

РЕЛЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Введение. Развитие производства практически во всех областях народного хозяйства в настоящее время характеризуется значительным усложнением задач управления автоматизированными электроприводами общепромышленного назначения (укрупнение единичных мощностей установок, освоение форсированных режимов работы, резкий рост стоимости сырья и энергии) при возрастающем числе измеряемых и регулируемых переменных, нестабильности параметров оборудования, высокой степени неопределенности в описании свойств объектов и внешних возмущений. В этой связи высокие требования к качеству управления технологическим процессом и, в первую очередь, к точности стабилизации основных технологических переменных постоянно возрастают. Известные методы синтеза высокоточных систем управления в «чистом виде» обычно могут быть применены только для линейных или линеаризованных объектов. Однако, для различных групп механизмов и машин (бумагоделательные машины, непрерывные линии химического производства, конвейеры, экскаваторы и шахтные подъемники, некоторые крановые механизмы, приводы подач металлорежущих станков, антенноповоротные устройства, прокатные станы, автоматизированные робототехнические комплексы и др.), характерно наличие значительного числа нелинейных и инерционных элементов, что существенно влияет на статические и динамические характеристики приводов. Наиболее существенным в таких электроприводах является влияние упругих связей, выраженное в механической колебательности упругих тел и являющееся причиной износа и разрушения элементов конструкции. Для исключения резонансных явлений, связанных с упругостью механических передач, в ряде случаев приходится значительно снижать быстродействие электроприводов по сравнению с быстродействием жестких систем.

Целью данной работы является компенсация влияния упругих связей в кинематических цепях электроприводов при обеспечении в системе предельно допустимых динамических свойств.

Материал и результаты исследования. Существующие методы исключения влияния упругости рассматривают ее компенсацию с помощью изменения конструктивных элементов (изменение массы или жесткости системы для отстройки от режима резонанса), а также механические способы, которые предусматривают использование динамических виброгасителей (параллельные и последовательные диссипативные элементы), и электронные, базирующиеся на введении в систему дополнительных упругих связей, колебательных систем или корректирующих устройств [1]. Первые два способа являются наиболее распространенными, но и наименее эффективными из-за частого вероятностного возникновения в области рабочих частот резонансной частоты. Анализ способов исключения влияния упругих связей, которые базируются на введении в систему управления электроприводом специальных корректирующих звеньев и устройств, позволило сделать вывод, что такие системы являются наиболее рациональными с позиции физической реализации и обеспечивают требуемую точность регулирования.

Рассмотрим в качестве объекта управления электропривод по системе «управляемый преобразователь – двигатель постоянного тока», механическая часть которого представляет собой двухмассовую упруго-вязкую систему. Динамика такой системы описывается дифференциальными уравнениями в относительных единицах:

$$\begin{aligned} p u_1 &= b_{11} u_1 + b_{12} u_2; \\ p u_2 &= b_{21} u_1 + b_{23} u_3; \\ p u_3 &= b_{32} u_2 + b_{33} u_3 + b_{34} u_4; \\ p u_4 &= b_{43} u_3 + b_{44} u_4 + b_{45} u_5; \\ p u_5 &= b_{55} u_5 + m_5 U, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } b_{12} = \frac{1}{T_{M2}}; b_{11} = -\frac{k f_2}{T_{M2}}; b_{21} = -\frac{1}{T_c}; b_{23} = \frac{1}{T_c}; b_{32} = -\frac{1}{T_{M1}}; b_{33} = -\frac{k f_1}{T_{M1}}; b_{34} = \frac{1}{T_{M1}};$$
$$b_{43} = b_{44} = -\frac{1}{T_3}; b_{45} = \frac{1}{T_3}; b_{55} = -\frac{1}{T_n}; m_5 = \frac{1}{T_n}, k_{f1} = h_1 \omega_0 / M_k; k_{f2} = h_2 \omega_0 / M_k,$$

h_1, h_2 – коэффициенты вязкого трения; T_{M1}, T_{M2} – электромеханические постоянные времени двигателя и исполнительного механизма; T_3 – электромагнитная постоянная времени двигателя; T_n – постоянная времени управляемого преобразователя;

$T_c = M_k / c_{12} \omega_0$ – постоянная времени жесткости; c_{12} – коэффициент упругости;

$$y_1 = \frac{\omega_{им}}{\omega_0}; y_2 = \frac{M_y}{M_k}; y_3 = \frac{\omega_d}{\omega_0}; y_4 = \frac{M_d}{M_k}; y_5 = \frac{E_{п}}{E_{пм}}; u = \frac{u_y}{u_{ym}};$$

$\omega_{им}, \omega_d$ – угловая скорость вращения исполнительного механизма и двигателя; M_y – момент упругих колебаний; M_d – электромагнитный момент двигателя; $E_{п}$ – э.д.с. управляемого преобразователя; u_y – напряжение управления преобразователем;

ω_0, M_k – скорость идеального холостого хода и момент короткого замыкания двигателя; $E_{пм}$ – максимальная э.д.с. преобразователя; u_{ym} – максимальное напряжение управления преобразователя.

При моделировании приняты параметры силовой части электропривода с двигателем постоянного тока типа ПБСТ23МУ: $P_n=15$ кВт, $U_n=220$ В, $I_n=85,4$ А, $n_n=1400$ об/мин, $R_s=0,29$ Ом, $J_d=0,155$ кг·м², $J_d=1,3J_{д}$, $c_{12}=2000$ Н·м, $h_1=h_2=0,01M_k$, максимально допустимый момент $2M_n$.

Среди известных методов построения высокоточных систем управления наиболее эффективным является создание систем оптимального управления, синтезированных как решение задачи АКР на основе модифицированного принципа симметрии, которые представляют класс систем, устойчивых при неограниченном коэффициенте усиления [2,3]. Доказано, что такие системы, построенные по принципу подчиненного регулирования контурных регуляторов, даже с учетом нелинейностей типа «насыщение» в цепи управления позволяют на порядок повысить качественные показатели по сравнению с системами с классическими настройками [4]. Бесконечно большой коэффициент усиления может быть реализован в системах разрывного управления с релейными регуляторами, работающими в скользящем режиме.

Для системы без учета упругих связей и вязкого трения согласно методике, приведенной в [2], алгоритмы оптимального управления момента и скорости двигателя имеют вид:

$$U_4 = \text{sign} \left[\left((-b_{44} - b_{55}) + p \right) (y_4^* - y_4) \right], \quad (2)$$

$$U_3 = \text{sign} \left[\left(b_{44}b_{55} - b_{43}b_{34}^* \right) + (-b_{44} - b_{55})p + p^2 \right] (y_3^* - y_3), \quad (3)$$

где $b_{34}^* = \frac{1}{T_{m1} + T_{m2}}$; y_i^* – желаемое значение регулируемой координаты.

Известно, что в жесткой системе угловые скорости вращения двигателя и исполнительного механизма эквивалентны и, соответственно, безразлично по какой из скоростей реализована обратная связь. Применение же алгоритмов управления (2), (3) в системах с упругими связями приводит к результатам, показанным на рис.1. Так при замыкании внешнего контура по скорости двигателя (рис. 1, а) при ступенчатом задающем воздействии разгон привода осуществляется при максимально возможном быстродействии. В установившемся процессе колебания скорости двигателя отсутствуют. Это объясняется тем, что момент упругих колебаний и вязкое трение для двигателя являются по сути моментом сопротивления, на компенсацию которого и направлено действие системы управления. Для скорости исполнительного механизма характерны слабозатухающие гармонические колебания, максимальная амплитуда которых составляет $0,04\omega_0$ и не зависит от величины задающего воздействия. Замыкание же системы по скорости исполнительного механизма приводит к потере устойчивости (рис. 1, б).

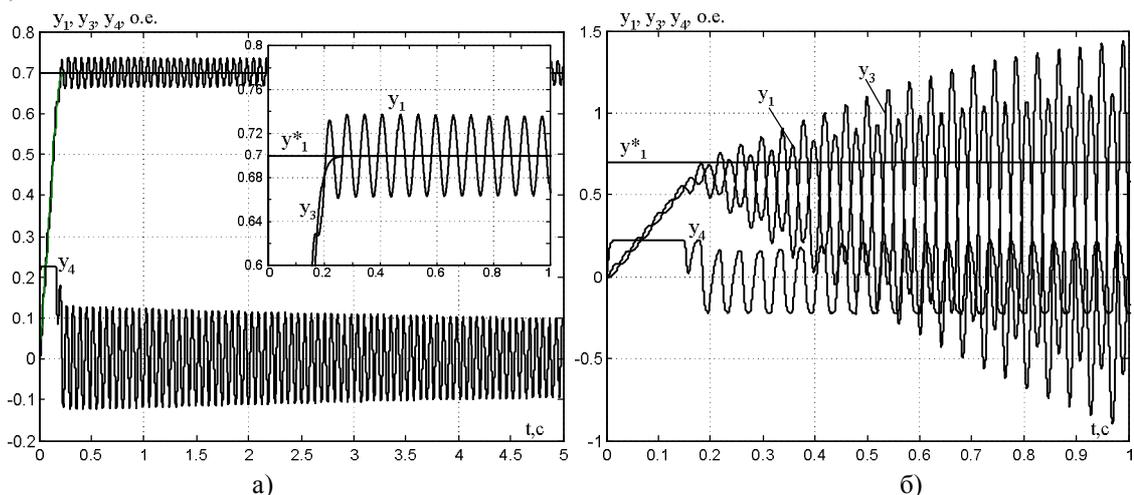


Рисунок 1. Динамические характеристики системы УП-Д с алгоритмами оптимального управления (2), (3): а) с обратной связью по скорости двигателя; б) с обратной связью по скорости исполнительного механизма

Рассмотрим двухконтурную систему, в которой алгоритм управления моментом определяется выражением (2), а алгоритм управления скорости исполнительного механизма выполнен для системы (1) с учетом упругости и имеет вид:

$$U_1 = \text{sign} \left[\left(\alpha_1 + \alpha_2 p + \alpha_3 p^2 + \alpha_4 p^3 + \alpha_5 p^4 \right) (y_1^* - y_1) \right], \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= b_{11}(b_{55}(b_{33}b_{44} - b_{34}b_{43}) + b_{23}b_{32}(-b_{44} - b_{55})) - \\ &\quad - b_{12}b_{21}(b_{33}b_{44} + b_{33}b_{55} + b_{44}b_{55} - b_{34}b_{43}) - b_{23}b_{32}b_{44}b_{55}; \\ \alpha_2 &= -b_{11}(b_{44}b_{55} + b_{33}b_{55} - b_{23}b_{32} - b_{34}b_{43}) - \\ &\quad - b_{23}b_{32}(-b_{44} - b_{55}) - b_{12}b_{21}(-b_{33} - b_{44} - b_{55}) - b_{55}(b_{33}b_{44} - b_{34}b_{43}); \\ \alpha_3 &= -b_{12}b_{21} - b_{23}b_{32} - b_{34}b_{43} - b_{11}(-b_{33} - b_{44} - b_{55}) + b_{33}b_{44} + b_{33}b_{55} + b_{44}b_{55}; \\ \alpha_4 &= -b_{11} - b_{33} - b_{44} - b_{55}; \\ \alpha_5 &= 1. \end{aligned}$$

Как видно из графиков (рис. 2), такой подход позволяет снизить до $0.02\omega_0$ максимальную амплитуду колебаний при ступенчатом задающем воздействии (рис. 2, а). Колебания при этом затухающие. При медленно изменяющемся задающем воздействии, например, по экспоненциальному закону (рис. 2, б), колебания с амплитудой $0.002\omega_0$ наблюдаются на всем периоде разгона двигателя и затухают при установившемся движении.

Однако, алгоритм управления (4) содержит дифференциальные составляющие высоких порядков, реализация которых затруднительна в цифровых и не реализуема в аналоговых системах управления. Исключение D^3 и D^4 составляющих из алгоритма управления приведет к возникновению значительных по амплитуде высокочастотных колебаний по обеим скоростям электропривода.

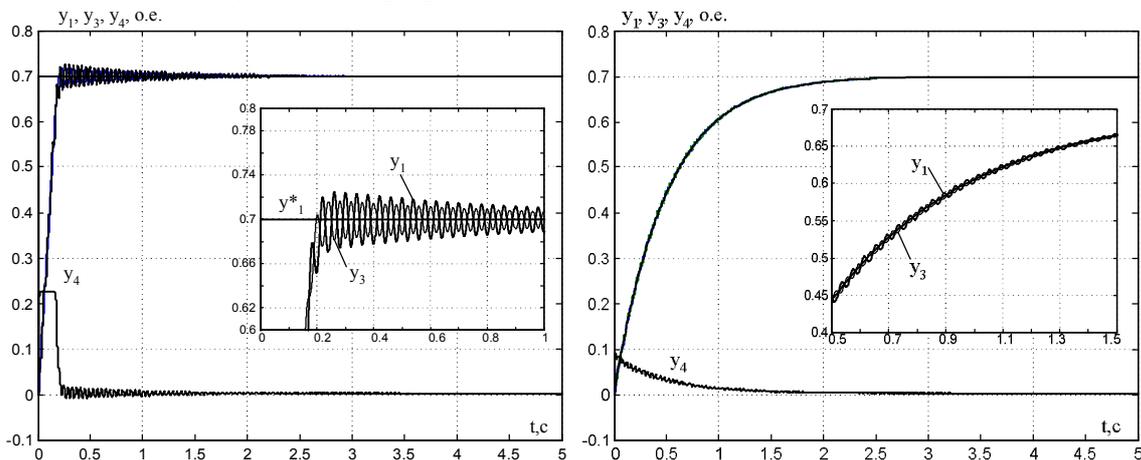


Рисунок 2 Динамические характеристики двухмассовой системы с алгоритмами (2), (4) а) для ступенчатого задающего воздействия; б) для экспоненциального задающего воздействия

Одним из подходов при синтезе систем управления для электроприводов с упругими связями является построение многоконтурных структур с контурными регуляторами по каждой из координат электропривода. В общем случае система имеет четыре контура: момента (тока) двигателя, скорости двигателя, момента упругости, скорости исполнительного механизма. К недостаткам последней системы можно отнести сложность настройки регуляторов с ростом количества контуров, что также снижает быстродействие системы. Кроме того, прямое или косвенное измерение момента упругости связано с определенными техническими трудностями и не всегда может быть реализовано на практике.

Поэтому рассмотрим трехконтурную систему, в которой алгоритм управления моментом определяется выражением (2), а алгоритмы управления скоростями двигателя и исполнительного механизма имеют вид соответственно:

$$U_3 = \text{sign} \left[\left(\alpha_3 + \alpha_4 p + \alpha_5 p^2 \right) (y_3^* - y_3) \right]; \quad (5)$$

$$U_1 = \text{sign} \left[\left(\alpha_1 + \alpha_2 p + \alpha_3 p^2 + \alpha_4 p^3 + \alpha_5 p^4 \right) (y_1^* - y_1) \right]. \quad (6)$$

Результаты моделирования для системы с алгоритмами управления (2), (5), (6) приведены на рис. 3.

Анализ полученных результатов показал, что система при ступенчатом задающем воздействии сохраняет предельное быстродействие, при этом колебания скоростей имеют затухающий характер (рис. 3, а), а максимальная амплитуда колебаний не превышает $0.01\omega_0$. При экспоненциальном задающем воздействии (рис. 3, б) рассматриваемая система характеризуется переходными процессами, аналогично как и для системы с алгоритмами управления (2), (3).

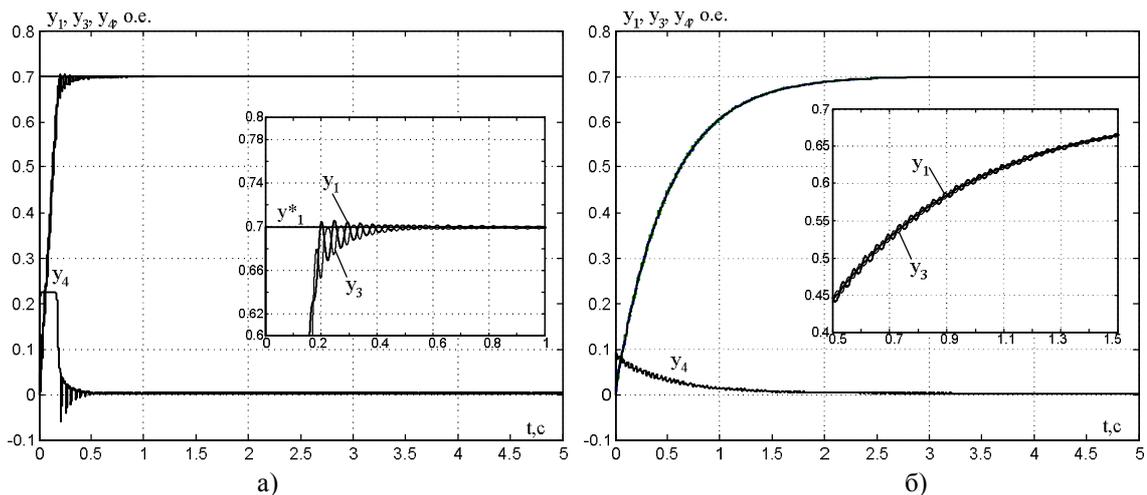


Рисунок 3 Динамические характеристики двухмассовой системы с алгоритмами (2), (5), (6)
 а) для ступенчатого задающего воздействия; б) для экспоненциального задающего воздействия

Необходимо отметить, что алгоритмы управления (4) и (6) абсолютно идентичны. Это объясняется методикой синтеза подобных систем [2].

В процессе управления электроприводом в режиме стабилизации внутренней координаты изображающая точка движется по гиперплоскости скольжения внутреннего релейного регулятора и по мере разгона достигает гиперплоскости скольжения внешнего релейного регулятора. Последующее движение осуществляется в новой гиперплоскости, если статическое значение внутренней координаты не превышает заданного уровня ограничения. Скользящий режим внутреннего регулятора при этом прекращается и на вход силовой части электропривода должно поступать управляющее воздействие внешнего регулятора. Если в процессе движения изображающей точки по гиперплоскости скольжения внешнего регулятора внутренняя координата достигает ограничения, изображающая точка начинает двигаться по линии пересечения двух гиперплоскостей. Однако такое движение является неустойчивым, поскольку любое возмущающее воздействие будет возвращать изображающую точку на одну из гиперплоскостей скольжения.

Таким образом, в релейной системе подчиненного регулирования электропривода постоянного тока, обеспечивающей ограничение фазовых координат на предельно допустимом уровне, исключена возможность одновременной работы в скользящем режиме всех регуляторов. При работе в скользящем режиме внешнего регулятора внутренний контур разомкнут и не оказывает влияние на динамику электропривода, поскольку в точности повторяет переключения внешнего регулятора, выполняя функции промежуточного релейного элемента. То есть, оба регулятора работают как одно реле. Это позволяет при синтезе алгоритма управления внешним контуром считать, что синтезируемое управляющее воздействие прикладывается непосредственно ко входу силовой части электропривода.

Такой подход делает принципиально невозможным реализовать за счет скользящего режима бесконечно большой коэффициент усиления в контуре регулирования, содержащем объект управления с приложенными к нему аддитивными возмущениями, и обеспечить нулевую чувствительность даже к ограниченному количеству параметрических и координатных возмущений. Кроме того, как отмечалось выше, регуляторы неизбежно содержат дифференциальные составляющие высоких порядков, причем внешний регулятор будет иметь составляющую D^{n-1} , где n – порядок объекта управления.

Данная проблема успешно решается путем синтеза многоконтурных релейных систем управления и созданием многократных скользящих режимов за счет установки между регуляторами динамических подсистем, фильтрующих быстрые переключения и пропускающих с минимальными искажениями низкочастотную составляющую выходного напряжения, что обеспечивает непрерывный скользящий режим для каждого контура. В качестве такой подсистемы в общем случае может быть использован линейный или нелинейный фильтр.

В качестве фильтра принимаем интегрирующее звено с максимальным коэффициентом передачи k_i . Выходной сигнал интегратора ограничен нелинейностью типа «насыщение». С учетом сказанного выше по методике [2] выполним синтез релейной системы оптимального управления.

Пусть для объекта управления (1) алгоритм управления моментом определяется выражением (2). При этом эквивалентная передаточная функция замкнутого контура, содержащего регулятор момента двигателя, равна единице, и объект управления для регулятора скорости двигателя описывается системой дифференциальных уравнений (без учета момента упругости):

$$\begin{aligned} p y_3 &= b_{33} y_3 - b_{34} y_4, \\ p y_4 &= k_1 U_4. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда уравнение оптимального регулятора скорости двигателя в функции регулируемой координаты и ее старших производных примет вид:

$$U_3 = \text{sign} \left[(-b_{33} + p)(y_3^* - y_3) \right]. \quad (8)$$

Эквивалентная передаточная функция замкнутого контура, содержащего регулятор скорости (8), равна единице, и объект управления для регулятора скорости исполнительного механизма описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} p y_1 &= b_{11} y_1 + b_{12} y_2; \\ p y_2 &= b_{21} y_1 + b_{23} y_3; \\ p y_3 &= k_2 U_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда алгоритм оптимального управления регулятора скорости исполнительного механизма будет иметь вид:

$$U_1 = \text{sign} \left[(-b_{21} b_{21}) + (-b_{11}) p + p^2 (y_1^* - y_1) \right]. \quad (10)$$

Анализ результатов моделирования системы с алгоритмами управления (2), (9), (10) показал ее явное преимущество (рис. 4) по сравнению с системами, рассмотренными выше. Так, при незначительном увеличении времени первого согласования при ступенчатом задающем воздействии (рис. 4, а) колебания угловой скорости двигателя практически отсутствуют, а амплитуда колебаний угловой скорости исполнительного механизма не превышает $0.002\omega_0$. Увеличение времени разгона объясняется в первую очередь снижением быстродействия контура момента. Эта же причина обуславливает наличие динамической ошибки регулирования на начальном участке разгона при экспоненциальном задающем воздействии (рис. 4, б). Отмеченный недостаток может быть устранен путем введения интегральной составляющей в алгоритм управления или увеличения коэффициентов передачи нелинейных фильтров. Однако в этом случае возрастет амплитуда колебаний скорости.

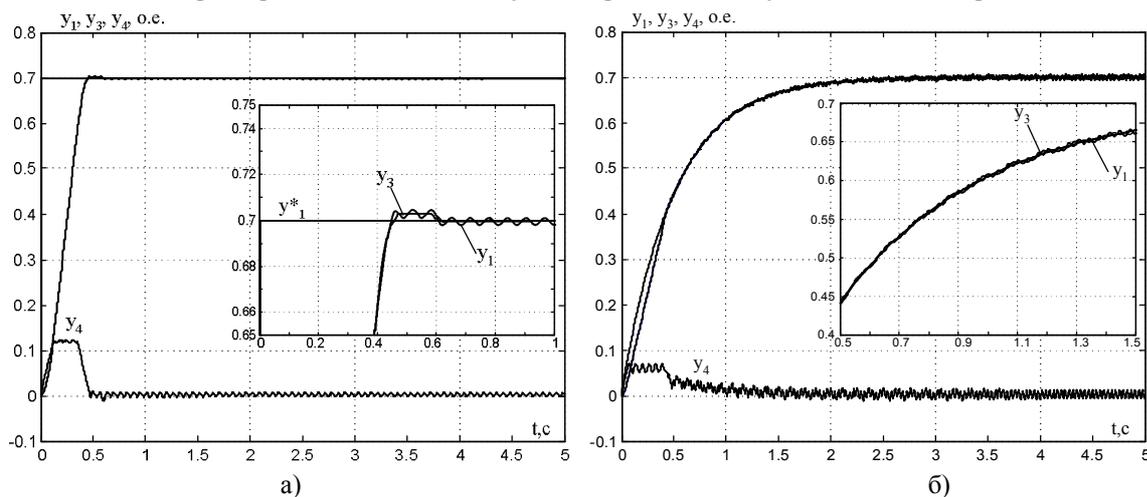


Рисунок 4 Динамика двухмассовой системы с алгоритмами оптимального управления (14) и (21): а) при ступенчатом задающем воздействии; б) при гармоническом задающем воздействии

Выводы. Таким образом, разделение движения контуров нелинейными фильтрами позволяет уменьшить влияние упругих связей в кинематических цепях электроприводов, тем самым повысив их качественные показатели. При этом техническая реализация предложенных алгоритмов управления не вызывает затруднений. Необходимо отметить, что выбор типа и параметров используемых динамических фильтров однозначно не определен и является темой дальнейших исследований.

Литература.

1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г., Иванов Г.М. Учет упруго-вязких связей при построении систем управления электроприводами. – Электричество, 1981, №3. С.29-35.
2. Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. - К.: ИСИМО, 1996. – 298с.
3. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 424с.
4. Сергиенко С.А. Повышение качественных показателей систем подчиненного регулирования электроприводов на основе модифицированного принципа симметрии: Дис. ... канд. тех. наук, 2004.