

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Удосконалено метод багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі побудови Парето-оптимального рішення, що дозволяє задовольнити різноманітним вимогам, які пред'являються до роботи систем в різних режимах та істотно скоротити час вирішення задачі. Наведені результати порівнянь динамічних характеристик електромеханічних систем з синтезованими регуляторами. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: багатомасова електромеханічна система, робастне керування, багатокритеріальний синтез, Парето-оптимальне рішення.

Усовершенствован метод многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе построения Парето-оптимального решения, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах и существенно сократит время решения задачи. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, робастное управление, многокритериальный синтез, Парето-оптимальное решение.

Введение. При создании новых поколений техники и новых технологий требуются системы автоматического управления, способные обеспечивать высокую точность при наличии интенсивных задающих и возмущающих воздействий, а также при изменении структуры и параметров систем в ходе их функционирования. К таким системам управления обычно предъявляются весьма разнообразные и часто противоречивые требования при работе системы в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических, случайных и т.д. [1].

Постановка задачи и цель работы. Одним из интенсивно развивающихся направлений современной теории систем управления являются системы робастного управления [2-4], имеющие существенно меньшую чувствительность к изменению структуры и параметров объекта управления и внешних воздействий. Синтез робастных систем затрудняется, прежде всего, формулированием такого критерия качества робастного управления, чтобы синтезированная система удовлетворяла предъявляемым техническим требованиям [5]. В работе [1] разработан метод многокритериального синтеза регуляторов, позволяющий удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. В последнее время для решения многоэкстремальных задач математического программирования широкое распространение получили бионические алгоритмы [6, 7]. В работе [8] разработан метод решения задачи многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации. Однако при этом задача многокритериальной оптимизации сводится к однокритериальной задаче путем сворачивания локальных критериев в один глобальный критерий с помощью принятой схемы компромиссов [1]. Решение этой однокритериальной задачи во всей области изменения искомым параметров является достаточно трудоемкой процедурой, вклю-

чающей большое количество диалоговых итераций с лицом, принимающим решение.

В связи с этим **целью данной работы** является усовершенствование метода решения задачи многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе Парето-оптимального решения, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе таких систем в различных режимах, и уменьшить время решение исходной задачи многокритериального синтеза.

Алгоритм нахождения множества Парето-оптимальных решений. Стандартным подходом к решению задач многокритериальной оптимизации является свертывание локальных критериев в один глобальный критерий с помощью принятой схемы компромиссов [5]. При этом нахождение глобального оптимума такого критерия во всей области изменения искомым параметров является достаточно трудоемкой процедурой, требующей от ЛППР – лица принимающего решения – диалоговой процедуры, включающей большое количество итераций. Альтернативным подходом проведения многокритериальной оптимизации является поиск множества не улучшаемых решений – множества Парето [10, 11]. Такой подход позволяет существенно сузить множество искомым параметров, а в результате – уменьшить время решение исходной задачи многокритериального синтеза.

Рассмотрим алгоритм нахождения множества Парето-оптимальных решений многокритериальных задач нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации. На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов оптимизации роем частиц – PSO алгоритмов на основе идеи коллективного интеллекта роя частиц, такие как gbest PSO и lbest PSO алгоритмы. Практически все эти алгоритмы могут быть описаны следующим выражением для изменения положения и скорости движения i -той частицы [6]

$$\begin{aligned}
v_{ij}(t+1) &= v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \\
&\quad + c_2 r_{2j}(t) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \\
x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1),
\end{aligned} \quad (1)$$

где $x_{ij}(t)$, $y_{ij}(t)$ – положение и скорость i -той частицы в j измерении; c_1 и c_2 – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной компонент скорости движения частицы; $r_{1j}(t)$ и $r_{2j}(t)$ – случайные числа из диапазона $[0, 1]$, определяющие стохастическую составляющую компонент скорости движения частицы.

Здесь $y_{ij}(t)$ и y_j^* наилучшие локальное и глобальное положения i -той частицы, найденные соответственно только одной i -той частицей и всеми частицами роя, которые являются аналогами локального оптимума p_i , определяемого i -той частицей и глобального оптимума g_i , определяемого всеми частицами роя.

Рассмотрим теперь алгоритм оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава популяции для различных типов целевых функций при наличии нескольких частных критериев. Одним из таких подходов является векторно-оценочный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации, при котором для вычисления скорости движения одного роя используется другой рой, причем каждый рой оптимизирует свою целевую функцию, так что скорости движения частиц определяются следующими выражениями [10]

$$S_1 v_{ij}(t+1) = w S_1 v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (S_1 y_{ij}(t) - S_1 x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (S_2 y_i^*(t) - S_1 x_{ij}(t)); \quad (2)$$

$$S_2 v_{ij}(t+1) = w S_2 v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (S_2 y_{ij}(t) - S_2 x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (S_1 y_i^*(t) - S_2 x_{ij}(t)). \quad (3)$$

Этот метод первоначально был разработан для решения задачи оптимизации только с двумя критериями, однако такой подход может быть использован и для решения задач оптимизации с большим числом критериев.

Обычно начальное положение агентов роя задается случайным образом, а затем из этого положение начинается движение роя к глобальному оптимуму, что характеризует стохастические свойства алгоритма оптимизации. Количество агентов в рое может оставаться постоянным, либо изменяться в процессе движения роя. При постоянном количестве агентов роя наиболее часто используются топологии роя типа «кольцо», «квадрат», «звезда» и «пирамида». В частности, в алгоритмах gbest PSO и lbest PSO используются топологии роя типа «звезда» и «кольцо». При изменении количества агентов в рое, начальное количество агентов роя задается случайным образом, а затем из этого количества агентов начинается случайное формирование нового количества агентов и новой топологии роя.

При своем движении частицы роя пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, за счет чего находят глобальный оптимум за меньшее количество итераций. Преимуществом этих методов перед классическими градиентными методами оптимизации

является также то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального приближения к искомому решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

Формирование нелинейной схемы компромисса при многокритериальном синтезе многомассовых систем. После того, как область искомых параметров сужена до множества неулучшаемых решений – множества Парето, возникает задача выбора единственного решения из этого множества, являющегося, по мнению ЛПР, наилучшим решением исходной задачи многокритериальной оптимизации. Эту точку можно выбрать с помощью схемы компромиссов. Рассмотрим один из подходов построения такой схемы. В технических требованиях, предъявляемых к проектируемой системе, обычно задаются максимальные значения отдельных показателей качества, являющихся частными критериями в задаче многокритериального синтеза системы, что позволяет выполнить их нормировку. При этом нормированные частные критерии y_i находятся в диапазоне $0 \leq y_i \leq 1$. Приближение нормированного значения i -го частного критерия к единице соответствует напряженной ситуации. При синтезе высокоточных систем управления таким напряженным частным критерием часто является неравномерность движения рабочего органа при наведении с минимальной скоростью. Если же величина нормированного значения частного критерия приближается к нулю, то это соответствует спокойной ситуации.

Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации используется простейшая нелинейная схема компромиссов [5], при которой исходная многокритериальная задача сводилась к однокритериальной

$$x^* = \arg \min_x f(x), \quad (4)$$

где скалярная целевая функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\bar{x})]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь α_i – весовые коэффициенты, характеризующие важность частных i -тых критериев и определяющие предпочтение отдельным критериям лицом, принимающим решение. Естественно, что такая формализация решения задачи многокритериальной оптимизации путем сведения к однокритериальной задаче позволяет обоснованно выбрать одну единственную точку из области компромиссов – области Парето. Однако эта «единственная» точка в дальнейшем может быть подвергнута испытаниям с целью дальнейшего улучшения схемы компромиссов с точки зрения лица, принимающего решение.

Заметим, что такая нелинейная схема компромиссов фактически соответствует методу штрафных функций с внутренней точкой, так как при приближении i -го критерия y_i к единице, т.е. при напряженной ситуации, скалярная оптимизация фактически выполняется только по этому напряженному частному критерию, а остальные критерии со спокойной ситуацией при

оптимизации практически не учитываются. Однако при начале оптимизации необходимо убедиться, что все частные критерии находятся в допустимых областях, т.е., что выполняются условия $0 \leq y_i \leq 1$ для всех нормализованных частных критериев. В противном случае, частные критерии, для которых эти условия не выполняются, переводятся в прямые ограничения.

Такая нелинейная схема компромиссов позволяет выбирать критерии в соответствии с напряженностью ситуации. Если какой-либо критерий близко подходит к своему предельному значению, то его нормированное значение приближается к единице. Тогда данная нелинейная схема компромисса фактически с помощью скалярного критерия проблему минимизации суммы критериев сводит к минимизации одного этого критерия, по которому имеется напряженная ситуация. Если же по другим критериям ситуация спокойная и их относительные значения далеки от единицы, то такая нелинейная схема компромиссов действует аналогично простой линейной схеме компромиссов. Таким образом, с помощью этой нелинейной схемы компромиссов фактически напряженность ситуации по отдельным критериям априорно вводится в скалярный критерий. Можно показать, что данная нелинейная схема компромисса удовлетворяет условию Парето-оптимальности, т.е. с помощью этой схемы удастся определить точку из области неулучшаемых решений.

Обычно при синтезе системы ряд технических требований предъявляются в форме ограничений g_i в виде равенств и неравенств типа больше либо равно или меньше либо равно заданных значений. Рассмотрим применение штрафных (барьерных) функций для решения задачи математического программирования при наличии ограничений. Вначале рассмотрим применение метода внутренней точки для решения задачи математического программирования, не содержащей ограничений в виде равенств. Предположим, что вблизи оптимальной точки выполнены условия локального оптимума относительно шага движения u_i в следующем виде

$$\begin{cases} g_i(x) \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ \nabla f(x) - \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Откуда может быть получено следующее равенство

$$\nabla f(x(r)) - \sum_{i=1}^m \frac{r}{g_i(x(r))} \nabla g_i(x(r)) = 0. \quad (7)$$

Это равенство можно интерпретировать как необходимое условие локального оптимума в виде равенства нулю градиента, при котором исходная целевая функция задачи нелинейного программирования (7) примет следующий вид

$$L(x, r) = f(x) - r \sum_{i=1}^m \ln g_i(x). \quad (8)$$

Аналогично может быть получена другая целевая функция при условии, что $\lambda_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m}$ из выражения для градиента

$$\nabla f[x(r)] - \sum_{i=1}^m \frac{r^2}{g_i^2[x(r)]} \nabla g_i[x(r)] = 0, \quad (9)$$

целевая функция $L_1(x, r)$ примет следующий вид

$$L_1(x, r) = f(x) + r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(x)}. \quad (10)$$

Эти целевые функции (8), (10) позволяют сводить исходную задачу нелинейного программирования при наличии ограничений к решению задачи безусловной оптимизации таким образом, что при приближении к границе ограничений изнутри, величина штрафа за нарушение ограничений стремится к бесконечности, что соответствует методу внутренней точки в алгоритме штрафных функций.

Рассмотренная нелинейная схема компромиссов (7) – (9) соответствует методу штрафных функций с внутренней точкой. При этом предполагается, что исходная точка является допустимой. При синтезе динамических систем обычно бывает ситуация, когда исходная точка является недопустимой. В частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности обработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других показателей качества, предъявляемых к системе. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза могут вообще быть не выполнены.

Однако при этом ряд критериев, таких как величины управляющих воздействий и переменных состояния являются допустимыми. Поэтому, в схеме компромиссов динамических систем целесообразно использовать комбинацию метода штрафных функций с внутренней точкой для одних локальных критериев, и с внешней точкой для других локальных критериев.

Рассмотрим более подробно применение метода внешней точки при решении задачи математического программирования при наличии ограничений. Этот метод необходимо применять в тех случаях, когда движение начинается из недопустимой области. Запишем исходное ограничение в следующем виде

$$g_i(x) \geq -r, i = \overline{1, m}, r > 0, \quad (11)$$

так, что исходные ограничения могут нарушаться на величину r .

Выберем направление движения из следующего условия

$$u_i(r) = -\min[0, g_i(x)]. \quad (12)$$

Тогда последовательно решая задачи оптимизации и уменьшая величину r , получим следующее предельное выражение

$$\lim_{r \rightarrow 0} [-\min(0, g[x(r)])] = 0, \quad (13)$$

$$u_i \geq 0, i = \overline{1, m}. \quad (14)$$

При этом выполняется условие локального оптимума

$$\nabla f[x(r)] - \sum_{i=1}^m u_i(r) \nabla g_i[x(r)] = 0, \quad (15)$$

а, следовательно, с учетом положительного направления движения, выполняется следующее неравенство

$$y^T \left\{ \nabla^2 f[x(r)] - \sum_{i \in D^*} u_i(r) \nabla^2 g_i[x(r)] \right\} y > 0. \quad (16)$$

Тогда может быть получено условие локального оптимума в следующем виде

$$\nabla f[x(r)] + \sum_{i=1}^m \frac{1}{r} \min\{0, g_i[x(r)]\} \nabla g_i[x(r)] = 0, \quad (17)$$

а, следовательно, исходная целевая функция задачи нелинейного программирования может быть записана в следующем виде

$$T(x) = f(x) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2r} \{\min[0, g_i(x(r))]\}^2. \quad (18)$$

Таким образом, метод внешней точки позволяет сводить исходную задачу нелинейного программирования (5) с ограничениями (6) к последовательности решения задач безусловной оптимизации, причем начальная точка может находиться в недопустимой области, так что ограничения исходной задачи нелинейного программирования не выполняются.

Заметим, что для ограничений в форме неравенств, компоненты штрафных функций имеют следующий вид

$$(\min\{0, g_i[x(r)]\})^2 = \left[\frac{g_i - |g_i|}{2} \right]^2. \quad (19)$$

Запишем ограничения в форме неравенств в следующем виде

$$g_{j1}(x) = h_j(x) \geq 0, \quad (20)$$

$$g_{j2}(x) = -h_j(x) \geq 0, \quad (21)$$

откуда $g_{j1} = -g_{j2}$, или

$$\frac{1}{r} \left\{ \left[\frac{g_{j1} - |g_{j1}|}{2} \right]^2 + \left[\frac{-g_{j1} - |-g_{j1}|}{2} \right]^2 \right\} = \frac{g_{j1}^2}{r} = \frac{\{h_j[x(r)]\}^2}{r}.$$

Если в исходной задаче нелинейного программирования (7) начальная точка выбрана так, что часть неравенств выполняется, а другая часть неравенств не выполняется, то необходимо использовать штрафные функции в виде комбинации методов внутренней и внешней точки, например в следующем виде

$$V(x, r, t) = f(x) + s(r)L(x) + p(t)T(x), \quad (22)$$

где $s(r)$ и $p(t)$ – весовые функции, учитывающие влияние функции штрафа $L(x)$ для метода внутренней точки и функции штрафа $T(x)$ для метода внешней точки, причем для получения оптимального решения и выполнения ограничений необходимо, чтобы $r \rightarrow 0$, а $t \rightarrow \infty$.

Результаты моделирования на ЭВМ. Рассмотрим исследование динамических характеристик и чувствительности к изменению параметров объекта управления двухмассовой электромеханической системы [12] с синтезированными робастными регуляторами. Фактически в системе управления имеются

нелинейные элементы. Это, в первую очередь, касается наличия сухого трения как в исполнительном двигателе, так и в объекте управления. Кроме того, в системе имеются нелинейные характеристики элементов упругости между исполнительными двигателями и приводными механизмами за счет люфтовыбирающих пружин. Рассмотрим влияние этих элементов на динамические характеристики системы. При этом будем рассматривать динамические характеристики системы для трех значений моментов инерции рабочего механизма – номинального и отличающихся от номинального значения в два раза в большую и меньшую стороны. Одним из напряженных критериев при синтезе системы является время переходного процесса в режиме отработки малых углов. В качестве примера на рис. 1 показаны переходные процессы: а) угла объекта управления; б) момента упругости; в) скорости объекта управления; г) скорости двигателя, д) тока двигателя в режиме отработки малых углов. Как видно из этих графиков, переходные процессы незначительно изменяются при изменении момента инерции рабочего механизма и удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе.

Другим напряженным критерием при синтезе системы является неравномерность движения объекта управления при наведении на малых скоростях. Заметим, что этот локальный критерий в значительной степени определяет потенциальную точность работы системы в одном из самых ответственных режимах работы системы. На рис. 2 показаны переходные процессы переменных состояния системы при движении объекта управления на малых скоростях с учетом всех нелинейностей. Как видно из этих графиков, несмотря на то, что робастный регулятор имеет астатизм второго порядка, однако синтезированная система при наведении на малых скоростях с учетом всех нелинейностей при разных значениях момента инерции объекта управления имеет установившуюся ошибку по углу поворота объекта управления, а сам объект управления движется неравномерно с участками остановки и трогания.

Напряженным критерием при синтезе системы является также режим движения объекта управления на больших – перебросочных скоростях. При этом особенно остро проявляются энергетические ограничения приводного двигателя. На рис. 3 показаны переходные процессы переменных состояния синтезированной системы при движении объекта управления на перебросочной скорости при разных значениях момента инерции объекта управления и с учетом всех нелинейностей. По аналогии с движением объекта управления на малых скоростях, несмотря на то, что робастный регулятор имеет астатизм второго порядка, однако синтезированная система при движении на перебросочных скоростях с учетом всех нелинейностей и при разных значениях момента инерции объекта управления также имеет установившуюся ошибку по углу поворота объекта управления, однако объект управления движется плавно и без остановок.

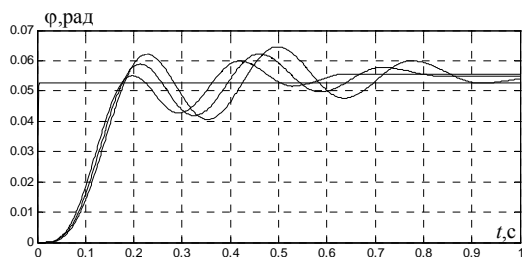
Одним из напряженных критериев при синтезе системы является точность отработки гармонических

воздействий заданных частот. Этот критерий связан с работой системы управления, установленной на подвижном основании объекта, движущегося по неровной дороге с заданной скоростью и заданными параметрами неровностей дороги. На рис. 4. показаны переходные процессы переменных состояния синтезированной системы при обработке гармонических воздействий частотой 1 Гц с учетом всех нелинейностей и при разных значениях момента инерции объекта управления.

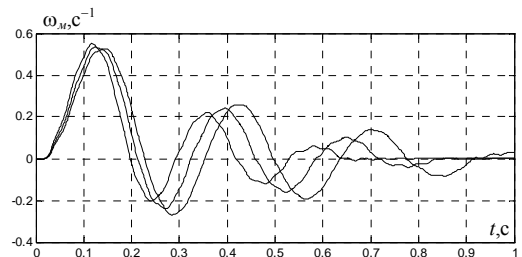
Таким образом, синтезированная система удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к системе.

Выводы.

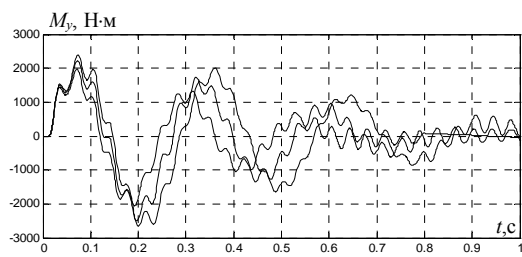
Усовершенствован метод многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе построения Парето-оптимального решения, а затем выбора одной – единственной точки. Нахождение множества Парето проводится на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах и существенно сократить время решения задачи. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Показано, что применение синтезированных робастных регуляторов позволило сократить время регулирования, повысить плавность движения рабочего органа, уменьшить ошибку компенсации гармонического внешнего возмущения и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.



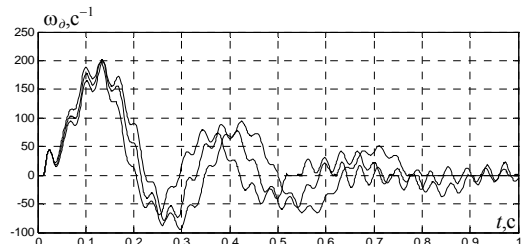
а



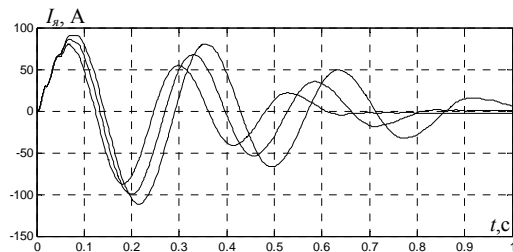
б



в

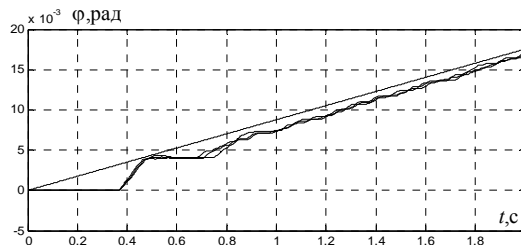


г

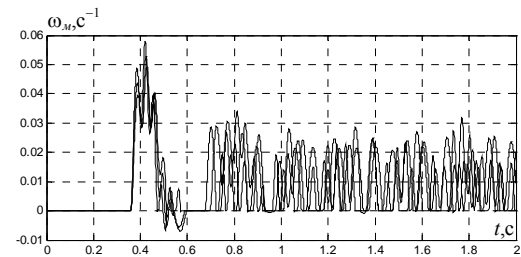


д

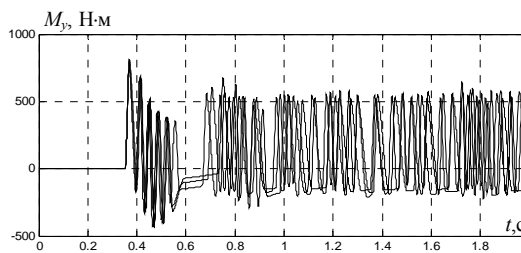
Рис. 1. Переходные процессы при обработке малых углов: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_0(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$



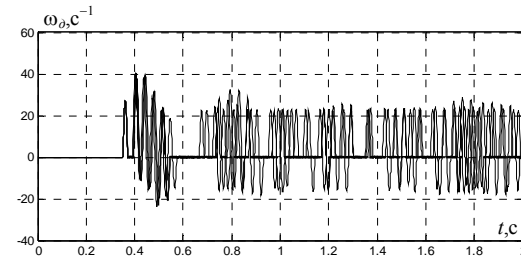
а



б



в



г

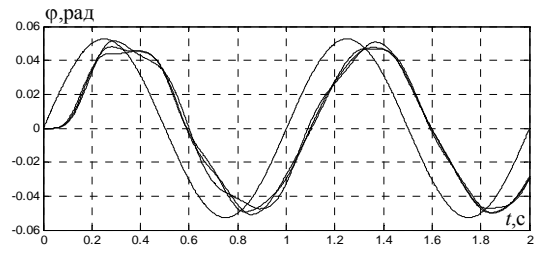
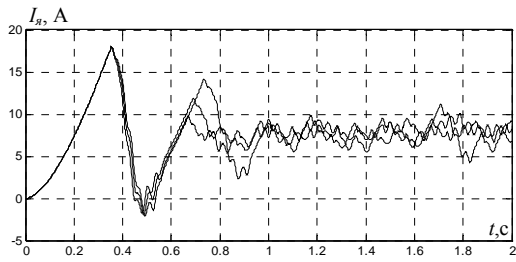


Рис. 2. Переходные процессы при наведении на малых скоростях: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$

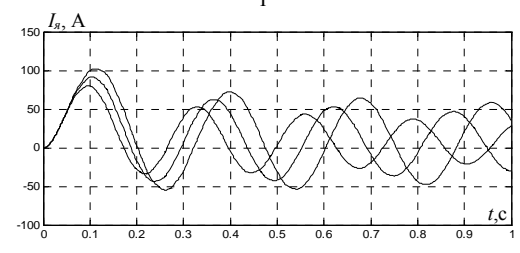
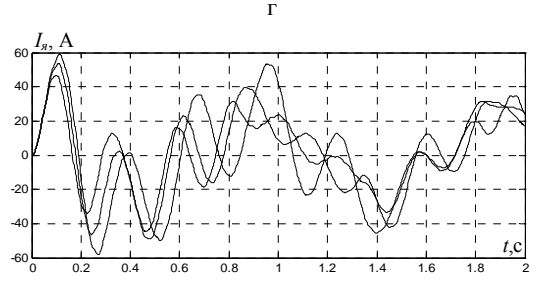
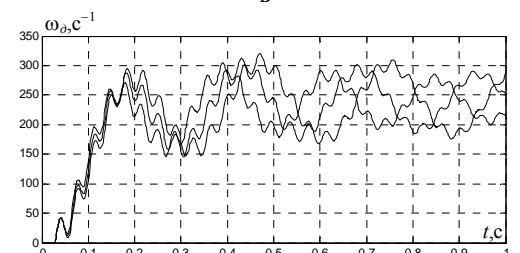
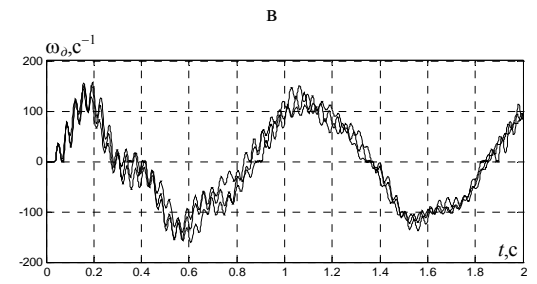
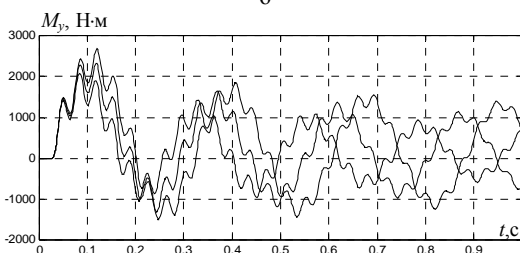
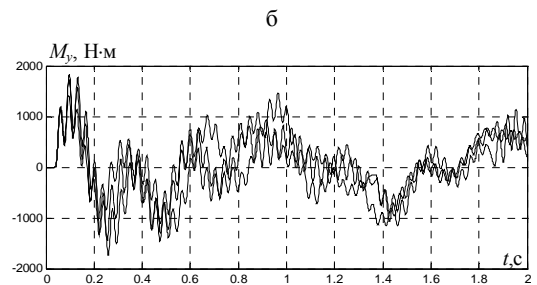
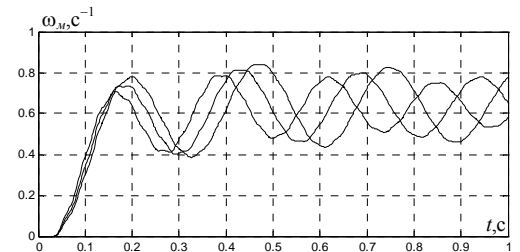
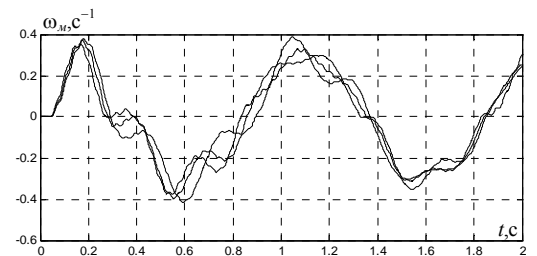
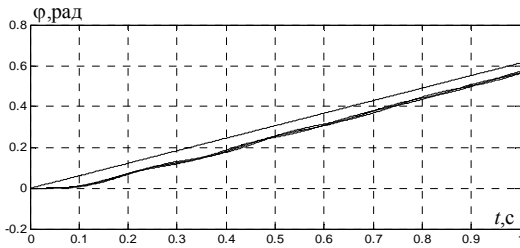


Рис. 3. Переходные процессы при наведении на перебросочных скоростях: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$

Рис. 4. Переходные процессы при отработке гармонических воздействий частотой 1 Гц: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. – Харьков: ХНАДУ, 2013. – 432 с.
2. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. Stochastic approach to H_∞ -optimization // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. Florida (USA). – 1994. – pp 2249-2250.
3. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy-based performance analysis of linear discrete time invariant control systems // International Journal of Control. – 2001. – vol. 74. – iss. 1. – pp. 28-42.

4. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R., Semyonov A.V. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ -optimization problem // Proc. 13th IFAC World Congress. San-Francisco (USA). – 1996. – pp. 427-432.

5. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.

6. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.

7. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.

8. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В. Многокритериальный синтез динамических систем на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации рою частиц // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №62(1104). – С. 77-86.

9. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.

10. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения [Под. ред. А.В. Лотова]. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.

11. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.

12. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с.

REFERENCES

1. Nikitina T.B. *Mnogokriterial'nyj sintez robustnogo upravlenija mnogomassovymi sistemami* [Multicriterion synthesis of robust control by multimass systems]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University Publ., 2013. 432 p. (Rus).

2. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. *Stochastic approach to H_∞ -optimization*. Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. Florida (USA), 1994, pp. 2249-2250. doi: 10.1109/cdc.1994.411485.

3. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy-based performance analysis of linear discrete time invariant control systems. *International Journal of Control*, 2001, vol.74, iss.1, pp. 28-42. doi: 10.1080/00207170150202661.

4. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R., Semyonov A.V. *State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ -optimization problem*. Proc. 13th IFAC World Congress. San-Francisco (USA), 1996, pp. 427-432.

5. Voronin A.N. *Mnogokriterial'nyj sintez dinamicheskikh sistem* [Multicriteria synthesis of dynamic systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 160 p. (Rus).

6. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.

7. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. Springer, 2011. 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.

8. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Khomenko V.V. Multiobjective synthesis of stochastic by multimass electromechanical systems based on stochastic multi-agent optimization. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, no.62(1104), pp. 77-86.

9. Nugin V.D. *Prinjatie reshenij v mnogokriterial'noj srede: kolichestvennyj podhod* [Multicriteria decision making environment: a quantitative approach]. Moscow, Fyzmatydzat Publ., 2004. 176 p. (Rus).

10. Shtouer R. *Mnogokriterial'naja optimizacija. Teorija, vychislenija i prilozhenija* [Multicriterion optimization. Theory, computation and application]. Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1992. 504 p. (Rus).

11. Batischev D.I., Shaposhnikov D.E. *Mnogokriterial'nyj vybor s uchetom individual'nyh predpochtenij* [Multicriteria selection to suit individual preferences]. Nizhny Novgorod, IPF RAN Publ., 1994. 92 p. (Rus).

12. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V. *Sintez elektromehaničeskikh sistem so slozhnymi kinematičeskimi cepjami* [Synthesis of electromechanical systems with complex kinematic chains]. Kharkiv, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy Publ., 2005. 512 p. (Rus).

Поступила (received) 20.11.2014

Никитина Татьяна Борисовна, д.т.н., проф.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 050 5766900, e-mail: tatjana55555@gmail.com

T.B. Nikitina
Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.
Multiobjective synthesis of robust control by multimass electromechanical systems based on Pareto-optimal solution.
A multiobjective method of synthesis of robust control of multimass electromechanical systems based on the construction of the Pareto-optimal solution is improved. A Pareto-optimal solution based on a stochastic multi-agent particles swarm optimization, which can significantly reduce the time for solving the problem and meet the diverse requirements that apply to the work of multimass electromechanical servo systems in different modes is founded. The results of comparisons of the dynamic characteristics of the electromechanical servo system with synthesized robust regulators are presented. References 12, figures 4.
Key words: multimass electromechanical system, robust control, multiobjective synthesis, Pareto-optimal solution.