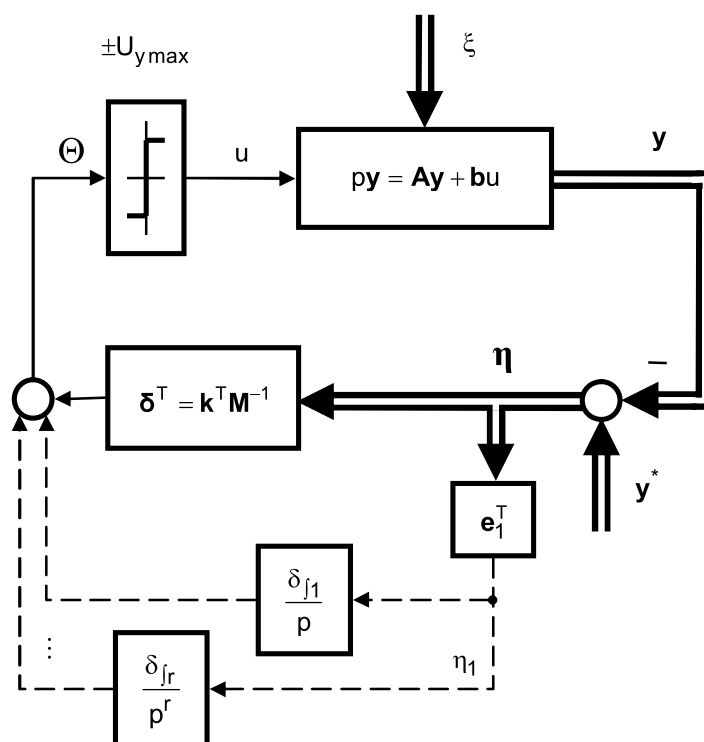


Рисунок 3 – Структурная схема РМСАР

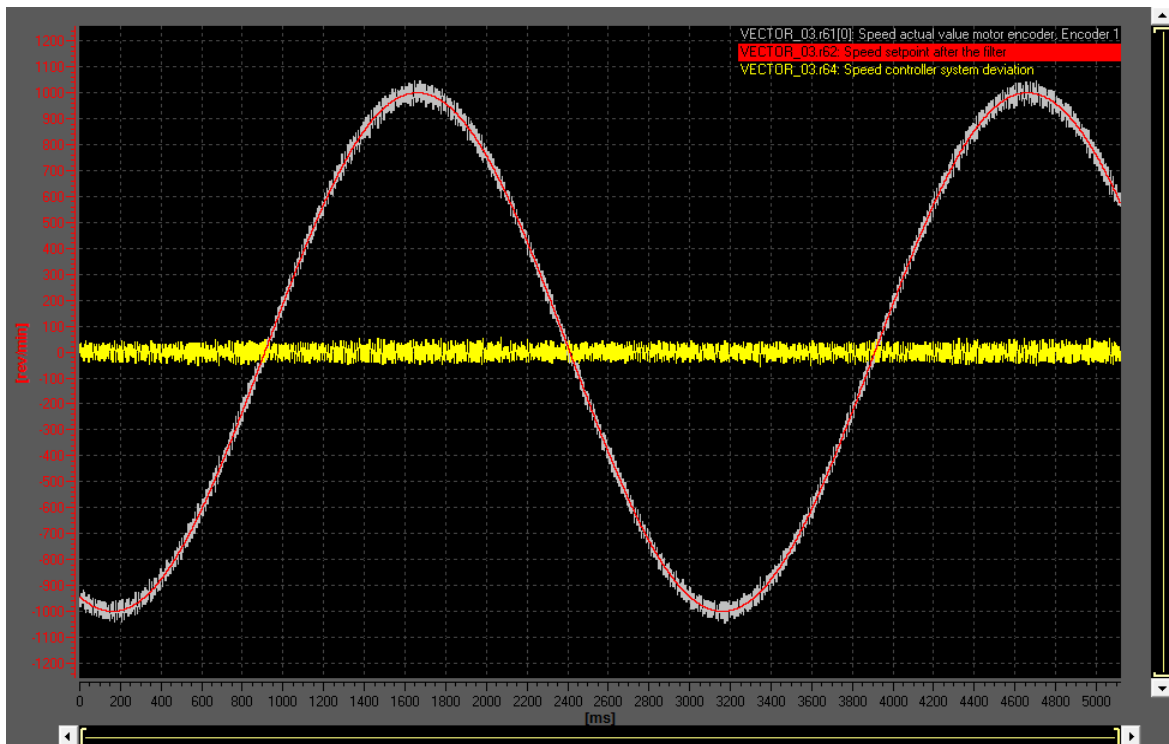
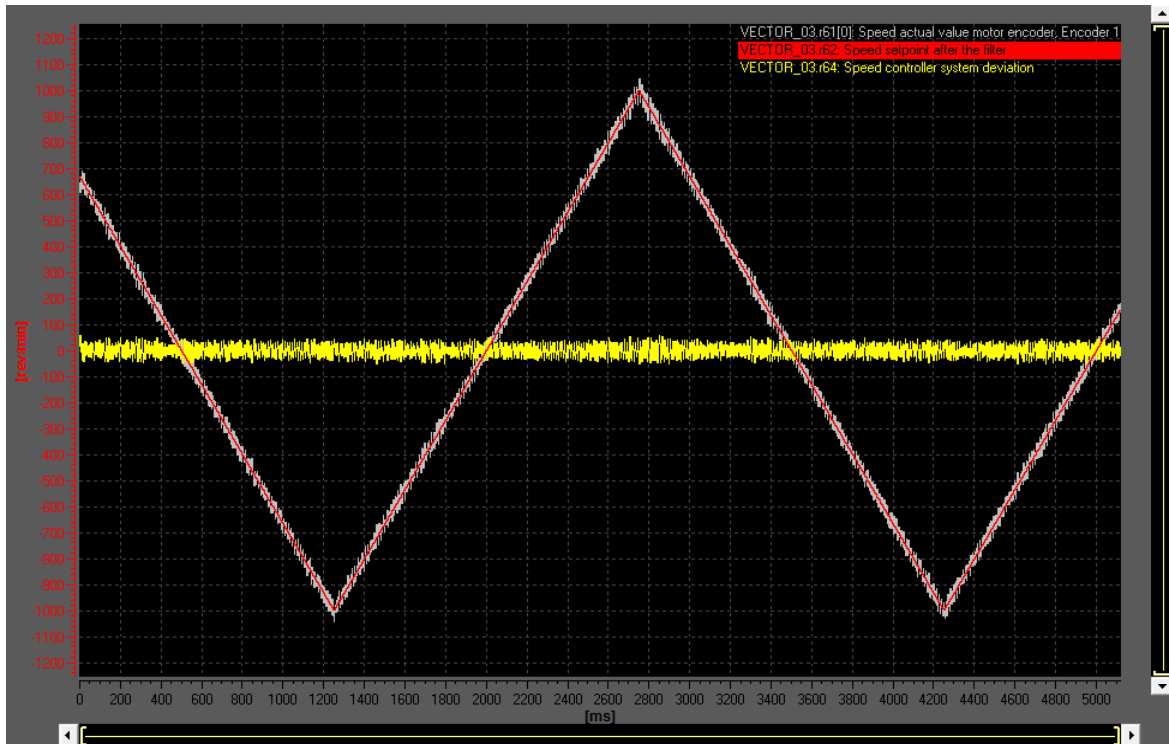


Рисунок 4 – Результаты работы электропривода с предлагаемыми разрывными алгоритмами управления (фазовое пространство естественных координат) такт подсчёта DCC регулятора скорости – 1 мс

Отметим, что нам удалось реализовать релейный регулятор скорости 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). Следует отметить, что 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 (1) 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).

Результаты работы электропривода с реализованными релейными алгоритмами на базе технологического регулятора представлены на рисунках 5, 6. Из графиков видно, что за счёт столь значительного уменьшения времени такта в релейных регуляторах, в системе практически в несколько раз уменьшился «эффект дрожания» скорости, повысилась точность отработки 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. Частота скользящего режима в контуре регулирования скорости при этом около 10 кГц. Как следует из рисунка 5 ошибка регулирования скорости 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 рисунке 7.

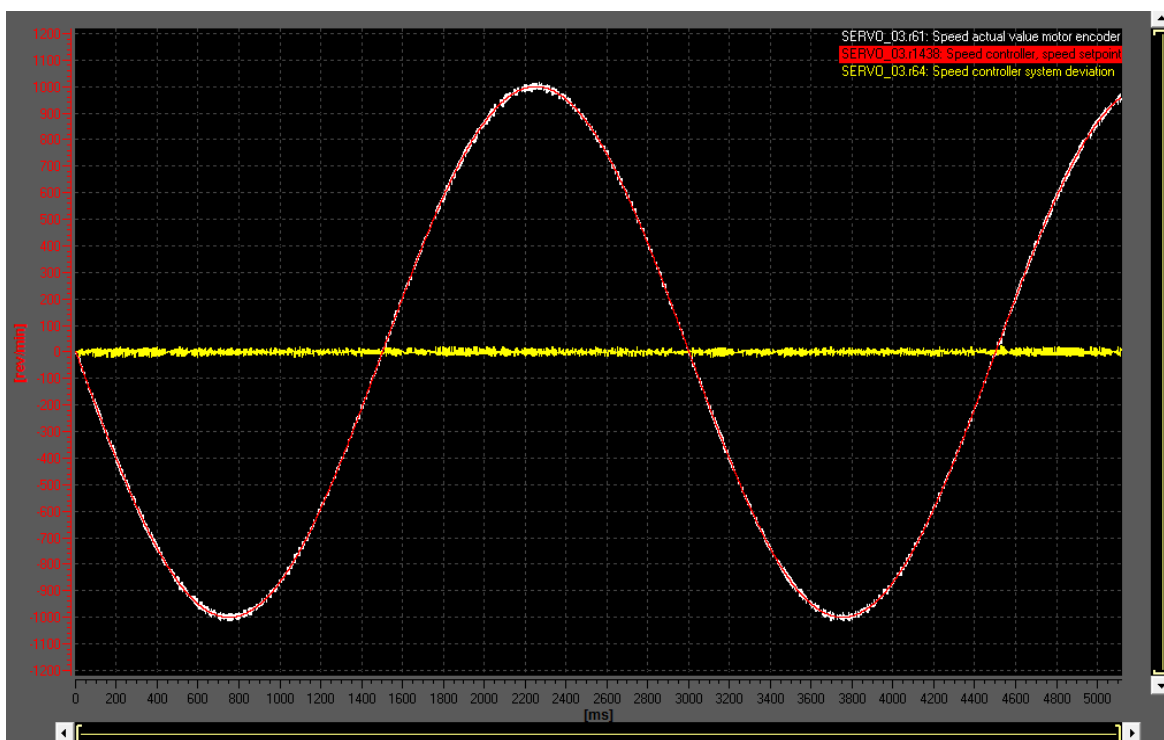
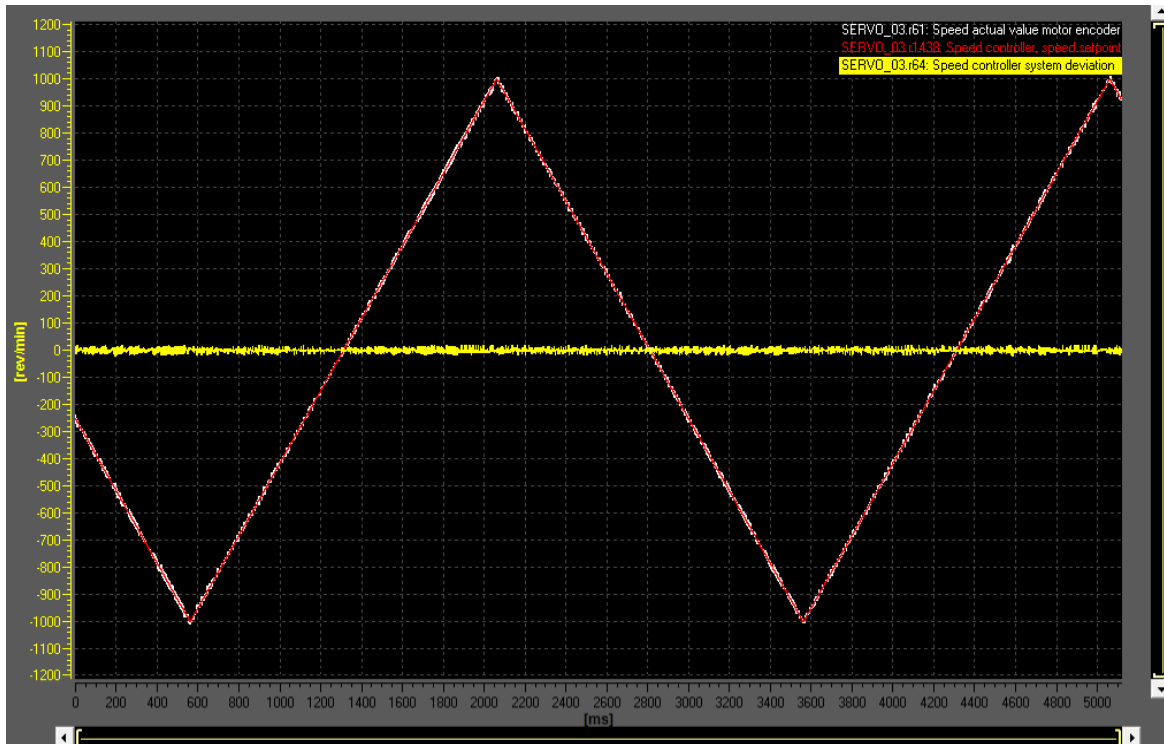


Рисунок 5 – Результаты работы электропривода с предлагаемыми разрывными алгоритмами управления (фазовое пространство естественных координат) такт просчёта контуров регулирования – 62,5 мкс

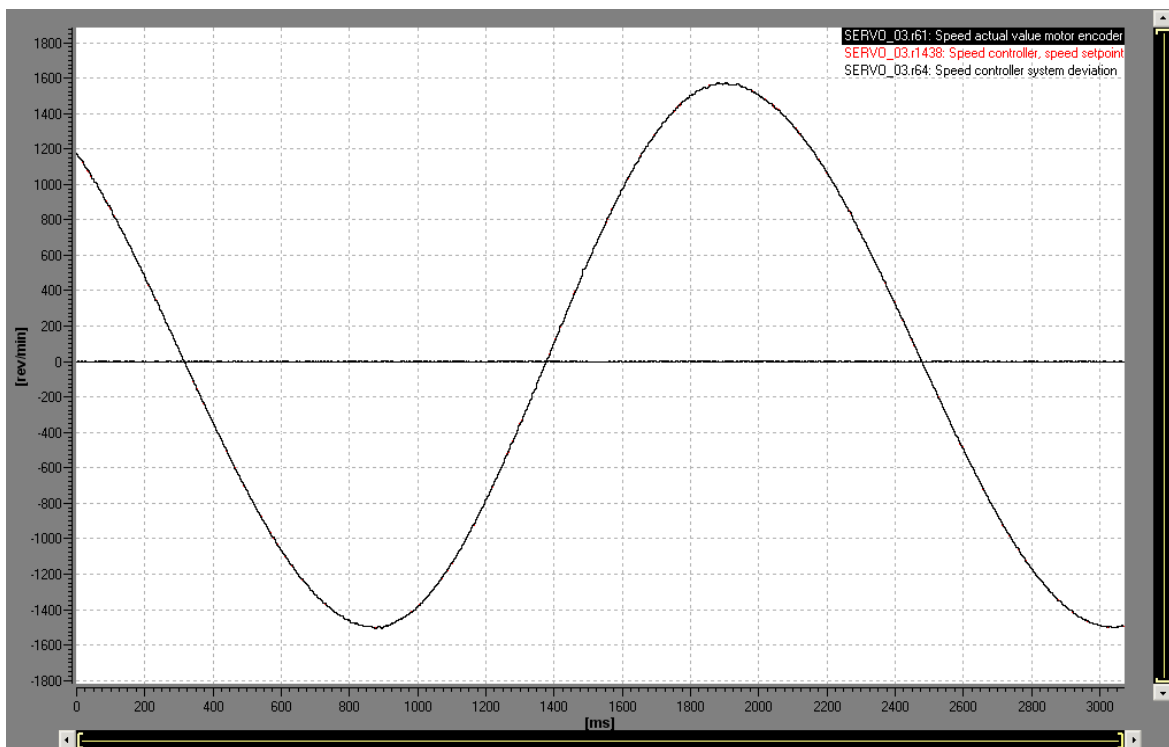
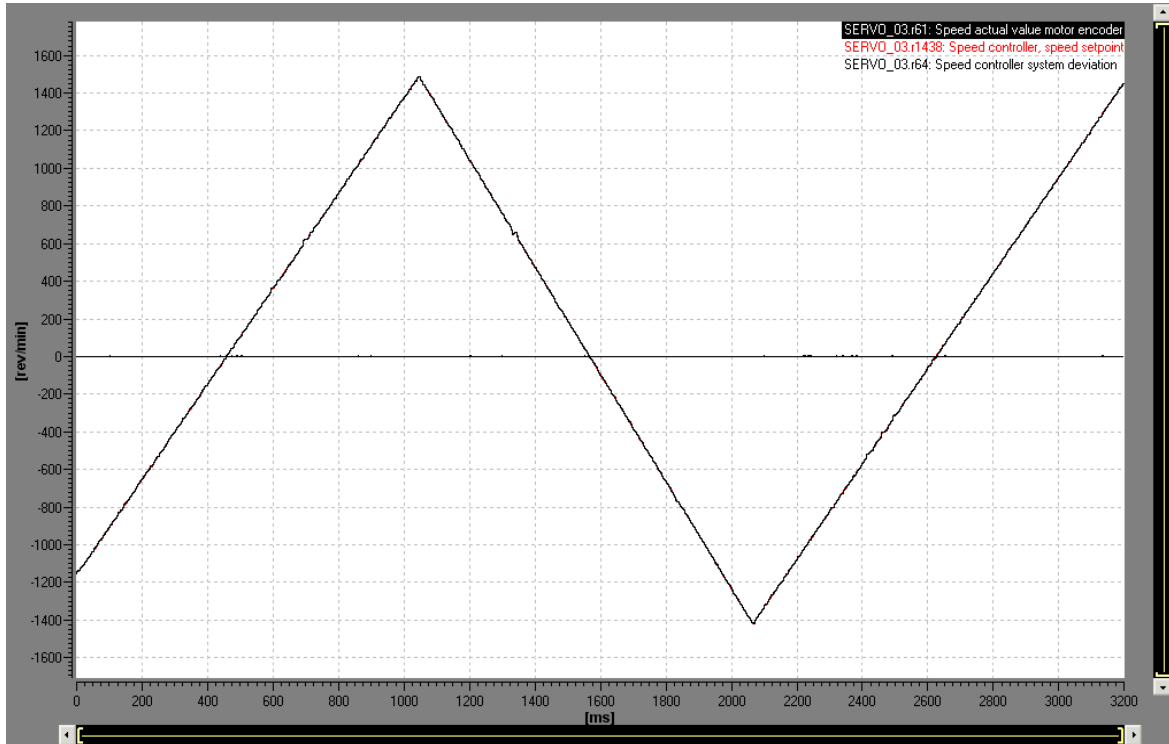


Рисунок 6 – Результаты работы электропривода с предлагаемыми разрывными алгоритмами управления (фазовое пространство естественных координат) такт просчёта контуров регулирования – 62,5 мкс

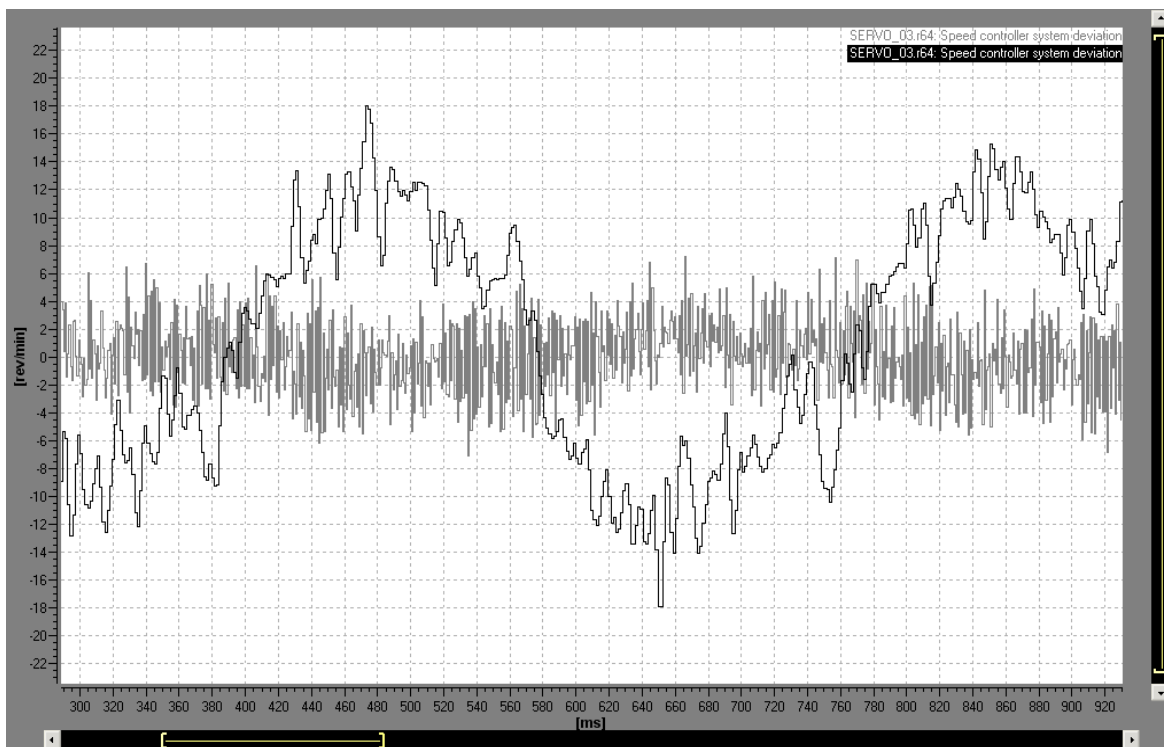
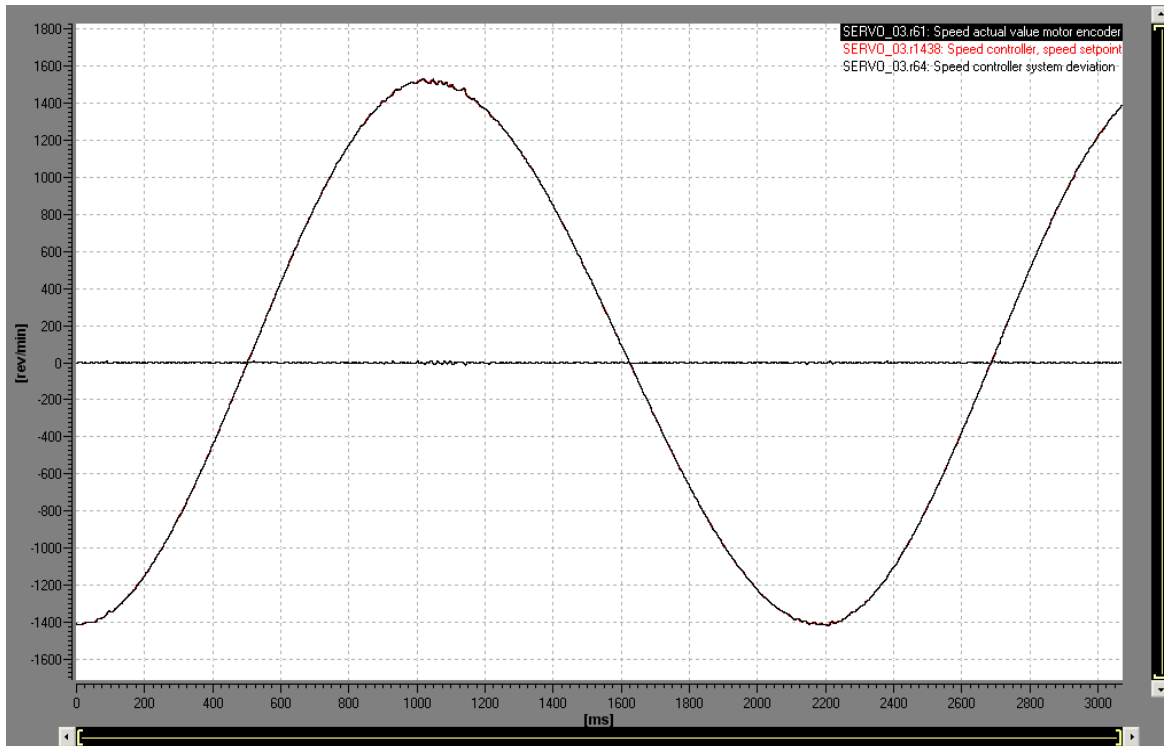


Рисунок 7 – Результаты работы электропривода
 в Servo-режиме с базовыми регуляторами такт просчёта контуров регу-
 лирования – 62,5 мкс

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 режиме 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. 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».

Библиографический список

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. Зеленов А.Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з електромашинами, електромагнітними та імпульсними перетворювачами: Навч. посібн. / А.Б. Зеленов, І.С. Шевченко, В.П. Яблонь, М.Г. Нікітін – Алчевськ: ДонДТУ, 2007. – 373 с.
6. Полилов Е.В. Выбор характеристического полинома и исследование влияния величины среднегеометрического корня на свойства мно-

гомассовой 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.

7. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

8. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: Навч. посібн. – Донецьк: Норд-Прес, 2004. – 298 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. А.Б. Зеленовым