

---

## СТРАТЕГИИ КАЧЕСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

---

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Сложно переоценить значимость регулируемых электроприводов и в то же время их долю в энергобалансе отдельно взятого, например, металлургического предприятия, что более ощутимо в масштабах любой металлургической компании или государства с развитой промышленной политикой. Учитывая, что даже в США на 2012 год при производстве электроэнергии в никуда расходуется около 67,5% затраченных на это энергоресурсов в силу несовершенства и дешевизны отдельно взятых технологий преобразования энергии, а из оставшейся доли совместно с отдаваемыми в промышленность, населению и коммерческим организациям энергоресурсами – 36,3% невосполнимые потери, более чем актуальными оказываются вопросы их рационального потребления. Очевидно, объём потреблённой электроэнергии в энергоёмких установках напрямую зависит и от качества управления динамикой приводимых в движение машин и механизмов.

*Целью работы* является разработка инвариантных оптимальных систем управления и поиск новых стратегий качественного управления многомерных  $n$ -массовых нелинейных электромеханических систем со сложной кинематической структурой и учетом упругих свойств связей, зазоров в механических передачах, явлений удара, автоколебаний и функционирующих в условиях действия значительных параметрических  $\Delta A(t)$ ,  $\Delta b(t)$  и координатных возмущений  $\zeta(t)$ .

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Львиная доля действующих электромеханических систем в силу сложившейся уже более чем полувековой традиции наладки, передаваемой из уст в уста новым поколениям, как устав и руководство к действию, многолетней эксплуатации электроприводов с классическими ПИД-законами управления в системах подчинённого регулирования, а в последнее время и даны моде с массовым отказом от электроприводов постоянного тока в пользу красивого тренда «векторное управление», с по сути теми же ПИД-законами управления, подогреваемым и навязываемым маркетинговыми службами крупнейших игроков на рынке комплектных электроприводов – как правило, обеспечивают исключительно линейные (в прямом понимании этого слова) треугольные и трапецеидальные законы изменения скорости  $V(t)$  движения. Следовать моде или нет, естественно, решение принимает собственник, и разумеется, целесообразнее покупать самое совершенное на вновь вводимые ответственные объекты, вопрос же с «псевдомодернизацией» существующего, лишь в угоду модных трендов – скорее миф. Речь сейчас совсем не об этом, и даже не о модульном, симметричном и компромиссном оптимумах, как таковых, хотя более простых законов управления сложно себе представить (в науке подобные законы вообще возведены в ранг «мальчика для битья», и это отдельная тема для обсуждения, ведь неоспоримый факт – 99,9% парка действующих регулируемых электроприводов «как то» управляются этими алгоритмами, магия трендов? волшебство наладчиков?) – корень зла в представленной ситуации, на деле, кроется в отсутствии правильных стратегий управления, какими бы совершенными не были алгоритмы в каждом отдельно взятом контуре.

Любую электромеханическую систему со сложной кинематической структурой, например, промышленных роботов, системы слежения, основные агрегаты толстолистовых и рулонных прокатных станов, будь то электропривод главного движения прокатных клетей, нажимных устройств, ножниц и т.п. при учёте упругих свойств связей, зазоров в механических передачах, явлений удара, нелинейных нагрузок и характеристик трения, вызывающих автоколебания – всё это можно представить в виде многомерной  $n$ -массовой нелинейной электромеханической системы. 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. 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. Нами детально проработаны возможные топологии и математические модели многомерных  $n$ -массовых нелинейных электромеханических систем с параметрическими неопределенностями, предложен алгоритм заполнения соответствующих матриц уравнений движения, и вся эта процедура в среде MATLAB сведена в идеологию одного клика мышки...

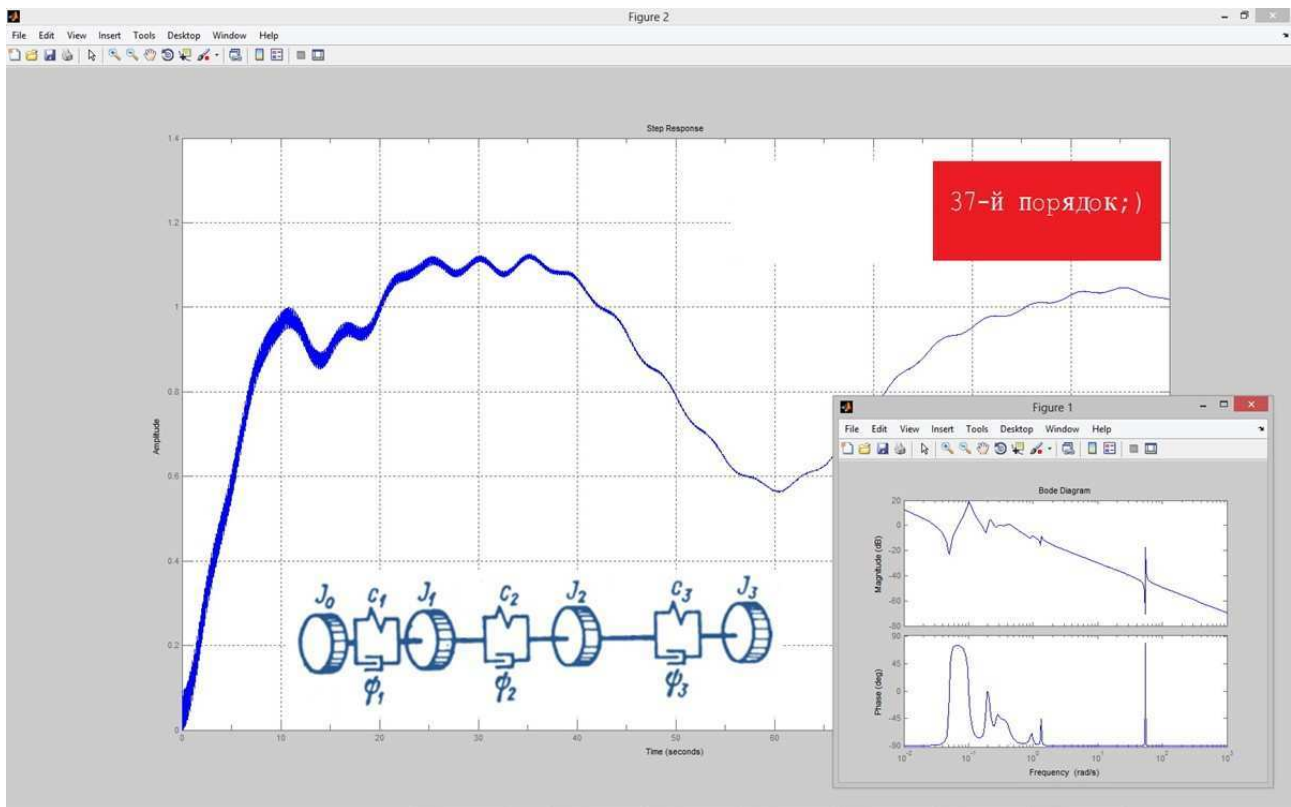


Рис. 1 Кликком мышки – рядная структура в 37 масс (волей случая любая топология и параметры, при желании)

Несмотря на обилие известных подходов к управлению электромеханическими системами с упругими кинематическими связями, имея определённый опыт в исследовании подобных систем, можем с некой долей иронии говорить о наукообразии и ситуативности решений в львиной доле достигнутых результатах, отсутствует системный подход к решению задач, многие исследователи замахиваются в подобные объекты наобум, потому что никто ж ещё «так» не управлял, кичась недостижимыми результатами. Разумно в этой ситуации создать банк готовых решений в управлении *одними и теми же элементарными объектами*, с предоставлением доступа любому желающему заявить о себе, это может быть и своего рода один из обязательных этапов при сдаче кандидатского минимума или даже в апробации диссертационных исследований, мотивация – честь, саморазвитие, конкурс молодых учёных. Мы готовы взять на себя эту благую миссию, и организовать подобное «облако» на просторах интернета: «Решения автоматизированного электропривода. Теория и практика».

Очевидно, в управлении подобными объектами ключевую роль играет ответная реакция замкнутой системы управления на задающие и возмущающие воздействия, причём насколько б сверхсовершенными в быстродействии и точности не были алгоритмы управления, их приходится вынуждено закруглять, порой до непомерно малых величин полосы  $\omega_0$  пропускания контура, поскольку иначе – принцип управления по ошибке работает прямо противоположно и вразрез желанию разработчика успокоить систему в ответ на мгновенное приложение даже ничтожно малой постоянной нагрузки на «дальние» массы. Непреодолимый барьер в понимании сути – многие предлагаемые алгоритмы как факт не имеют явных «инструментов» закругления и воздействия на полосу  $\omega_0$  пропускания замкнутого контура, а степень вольности при проектировании этим просто постулируется лучшим в серии попыток результатом. Интересна игра слов здесь с подменой истинной причины «колебательности / неколебательности», понятиями демпфирующая способность, гашение колебаний и пр., забывая об уже вложенном в систему, пусть даже в неявном виде, желаемом полиноме, и её целевой миссией – следить и управлять. И если это не так, какие-то недоалгоритмы нужно вообще без сожаления оставлять на свалке истории. Более чем убедительный аргумент, пятый порядок в распределении Баттерворта на вид с лёгкостью можно ведь интерпретировать, как какое-то недодемпфирование колебаний в объекте, а случайное попадание в слепом переборе на распределение по Бесселю – и колебания исчезают вовсе? при той же структуре САР, о каком гашении речь? Это скорее некорректно определённые коэффициенты, если ставилась иная цель. В подтверждение сказанного приведём возможный сценарий развития исследований при получении в распоряжение той самой сверхсовершенной следящей системы управления двухмассовой электромеханической системой [1], а сам процесс слежения сведём в классическую задачу отработки трапецеидального графика скорости, который из уст в уста новым поколениям на протяжении уже полувека в действующих электроустановках. Быстрее и точнее релейной системы при прочих равных? не возможно, физически. В алгоритмах заложены действенные инструменты прогнозирования и придания замкнутой САР желаемых динамических характеристик.

Первое и оправданное желание – замахнуться по максимуму и посмотреть, куда ж девать то те самые несколько сот рад/с в контуре, которыми игроки на рынке наградили в буклетах и свои детища с ПИД-управлением, в оправдание обещанных микросекундных фронтов движущего момента. Результат на первый взгляд – идеален, (рис. 2) ожидаемая трапеция скоростей повторяет заданную траекторию, явная колебательность инерционных масс отсутствует, точность слежения при желании может быть предельной, введением нужного числа интегральных связей и повышением порядка астатизма. Смена полиномов в желаемом распределении при той же полосе пропускания позволяет и вовсе избавиться от Баттерворт- волнений момента упругого. И тут вспоминаешь о номинальных данных машины. В моменты изменения производной скорости – в графиках отчётливо видны удары в скорости и движущем моменте на первой массе, порождённые всплесками в напряжении силового преобразователя, и моментобразующими токами, потребляемых машиной. Подобная обратная реакция замкнутой системы более чем очевидна, всё это необходимо для реализации заданной динамики скорости второй массы, как основной регулируемой в контуре, в счёт формирования здесь же движущего момента упругого, пропорционального разности скоростей масс. Причинно-следственный круг замкнулся на удары в первой массе. Отметим, что если для реализации заданного быстродействия  $\omega_0$  окажется, что необходим ток, превышающий уставку токоограничения внутреннего/подчинённого регулятора тока  $I_d^*(t) > I_{\max}$  или потребуется несуществующая большая величина напряжения силового преобразователя  $E_n^*(t) > E_{d0}$ , это гарантировано приведёт к срыву скользящего режима (а точнее, невозможности его возникновения) в основном/внешнем релейном регуляторе скорости и появлению низкочастотных незатухающих автоколебаний координат электропривода с большой амплитудой. Иными словами, отсечь ток внутренним контуром или в надежде на чудо думать, что нехватка напряжения силового преобразователя безболезненно сойдёт с рук – *абсолютно бессмысленная затея!* Замкнутый круг и реальная проблема непонимания происходящего, если не чувствовать этих решений. Ошибочно подобное поведение системы в целом можно трактовать, как несуществующие придуманные автоколебания, якобы свойственные объекту, списать на несовершенство разрабатываемых алгоритмов и т.п. Отсюда и незаслуженно присвоенное, кстати, «мальчик для битья» в ПИД-законах.

Возможность смягчить этот избыточный стык энергий осуществима двумя стратегиями:

- 1) нежелательным вынужденным закруглением полосы  $\omega_0$  пропускания контура (рис. 3);
- 2) принудительным формированием более «мягких» траекторий  $x^*(t)$  в канале задающего воздействия.

Разумеется, закруглять полосу  $\omega_0$  можно и на глазок в несколько проб, можно воспользоваться и готовыми аналитическими выражениями [1]. Так, задаваясь величиной максимального тока, например,  $I_{\max} = 500$  А для полинома Баттерворта получено значение  $\omega_{0,оп} = 32,1 \text{ c}^{-1}$ , которое и было принято в качестве расчётного. Как видно из графика якорного тока  $I_d(t)$  пик тока не превышает 500 А. Динамический ток/момент машины принят равным 400 А, при этом расчётное время разгона электродвигателя до установившейся скорости  $\omega_n = 183,3 \text{ c}^{-1}$  составляет  $t_p = 3,6 \text{ c}$ , что видно из соответствующих графиков  $M_d(t)$  и  $\omega(t)$ . Здесь значения скоростей  $\omega^*$  и  $\omega_2$  приведены к валу электродвигателя. Характер изменения упругого момента  $M_{12}(t)$  полностью соответствует желаемой переходной функции  $h_{ж}(t)$  с полиномом Баттерворта 4-го порядка. Пик в э.д.с. силового преобразователя, для реализации выбранного SGK составляет 130 В, что соответствует величине первого пика зависимости  $E_n(t)$ , полученной в результате моделирования.

Альтернативой вынужденному трёх/пяти- и более кратному закруглению полосы  $\omega_0$  пропускания контура может стать и на первый взгляд не совсем очевидная стратегия принудительного формирования более «мягких» траекторий  $x^*(t)$  в систему. Речь о замене той самой трапеции и треугольника в кривой скорости  $V(t)$ . Как убедительно б не звучали аргументы в пользу оптимума по быстродействию в погоне за предельным заполнением прямоугольников в кривой движущего момента – о линейных траекториях нужно забыть, как страшный сон и отправить их на свалку истории, аргументы более чем очевидны на рис. 3. Собственно то и без того, сам факт присутствия классического задатчика интенсивности с миссией «разгон до заданной скорости за заданное время», на корню ломает идеи оптимума в быстродействии. На деле – это тот же линейный сигнал  $V^*(t)$ , но перед подачей в САР «фильтрованный» простейшим НЧ-фильтром с полосой пропускания  $\omega_{\phi}$  меньшей собственной частоты  $\omega_{12}$  колебаний ДЭМС. Соотношение  $\omega_{\phi} < \omega_{12}$  получено экспериментально и является *гарантированным решением*. Разумеется, можно несколько и увеличить полосу пропускания фильтра, но с ростом  $\omega_{\phi}$  в системе постепенно возвращается удар в первой массе, и есть ли в этом смысл? если фильтр с полосой  $\omega_{\phi} \approx \omega_{12}$  вносит задержку в линейную траекторию несколько десятков/сотен миллисекунд, на фоне пусковых 1,0÷5,0 с – это ничто. Принципиально, на величину этой задержки можно ведь и уменьшить время разгона линейного задатчика до фильтрации, если это критично.

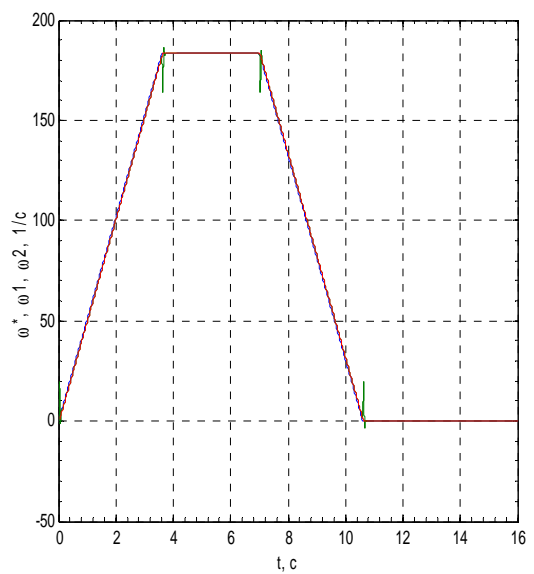
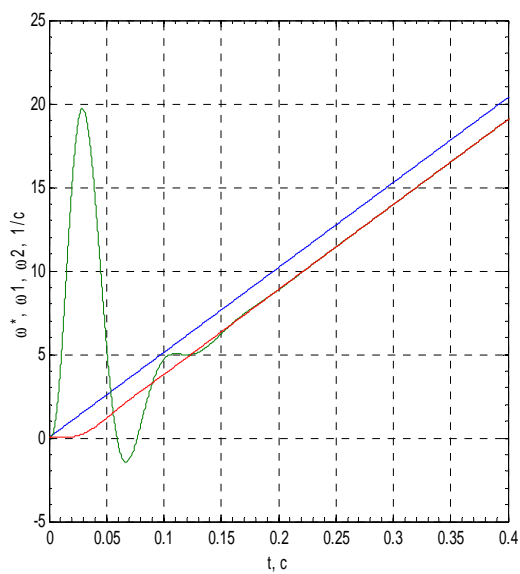
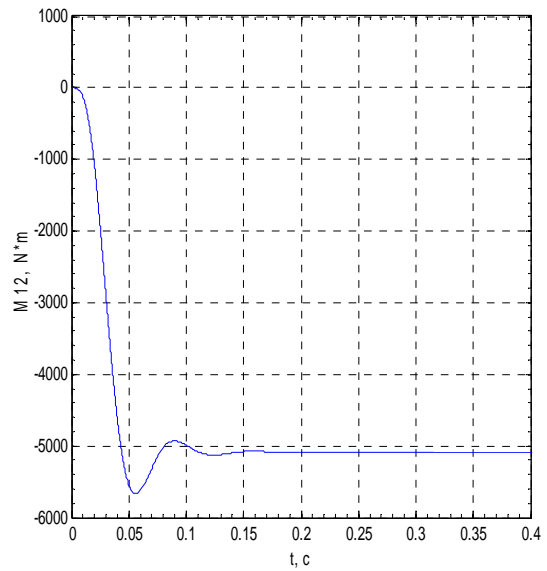
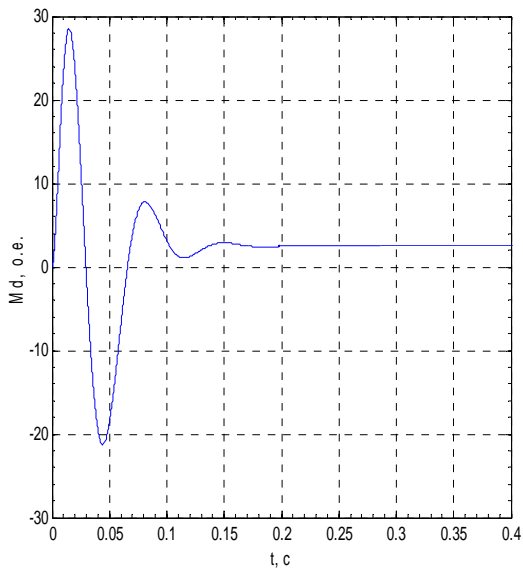
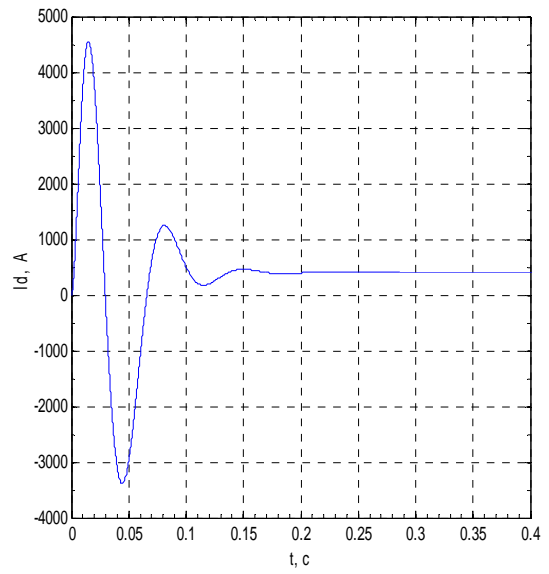
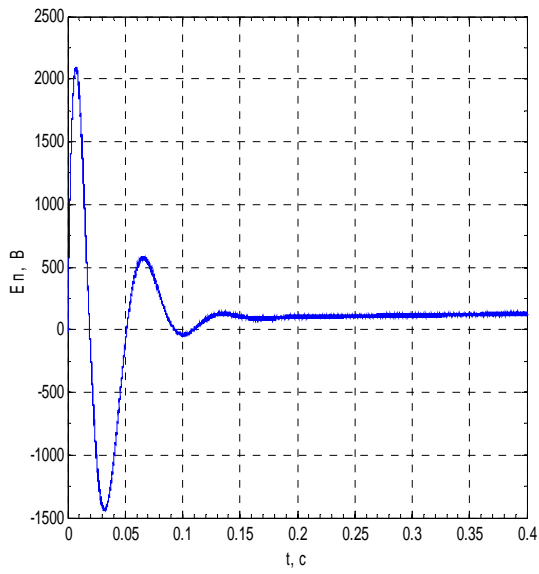


Рис. 2 ДЭМС с РМСАР (и уже при  $\omega_0 = 100 \text{ рад/с}$  – двадцативосьмикратный пик тока!)

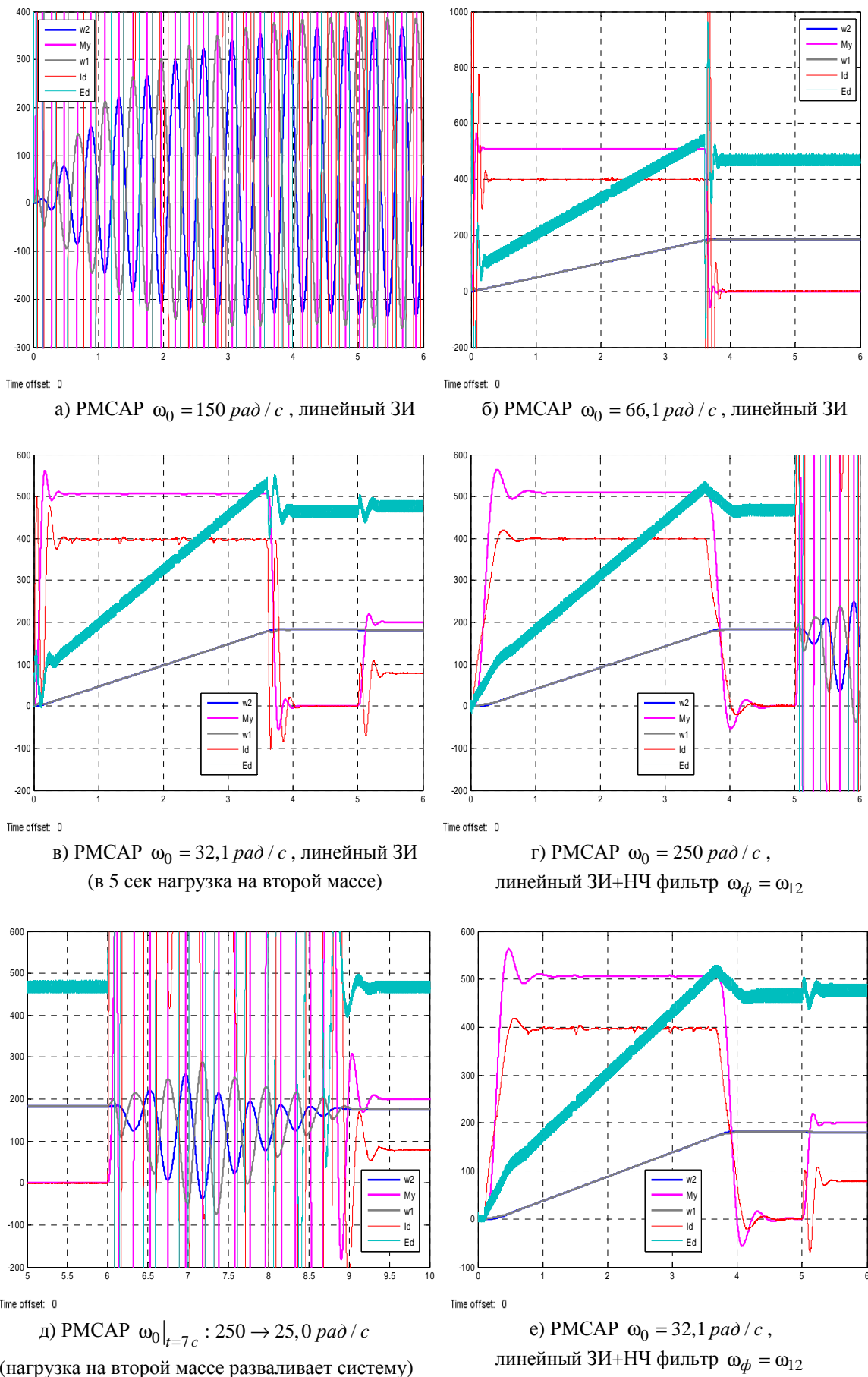


Рис. 3 Стратегии заглубления полосы пропускания и «мягких» траекторий

Очевидно, что помимо банальной фильтрации линейно нарастающих сигналов в рамках стратегии «мягких» траекторий, они могут быть сформированы *массой всевозможных иных способов*, в том числе и с использованием тригонометрических функций, полиномов  $n$ -й степени, экспоненциальных зависимостей, рядов Фурье, и даже в виде реакции низкочастотных фильтров с намеренно предопределёнными желаемыми переходными характеристиками, что более естественно в законах движения (стандартные распределения Баттерворта, Бесселя, Грехема-Летропа, полиномы с биномиальными коэффициентами и мн. др.), эскизный вид некоторых в решении задачи позиционирования представлен на рис. 4. Эти же траектории без изменения могут быть использованы в качестве входных задающих и в задачах управления скоростью. Нами разработана библиотека Simulink-блоков генерирования «мягких» траекторий всеми перечисленными способами, проведены обширные исследования в управлении многомерными  $n$ -массовыми нелинейными электромеханическими системами. Разрабатывая в рамках международного проекта нанопорошковых 3D-принтеров: <http://nanoprint.org/> алгоритмы планирования и оптимизации пространственных траекторий, в реальном железе ПЛИС нами реализован генератор оптимальных траекторий с ограничением скоростей, ускорений, рывков и их производных, полученные гладкие кривые, позволяют и его отнестись в обшей стратегии «мягких» траекторий.

Мы умышленно начали рассмотрение стратегии «мягких» траекторий с предельно простейшего случая фильтрации, тем самым показывая, что заслуга в невозбуждении колебаний здесь исключительно выбранной стратегии, а не сверхсовершенных САР, какими бы идеальными они не казались разработчику. И вопреки расхожему мнению, в стратегии закрутки полосы  $\omega_0$  пропускания – *колебания вовсе не гасятся* искусственно созданной «вязкостью среды» контура, как, собственно и в стратегии «мягких» траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  даже со сверхбыстродействующим контуром – они попросту *не возбуждаются* в силу такого принципа работы следящих систем: минимизировать отклонения от навязываемых и предопределённых разработчиком или извне траекторий. Сам факт наличия несвойственных колебаний в многомассовой электромеханической системе (ММЭМС) с идеально отстроенной следящей САР должен настораживать. Внешняя инвариантность обеспечивает системе строгую невосприимчивость к определённой совокупности воздействий на систему. Для этой совокупности воздействий система оказывается «запертой», т.е. процессы внутри неё протекают таким образом, что из-за взаимной компенсации этих процессов на её выходе не возникает никакой реакции. Оградить, не допустить, в конечном итоге и скомпенсировать воздействия  $\mathbf{x}^*(t)$ ,  $\zeta(t)$  извне, постоянно удерживая нулевыми рассогласования с реальными координатами  $\mathbf{x}(t)$  ММЭМС. Именно в этом миссия управления  $u(t)$ . Если мысленно представить теоретическую возможность банальной математической компенсации возмущений  $\zeta(t)$  противоположным сигналом  $-\zeta(t)$ , управление  $u(t)$  в сущности своей делает то же самое. Собственно, полоса  $\omega_0$  пропускания замкнутого контура и предопределяет умышленную «задержку» в ответной реакции/компенсации, отражая степень терпимости и толерантности к факту не мгновенной компенсации быстрых возмущений  $\zeta(t)$ , что в общем то и не реализуемо технически, поскольку в импульсе потребует бесконечной энергии. Неспроста мы сымитировали классическую задачу «регулирования» скорости *терминами следящей з-системы*, это позволило выпятить очень важную проблему в управлении ММЭМС – любая генерируемая/желаемая траектория  $\mathbf{x}^*(t)$  должна быть реализуема в рамках имеющегося потенциала  $E_n^*(t) < E_{d0}$  и  $I_d^*(t) < I_{\max}$ . Причина развала корректно спроектированной следящей САР только одна, многими ошибочно трактуемая чем угодно, и автоколебаниями, и несовершенством алгоритмов, и плохой настройкой – *суть исключительно в нехватке его/потенциала* на покрытие «экспрессии» задающих воздействий  $\mathbf{x}^*(t)$  и внешних возмущений  $\zeta(t)$ , о них речь позже. Стратегия «мягких» траекторий позволяет его не отбирать, по меньшей мере бездумно в счёт неверно спланированной траектории или банального непонимания сути. Представленные на рис. 4 траектории на деле – являются собой реакцию системы в т.н. «каноническом» пространстве основной регулируемой координаты (Position) и её высших производных (Speed, Jerk, Derivative of Jerk). Для обратного перехода в «базовые координаты» ММЭМС нужна обратная матрица неособого преобразования  $\mathbf{x}' \leftarrow \mathbf{T}^{-1}\mathbf{x}$ . Имея её в распоряжении, с лёгкостью могут быть получены и желаемые траектории  $\mathbf{x}^*(t)$  всех координат ММЭМС, из которых основная регулируемая в контуре идеально повторяет закладываемую траекторию в виде одной из выбранных разработчиком прогнозируемых, быть может «мягких». Этот элементарный ход обобщает полученные в [1] решения для  $n$ -мерного случая, любой желаемой траектории и на весь временной промежуток, что существенно упрощает и делает принципиально возможным комплексный анализ взамен нетривиальной аналитики в получении нескольких ключевых чисел и многочасового вывода аналогичных зависимостей для большего числа инерционных масс. Один клик мышки в за 5 минут собранной Simulink модели – и на экране монитора желаемые траектории  $\mathbf{x}^*(t)$  всех координат ММЭМС. Если при этом, хотя бы одна координата электропривода из вектора  $\mathbf{x}^*(t)$  не укладывается в навязанные проектантом рамки, даже кратковременно – замкнутая система гарантировано неработоспособна, какой бы она идеальной не казалась на штатных объектах.

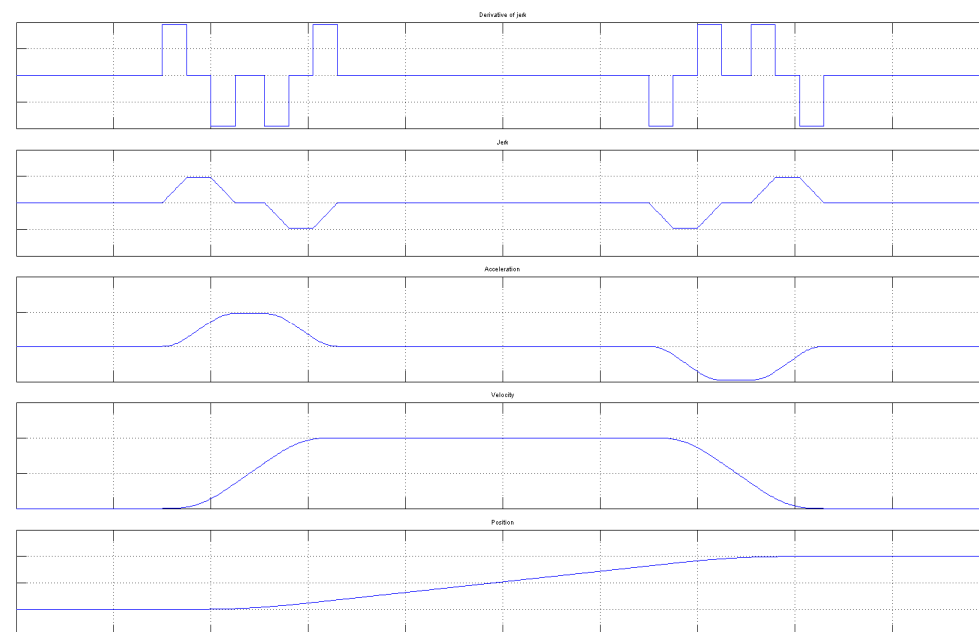
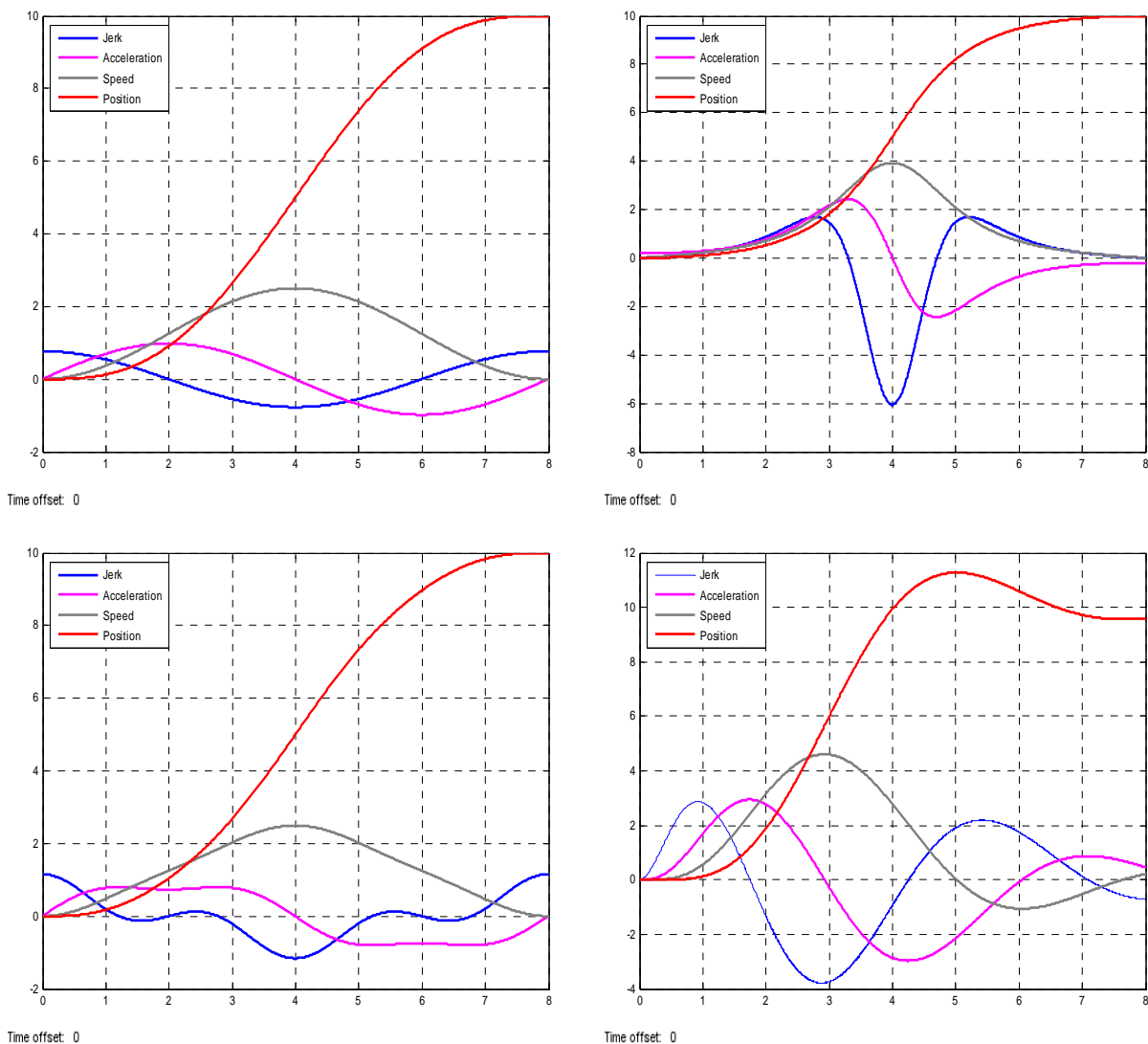


Рис. 4 Эскизный вид «мягких» траекторий  $x^*(t)$  в решении задачи позиционирования (основная регулируемая координата Position и её высшие производные Speed, Jerk, Derivative of Jerk)



Описываемая ситуация подобна движению пусть даже самого сверхсовершенного спортсмена, управляемого водителем ассом, по скользкой дороге... с умышленно ограниченным углом поворота руля, например, или ограниченным ходом педалей. Исход более чем очевиден. Внешнему наблюдателю, не зная этих подробностей, может показаться что угодно, вплоть до обвинения о неадекватных действиях. Предложенную процедуру прогнозирования траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  в силу очевидности и разового использования сложно назвать стратегией «выбора», но всё же, к ней следует отнестись с должным вниманием на чрезвычайно ответственном этапе подбора элементов электропривода. Иначе, принимая купленное оборудование уже как факт – в реализации качественного управления ММЭМС будут уместны лишь упоминаемые выше «обратные» стратегии закругления, недопущения и запрета (как может оказаться уже и желаемых траекторий) или систем с контролируемым изменением полосы  $\omega_0(\eta) = \text{var}$  пропускания контура, в развитие стратегии разового закругления. Ключевой момент в понимании сути – «бесплатный сыр бывает только в мышеловке», и за гарантированную реализацию *любого желания* нужно платить, ценой увеличения закладываемого в систему «потенциала». Глупо ведь надеяться на всемогущество бюджетного малолитражного авто в погоне за суперкаром с 1000-й л.с. под капотом? какими бы красивыми не казались диски на только что поставленных колёсах или модным тюнинг салона...

Не менее сложной в сравнении с управлением ММЭМС по каналу задающих воздействий  $\mathbf{x}^*(t)$  есть задача «мягкой» компенсации внешних возмущений  $\zeta(t)$ . Считая эти каналы равноправными, здесь также применима описанная выше стратегия закругления полосы пропускания замкнутого контура. Невозможность прямого воздействия на возмущения  $\zeta(t)$  и принудительного формирования в большинстве практических случаев их формы, ввиду их автономности, стратегия «мягких» траекторий  $\zeta^*(t)$  лишена физического смысла и не реализуема технически. Ситуацию усугубляет собственно и «структурное место» приложения нагрузок  $M_{ci}$  в ММЭМС, образуя в прямом канале соответствующих передаточных функций производные. И даже малые по величине мгновенные воздействия статической нагрузки на «дальние» массы при относительно невысоких полосах пропускания контура, как правило, приводят к развалу всей системы, рис. 3. Разумеется, в силу навязанных разработчиком ограничений и вложенного небесконечного потенциала. Безысходность в решении данной проблемы на практике заставляет ещё больше закруглять полосу  $\omega_0$  пропускания замкнутой системы.

Решениями этой тупиковой ситуации являются:

3) стратегия непротивления действию возмущений  $\zeta(t)$ ;

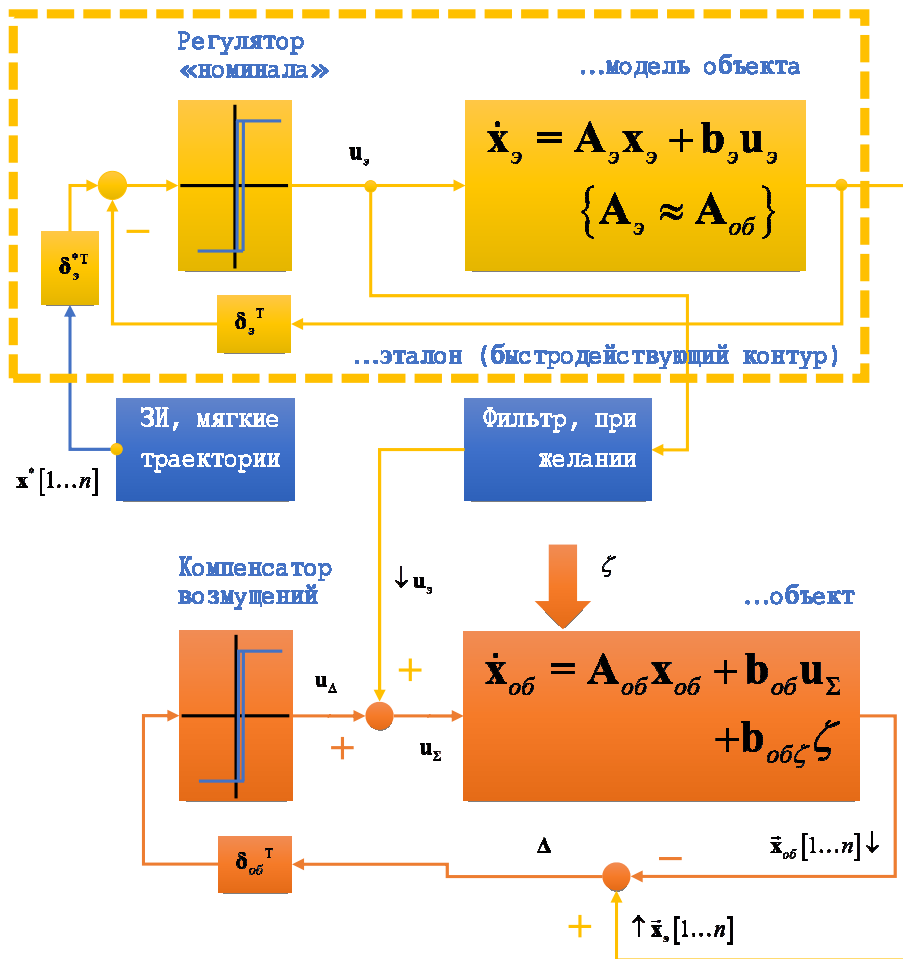
4) стратегия разделения задач слежения задающих воздействий  $\mathbf{x}^*(t)$  и «мягкой» компенсации внешних возмущений  $\zeta(t)$  независимыми подсистемами.

Реализация стратегии непротивления действию возмущений  $\zeta(t)$  заключается в мгновенном принудительном нивелировании рассогласований  $\eta_i$  в алгоритмах управления, появившихся в ММЭМС в ответ на приложение статической нагрузки  $M_{ci}$  на соответствующих инерционных массах, что может быть осуществлено формированием дополнительных корректирующих каналов в датчиках траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$ . Чтобы предметно осознать предлагаемую идею, достаточно мысленно в алгоритме управления  $u = -\text{sgn}(\mathbf{k}^T(\mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t)))$  идеологически поменять местами объект в ММЭМС и датчик траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  на момент приложения нагрузки  $M_{ci}$ , «заставив» датчик траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  чувствовать этот факт и следить за фазовыми координатами  $\mathbf{x}(t)$  объекта. Самое простейшее решение – по фронту сигнала факта приложения нагрузки в датчике траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  принудительно однократно выставить текущие значения изменившихся фазовых координат  $\mathbf{x}(t)$  объекта. Следящая РМСАР «мягко» выведет фазовые координаты  $\mathbf{x}(t)$  ММЭМС на требуемый по технологии уровень по *предопределённым траекториям датчика*, в функции которого теперь плавно «отработать» мгновенно появившиеся смещения в соответствующих интегралах изменившихся фазовых координат  $\mathbf{x}^*(t)$ , разумеется, в него целесообразно вкладывать и стратегию «мягких» траекторий. На рис. 5, б представлены результаты «мягкой» компенсации мгновенного приложения статической нагрузки  $M_{c2}$  на второй инерционной массе ММЭМС предлагаемой стратегией, параметры ММЭМС и настройки РМСАР те же, что и в модельном эксперименте рис. 3, как впрочем и во всех предыдущих. Отметим, что подобное техническое решение нами реализовано в черновой клетке на действующем толстолистовом прокатном стане 3000 Алчевского металлургического комбината, как система компенсации перенапряжений на якоре приводных электродвигателей главного движения в момент выброса металла из прокатных валков, принципиально исключающая круговой огонь по коллатору. В момент запуска в 2006 г. реконструированного стана это была непреодолимая проблема.

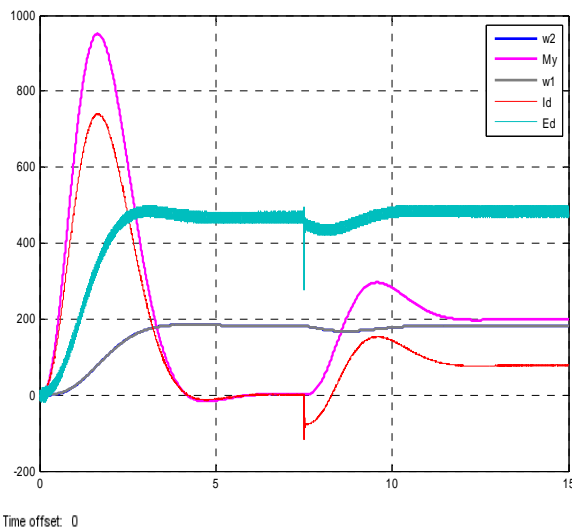


Стратегия разделения задач слежения задающих воздействий  $\mathbf{x}^*(t)$  и «мягкой» компенсации внешних возмущений  $\zeta(t)$  независимыми подсистемами реализуема структурной схемой на рис. 5, а. Пунктиром обведена, по сути своей – эталонная модель, посредством которой, во-первых, алгоритмически формируются желаемые траектории  $\mathbf{x}_y(t) \rightarrow \mathbf{x}^*(t)$  изменения координат  $\mathbf{x}_{об}(t)$  объекта (на входе подсистемы совсем необязательно наличие всего пакета траекторий  $\mathbf{x}^*[1..n]$  и достаточно любой, доступной в задатчике координаты  $x_i^*(t)$  на соответствующем весовом коэффициенте вектора  $\mathbf{d}_y^{*T}$ , остальные в  $\mathbf{x}_y(t)$  будут сформированы алгоритмически в управлении виртуальным объектом), во-вторых, и это принципиально – формируется управляющее воздействие  $\mathbf{u}_y(t)$  отдаваемое в реальный объект, которое, собственно это желание  $\mathbf{x}_{об}(t) \rightarrow \mathbf{x}_y(t)$  и реализует для т.н. «номинального» невозмущённого состояния объекта. В этой вычислительной схеме полоса  $\omega_{0y}$  пропускания виртуального контура эталонной модели с собственной РМСАР, в случае использования стратегии «мягких» траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  в канале задающего воздействия, ограничена лишь имеющимся/закладываемым потенциалом электропривода для их реализации и принципиально не зависит от факта наличия возмущений  $\zeta(t)$  и даже возможной параметрической неопределённости  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  объекта в отношении к «номиналу»  $\mathbf{A}_y, \mathbf{b}_y$  в эталонной модели. Для максимального и допустимого использования закладываемого в электропривод потенциала уместно при формировании траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  применять предложенную выше процедуру их прогнозирования, закладывая заведомо больший на компенсацию наихудших возмущений  $\zeta(t)$  и неопределённостей  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$ . Возвращаясь к топологии предложенной вычислительной схемы – в структуру вложена ещё одна подсистема со своей РМСАР, сущность которой сводится *исключительно к компенсации отклонений*  $\Delta(t)$  ММЭМС от «номинала»  $\mathbf{A}_y, \mathbf{b}_y$ , навязываемого эталонной моделью  $\mathbf{x}_{об}(t) \rightarrow \mathbf{x}_y(t) \equiv \mathbf{x}^*(t)$ . Подсистема принимает на себя и компенсирует как внешние  $\zeta(t)$  возмущения, так и параметрические  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  неопределённости, причём это происходит автономно и независимо от управления  $\mathbf{u}_y(t)$ , формируемого в эталонной модели, а в их отсутствие –  $\mathbf{u}_\Delta(t) \equiv 0$ . Здесь, по меньшей мере теперь, уместна стратегия умышленного загробления полосы  $\omega_{0к}$  пропускания контура в РМСАР с целью уменьшения доли  $\mathbf{u}_\Delta(t)$  в закладываемом прогнозируемом потенциале.

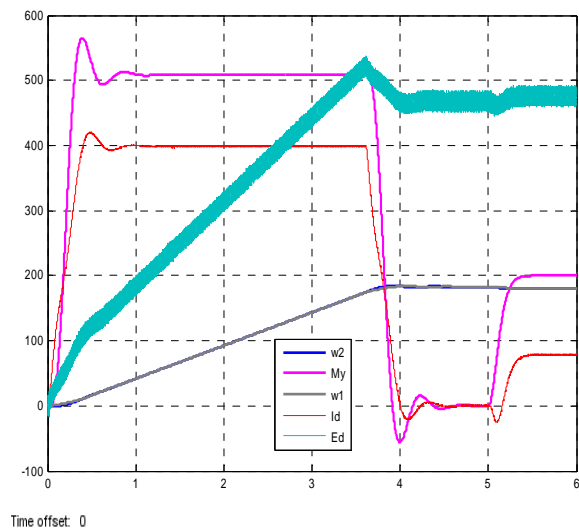
В рамках этой топологии идеально реализуемы и нами впервые предложены идея т.н. «скользящего» номинала, когда эталонная модель воспроизведена нейронной сетью с каналом онлайн адаптации гиперповерхности скольжения РМСАР и модели объекта к относительно медленным процессам флуктуации во времени  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  и/или имеющейся параметрической неопределённости, поглощая в процессе адаптации аналогичные функции компенсатора возмущений  $\mathbf{u}_\Delta(t)$  и постепенно перестраиваясь на «новый номинал»  $\mathbf{A}_y + \Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{b}_y + \Delta\mathbf{b}(t)$ , сам объект при этом неизменно удерживается в едином «желаемом номинале»; а также метод минимальных эллипсоидов, в котором полученное аппаратом линейных матричных неравенств и полуопределённого программирования *гарантированное решение* позволяет свести/сжать реакцию замкнутой системы на неконтролируемые возмущения  $\zeta(t)$  и параметрическую неопределённость  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  объекта  $n$ -го порядка в минимально возможный притягивающий эллипсоид  $n$ -мерного фазового пространства. Полученные методом инвариантных эллипсоидов законы управления  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  [2], безусловно, в полной мере оправдывают своё целевое назначение в подавлении ограниченных внешних возмущений  $\zeta(t)$ , но они в явном виде не применимы при разработке быстродействующих электроприводов, поскольку резко сужают полосу  $\omega_0$  пропускания замкнутой системы, что недопустимо в формировании качественной динамики объекта по каналу задающего воздействия  $\mathbf{x}^*(t)$ . Напротив, это же решение в рамках предлагаемой топологии с тандемом управлений – лучшее из известных и теоретически возможных при прочих равных и в проблеме управления ММЭМС с отрицательным вязким трением, при подавлении т.н. фрикционных автоколебаний, сводя эти задачи к «мягкой» компенсации возмущений  $\zeta(t)$ . Методом инвариантных эллипсоидов разрешима задача «мягкой» компенсации возмущений  $\zeta(t)$  и с заведомо ограниченным потенциалом электропривода, отводимым на её реализацию. К примеру, может ставится конкретная техническая задача – мы готовы потратить из имеющегося потенциала не более 17,9% на компенсацию ограниченных внешних возмущений  $\zeta(t)$  в  $\mathbf{u}_\Delta(t)$ , оставшийся потенциал должен быть вложен в реализацию предельной динамики «мягких» траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  в  $\mathbf{u}_y(t)$ .



а) вычислительная схема тандема РМСАР (выбор фазового пространства и порядок астатизма РМСАР каждой из подсистем несущественны в данной постановке и обсуждении результатов, более того, управления могут быть и линейными, при желании)



б) стратегия непровиления действию возмущений  $\mathbf{z}(t)$ , РМСАР  $\omega_0 = 250 \text{ рад/с}$



в) тандем РМСАР:  $\omega_{0x^*} = 250 \text{ рад/с}$ ,  $\omega_{0\zeta} = 25 \text{ рад/с}$ ; линейный ЗИ+НЧ фильтр  $\omega_{\phi} = \omega_{12}$

Рис. 5 Стратегии непровиления действию возмущений  $\zeta(t)$  и разделения задач слежения задающих воздействий  $\mathbf{x}^*(t)$ , «мягкой» компенсации ограниченных возмущений  $\zeta(t)$  независимыми подсистемами (задействованы также стратегии закругления полосы пропускания и «мягких» траекторий)

Задача нами предложена и решена впервые, инвариантные притягивающие эллипсоиды с управлением на скользящих режимах реализуемы благодаря предложенным [3] законам  $z(\mathbf{x}, t)$  динамики гиперповерхности скольжения  $s_0(\mathbf{x})$ , как средства расширения доступного фазового пространства до  $n$ -мерного. Результаты исследований представлены отдельными статьями. Возвращаясь к процессам, представленным на диаграммах рис. 3, б и рис. 5, в – разница «нагрева воздуха» в счёт тепловых потерь  $I^2R$  на сопротивлении обмоток 0,1 Ом при циклической работе оборудования 7200 ч (разгон, установившееся движение, торможение и пауза по 4 сек) составляет около 25 тыс. € в год, двигатель ~75 кВт мощности, есть над чем задуматься...

## ВЫВОДЫ

Математические модели многомерных  $n$ -массовых нелинейных электромеханических систем с параметрическими неопределенностями сведены в матричное дифференциальное уравнение, систематизирована последовательность заполнения соответствующих матриц, и вся эта процедура в среде MATLAB сведена в идеологию одного клика мышки, вплоть до формирования случайной топологии со случайными параметрами.

Для максимального и допустимого использования закладываемого в ММЭМС потенциала при формировании траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  впервые предложена визуальная процедура их прогнозирования и оценки с учётом затрачиваемого на компенсацию ограниченных возмущений  $\zeta(t)$  и параметрической неопределённости  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  объекта. Этот элементарный ход обобщает полученные в [1] решения для  $n$ -мерного случая, любой желаемой траектории и на весь временной промежуток.

Предложены новые стратегии качественного управления ММЭМС:

- впервые предложена стратегия «мягкой» компенсации мгновенного приложения ограниченных возмущений  $\zeta(t)$  посредством непротивления их действию в счёт мгновенного принудительного нивелирования рассогласований  $\eta_i$  в алгоритмах управления, появившихся в ММЭМС в ответ на приложение статической нагрузки  $M_{ci}$  на соответствующих инерционных массах, что осуществлено формированием дополнительных корректирующих каналов в датчиках траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$ ;

- впервые предложена вычислительная схема, в которой каналы задания  $\mathbf{x}^*(t)$  и возмущения  $\zeta(t)$  управляются независимо (выбор фазового пространства и порядок астатизма РМСАР каждой из подсистем несущественны в данной постановке и обсуждении результатов, с лёгкостью могут быть изменены), в рамках этой топологии идеально реализуемы и нами впервые предложены идеи т.н. «скользящего» номинала и метода инвариантных эллипсоидов;

- для объекта  $n$ -го порядка с управлением на скользящих режимах впервые решена задача подавления ограниченных внешних возмущений  $\zeta(t)$  и параметрической неопределённости  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  объекта, сводя ответную реакцию замкнутой системы в минимальный эллипсоид, при этом контур отдельной подсистемы канала задания с формируемыми извне «мягкими» траекториями  $\mathbf{x}^*(t)$  реализован с любой полосой  $\omega_0$  пропускания. Решение в рамках предлагаемой топологии с тандемом управлений – лучшее из известных и теоретически возможных при прочих равных и в проблеме управления ММЭМС с отрицательным вязким трением, при подавлении т.н. фрикционных автоколебаний, сводя эти задачи к «мягкой» компенсации возмущений  $\zeta(t)$ ;

- впервые аналитически решена задача прогнозируемого перераспределения имеющегося потенциала на компенсацию ограниченных внешних возмущений  $\zeta(t)$  и параметрической неопределённости  $\Delta\mathbf{A}(t)$ ,  $\Delta\mathbf{b}(t)$  объекта в  $\mathbf{u}_\Delta(t)$  и реализацию предельной динамики «мягких» траекторий  $\mathbf{x}^*(t)$  в  $\mathbf{u}_\rho(t)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Назин С.А., Поляк Б.Т., Топунов М.В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов. Автоматика и телемеханика, 2007, № 3, с. 106-125.
3. Полилов Е.В. К вопросу выбора гиперповерхностей скольжения в релейных системах / Е.В. Полилов, А.М. Батрак // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск: "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика" – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19) частина 3. – С.61-67.