

Адаптивные алгоритмы управления упругомассовыми объектами с неизвестными математическими моделями

Наталья Гудкова, Ксения Бесклубова (Ростовская обл.)

При синтезе традиционных систем автоматического управления упругомассовыми объектами серьёзную трудность вызывает их адекватное математическое описание. Статья посвящена исследованию возможностей приложения принципов адаптивного обратного моделирования к задачам управления такими объектами без использования их математических моделей. Показано, что разработанные алгоритмы обеспечивают минимизацию среднеквадратической ошибки и демпфирование колебаний в управляемом объекте. Приведены результаты имитационного моделирования адаптивной системы управления двухмассовым электроприводом, которые свидетельствуют об эффективности предложенных решений.

ВВЕДЕНИЕ

Значительную часть современного производственного оборудования составляют электроприводы механизмов с упругими передачами, которые называют упругомассовыми системами (объектами) [1–4].

Существенной особенностью такого рода объектов является взаимное влияние друг на друга механической и электрической частей устройства, т.е. упругие колебания в механической части приводят к возникновению колебательных режимов в электроприводе, что существенно усложняет управление объектом.

Постоянно возрастающие требования к качеству управления технологическими процессами вынуждают проектировщиков управляющих устройств учитывать упругие свойства таких объектов и, следовательно, использовать более точные математические модели для их описания.

Известно, что большинство известных методов синтеза автоматических систем управления базируется на использовании математической модели управляемого объекта. Для синтеза упругомассовых систем эти методы применимы далеко не всегда, т.к. на практике получить адекватное математическое описание упругих свойств объекта зачастую трудно, а иногда и невозможно. Это связано с погрешностями измерений, старением оборудования, внешними возмущениями, влияющими на характеристики объекта.

В подобных случаях выходом из положения может стать использование адаптивных алгоритмов, предназначенных для управления так называемыми неопределёнными объектами (НО), т.е. объектами с неизвестной математической моделью, иначе, объектами типа «чёрный ящик» [5–8]. Такой подход представляется авторам весьма перспективным направ-

лением в современной теории управления.

Статья посвящена некоторым вопросам приложения алгоритмов данного класса к задачам управления упругомассовыми объектами.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННЫМ ОБЪЕКТОМ

Схема адаптивной системы управления НО показана на рисунке 1.

Как видно из рисунка, система представляет собой цифроаналоговую структуру, состоящую из неопределённого динамического объекта (НО) и адаптивного регулятора, реализованного программно в управляющем компьютере (УК). Объект и регулятор связаны между собой преобразователями АЦП/ЦАП.

Система функционирует следующим образом.

Задающее воздействие (уставка) формируется в УК в виде дискретного сигнала g_k ($k=1, 2, \dots$), который поступает на вход адаптивной обратной модели объекта (АОМ). На выходе АОМ формируется дискретный управляющий сигнал u_k , который после преобразования в ЦАП подаётся на вход НО. Одновременно сигнал g_k поступает на вход эталонной модели системы (ЭМ), на выходе которой формируется эталонный (желаемый) процесс для управляемого объекта $x_k^{эТ}$. Выходной сигнал объекта x после преобразования в АЦП поступает на вход УК, где сравнивается с сигналом $x_k^{эТ}$, в результате чего вычисляется сигнал рассогласования (ошибка управления) системы по формуле:

$$\varepsilon_k = x_k^{эТ} - x_k. \quad (1)$$

Целью управления является адаптивная минимизация среднеквадратической ошибки (СКО) (1). Для решения этой задачи АОМ объекта реализуется

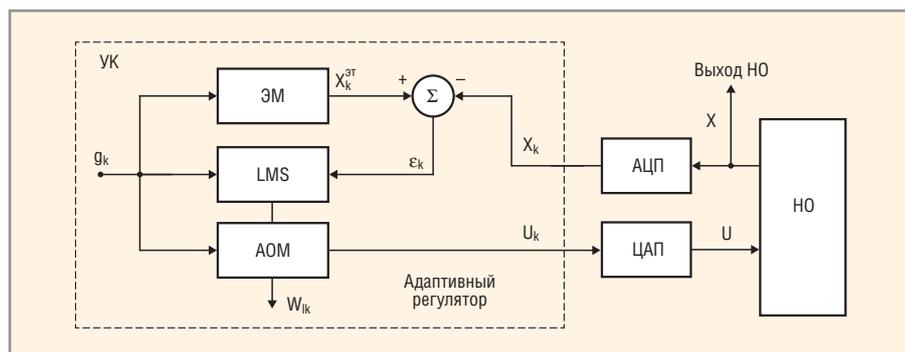


Рис. 1. Схема адаптивной системы управления неопределённым объектом

в виде адаптивного трансверсального фильтра (АТФ) [5].

Его уравнение имеет вид:

$$u_k = \sum_{l=1}^L w_{lk} g_{k-l}, \quad (2)$$

где L – число весовых коэффициентов фильтра w_{lk} , которые в процессе адаптации перестраиваются по методу наименьших квадратов (Least Mean Square, LMS) в соответствии с рекуррентным соотношением:

$$w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu g_{k-l} \varepsilon_k, \quad (3)$$

где μ – параметр (шаг) сходимости адаптивного алгоритма (3).

В данном случае суть адаптации заключается в том, что после завершения процесса перестройки вектор весовых коэффициентов оптимизируется таким образом, что среднеквадратическая ошибка $E[\varepsilon_k^2]$ становится равной своему минимальному значению, которое зависит от заданной относительной средней величины СКО M , которая ограничена пределами [6]:

$$0 < M < 1. \quad (4)$$

Для устойчивой работы алгоритма (3) должно выполняться условие:

$$\mu < \frac{M}{E[g_k^2]L}, \quad (5)$$

где $E[g_k^2]$ – средняя мощность сигнала g_k .

В отличие от традиционных принципов автоматического управления, в данной структуре, как и в системах [5–8], не используется физическая отрицательная обратная связь между выходом объекта и входом системы. Её роль играет функциональная обратная связь, замыкающаяся через адаптивный процесс.

Из приведённого алгоритмического описания видно, что управление по принципу адаптивного обратного моделирования не требует знания математической модели объекта, так как управляющее воздействие формируется только на основе информации о текущих значениях сигналов g_k и ε_k .

МЕТОДИКА СИНТЕЗА

Синтез адаптивной системы – задача нетривиальная, т.к. из-за неопределённости объекта трудно получить однозначное решение в каждом отдельном случае. В данной работе предпринята попытка формализовать эту процедуру, которая здесь сводится к выбору параметров АОМ и ЭМ. Как показано в [8], для этого достаточно иметь лишь некоторую априорную информацию о динамических свойствах НО, например, о форме его переходной характеристики и/или о времени её установления $t_{уст}$.

Процедура синтеза рассматриваемой системы сводится к следующим действиям:

- задаётся шаг (интервал) дискретизации сигналов по времени T из условия:

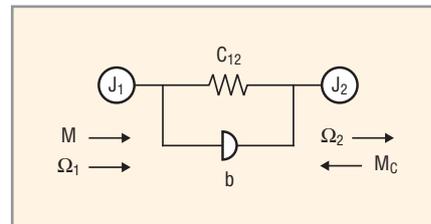


Рис. 2. Расчётная схема двухмассовой механической части электропривода

$$T_{алг} \leq T \leq (0,01 \dots 0,001) t_{уст}, \quad (6)$$

где $T_{алг}$ – ориентировочное время обработки информации в управляющем компьютере и преобразователях ЦАП/АЦП;

- выбирается эталонная модель системы (ЭМ). Это может быть динамическое звено любого вида, однако практика показала, что во многих случаях хорошие результаты получаются при использовании в качестве ЭМ апериодического звена первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{ЭТ}(s) = \frac{X_{ЭТ}(p)}{G(p)} = \frac{K_{ЭТ}}{T_{ЭТ}p + 1}, \quad (7)$$

где $K_{ЭТ}$ – желаемый коэффициент передачи системы, а $T_{ЭТ}$ – постоянная времени, которая задаётся соотношением:

$$T_{ЭТ} \leq t_{уст}/4; \quad (8)$$

- задаётся желаемая относительная ошибка адаптации системы M (4);

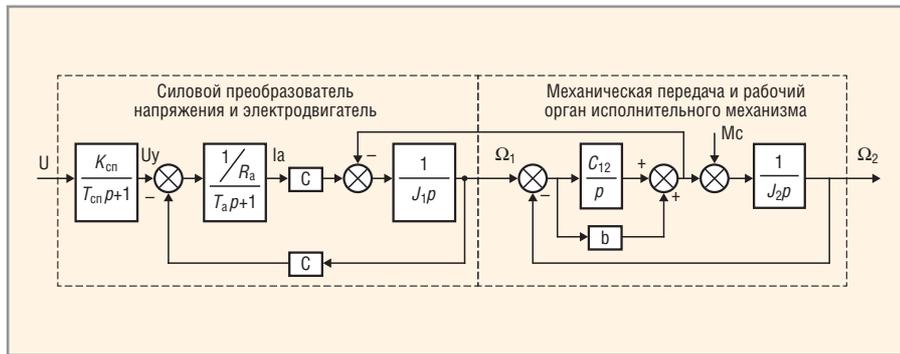


Рис. 3. Обобщённая структурная схема объекта «электропривод – двухмассовый механизм»

● выбираются параметры L и μ АОМ из условия (5), в котором в качестве средней мощности входного сигнала системы $E[g_k^2]$ используется её предельно допустимое по условиям эксплуатации значение.

Слабым местом методики синтеза рассматриваемой структуры является отсутствие возможности теоретической оценки верхнего предела параметра M , соответствующего границе устойчивости системы, поэтому расчётные параметры должны уточняться в процессе её функционирования.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УПРУГОМАССОВЫМ ОБЪЕКТОМ

Для иллюстрации процедуры и результатов синтеза системы необ-

ходимо иметь имитационную модель неопределённого объекта. С этой целью используем структурную модель двухмассового электропривода [4], которая достаточно корректно отражает упругие свойства системы «электродвигатель – рабочий орган».

На рисунке 2 приведена расчётная схема двухмассовой механической части электропривода, а на рисунке 3 – обобщённая структурная схема объекта «электропривод – двухмассовый механизм».

На схемах приняты следующие обозначения величин и параметров: J_1 и J_2 – моменты инерции первой (ротор двигателя) и второй (рабочий орган) масс соответственно; J_1 и J_2 – их угловые скорости; C_{12} и b – приведённый коэффициент жёсткости и коэффициент внутреннего вязкого

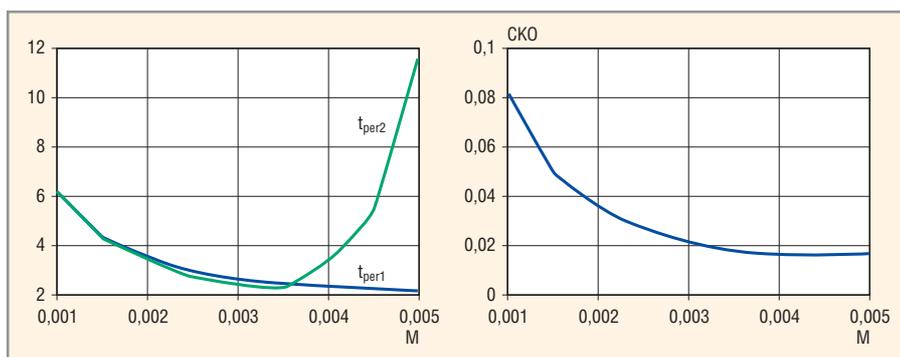


Рис. 5. Зависимости времени регулирования по каналам Ω_1 и Ω_2 и величины СК0 от значений M при $T = 0,004$ с

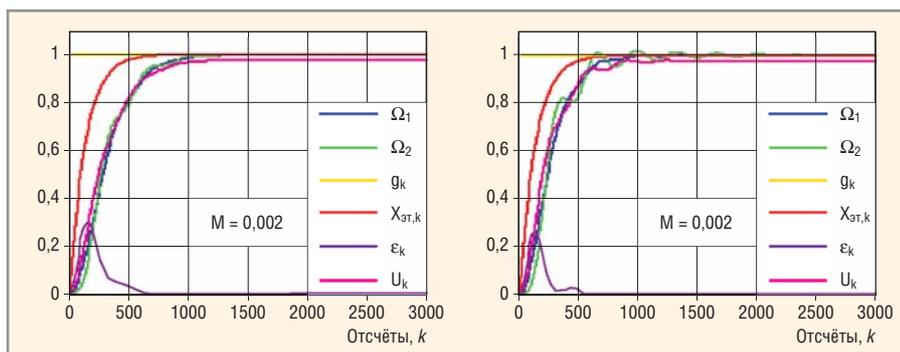


Рис. 6. Устойчивые переходные процессы в адаптивной системе

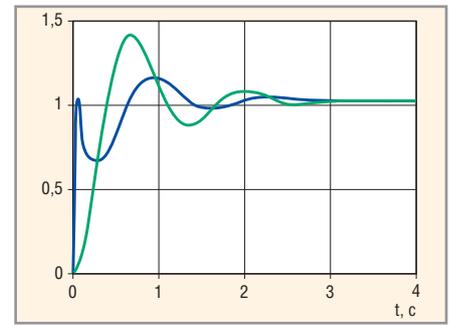


Рис. 4. Угловые скорости электродвигателя $\Omega_1(t)$ и рабочего органа $\Omega_2(t)$ при $U(t) = 1$ В

трения кинематической передачи; M – момент, развиваемый двигателем; M_c – момент сопротивления нагрузки; U и U_y – управляющее и выходное напряжения силового преобразователя напряжения; I_a – ток якорной цепи электродвигателя; $K_{сн}$ и $T_{сн}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя; R_a и T_a – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи, C – конструктивная постоянная двигателя.

Используя численные значения параметров, приведённые в [4], преобразуем данное структурное представление (без учёта пренебрежимо малой постоянной времени силового преобразователя $T_{сн}$) к передаточным функциям объекта, где выходными являются измеряемые угловые скорости ротора двигателя и рабочего органа:

$$W_1(p) = \frac{\Omega_1(p)}{U(p)} = \frac{2506p^2 + 984,6p + 62660,5}{p^4 + 52,4p^3 + 2718p^2 + 8575p + 61157},$$

$$W_2(p) = \frac{\Omega_2(p)}{U(p)} = \frac{984,7p + 62660,5}{p^4 + 52,4p^3 + 2718p^2 + 8575p + 61157}. \quad (9)$$

На рисунке 4 показаны переходные характеристики двухмассового объекта, полученные в среде MATLAB по передаточным функциям (9). Здесь синим цветом отображена характеристика $\Omega_1(t)$, а зелёным цветом – характеристика $\Omega_2(t)$ при подаче на вход объекта нормированного напряжения $U(t) = 1$ В.

По характеристикам определяем время установления переходных процессов: по каналу $U \rightarrow \Omega_1$: $t_{уст1} = 1,63$ С, по каналу $U \rightarrow \Omega_2$: $t_{уст2} = 1,63$ С.

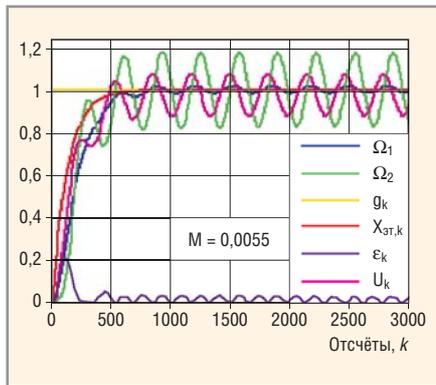


Рис. 7. Неустойчивые переходные процессы в адаптивной системе

Из рисунков видно, что оба процесса представляют собой затухающие колебания со значительным перерегулированием: для Ω_1 : $\sigma_1 = 13\%$, для Ω_2 : $\sigma_2 = 38\%$, при этом число колебаний скорости Ω_2 за время установления $N_2 = 1,5$.

Как сказано выше, рассматриваемая управляющая структура гарантирует адаптивную минимизацию среднеквадратической ошибки управления неизвестным объектом $E[\varepsilon_k^2] = \min$. Однако во многих случаях для качественной работы промыш-

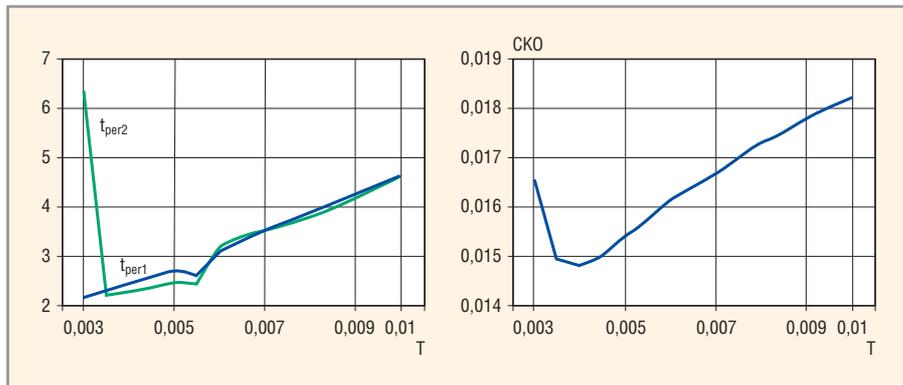


Рис. 8. Зависимости времени регулирования по каналам Ω_1 и Ω_2 и величины СКО от значений T при $M = 0,0035$

ленных электроприводов этого недостаточно.

Требуется также

- обеспечить подавление колебаний как в электродвигателе, так и в рабочем органе управляемого объекта;
- обеспечить время регулирования процессов $\Omega_1(t)$ и $\Omega_2(t)$ в системе, отвечающее условиям $t_{per1} \leq t_{уст1}$ и $t_{per2} \leq t_{уст2}$.

Ниже приводятся некоторые результаты имитационного моделирования в пакете MATLAB адаптивной системы

управления двухмассовым электроприводом при постоянном нормированном задающем воздействии $g_k = 1$ и нулевом моменте сопротивления нагрузки $M_c = 0$. Число коэффициентов АОМ $L = 1$.

Целью моделирования было исследование влияния на качество управления объектом относительной среднеквадратической ошибки адаптации M и интервала дискретизации сигналов по времени T . Для этого рассмотрены два варианта сочетания этих параметров.

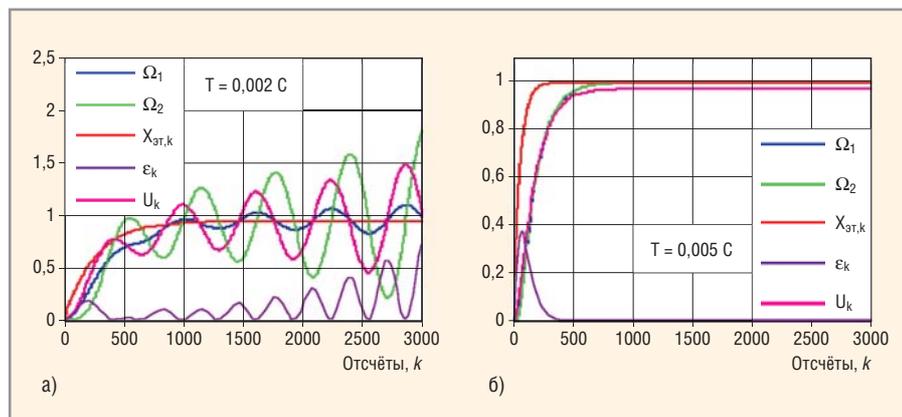


Рис. 9. Переходные процессы в адаптивной системе
а – неустойчивый режим; б – устойчивый режим

ВАРИАНТ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИ T = CONST; M = VAR

По результатам моделирования составлена таблица 1, отражающая зависимость от заданной относительной ошибки M показателей качества

системы: времени регулирования ($t_{пер1}$ и $t_{пер2}$), перерегулирования (σ_1 и σ_2) в обоих каналах, числа колебаний N_2 сигнала $\Omega_2(t)$, а также величины СКО при выбранном из диапазона (6) значении интервала $T = 0,004$ с.

Таблица 1. Зависимость показателей качества адаптивной системы от заданной величины M при T = 0,004 с

| M | $t_{пер1}, c$ | $t_{пер2}, c$ | $\sigma_1, \%$ | $\sigma_2, \%$ | N_2 | СКО |
|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------|--------|
| 0,001 | 6,23 | 6,23 | 0 | 0 | 0 | 0,0677 |
| 0,0015 | 4,38 | 4,34 | 0 | 0 | 0 | 0,0418 |
| 0,002 | 3,53 | 3,53 | 0 | 0 | 0 | 0,0293 |
| 0,0025 | 2,95 | 2,74 | 0 | 0 | 1 | 0,0221 |
| 0,003 | 2,64 | 2,42 | 0,1 | 0,7 | 3 | 0,0177 |
| 0,0035 | 2,46 | 2,30 | 0,2 | 2,2 | 4 | 0,0148 |
| 0,004 | 2,34 | 3,36 | 0,3 | 4,3 | 6 | 0,0130 |
| 0,0045 | 2,23 | 5,24 | 0,5 | 7,5 | 9 | 0,0124 |
| 0,005 | 2,12 | 11,63 | 0,8 | 11,9 | 9 | 0,0139 |

Таблица 2. Зависимость показателей качества адаптивной системы от заданной величины T при M = 0,0035

| $T, \times 10^{-3} c$ | $t_{пер1}$ | | $t_{пер2}$ | | $\sigma_2, \%$ | N_2 | СКО |
|-----------------------|------------|------|------------|------|----------------|-----------|-----------------|
| | отсчёты | с | отсчёты | с | | | |
| 1...2,5 | – | – | – | – | – | 2,5...5,5 | 1,7152...0,0298 |
| 3 | 730 | 2,19 | 2173 | 6,52 | 8,7 | 6,5 | 0,0150 |
| 3,5 | 667 | 2,33 | 635 | 2,22 | 4,3 | 6 | 0,0149 |
| 4 | 616 | 2,46 | 575 | 2,3 | 2,2 | 4 | 0,0148 |
| 4,5 | 577 | 2,6 | 531 | 2,39 | 1 | 3 | 0,0150 |
| 5 | 549 | 2,75 | 502 | 2,51 | 0,3 | 2 | 0,0154 |
| 5,5 | 530 | 2,65 | 489 | 2,45 | 0,1 | 1 | 0,0157 |
| 6 | 520 | 3,12 | 538 | 3,23 | 0 | 0 | 0,0161 |
| 6,5 | 513 | 3,33 | 525 | 3,44 | 0 | 0 | 0,0164 |
| 7 | 504 | 3,53 | 505 | 3,54 | 0 | 0 | 0,0167 |
| 7,5 | 495 | 3,71 | 490 | 3,68 | 0 | 0 | 0,0170 |
| 8 | 486 | 3,89 | 479 | 3,83 | 0 | 0 | 0,0173 |
| 8,5 | 479 | 4,07 | 471 | 4,00 | 0 | 0 | 0,0175 |
| 9 | 473 | 4,26 | 467 | 4,20 | 0 | 0 | 0,0178 |
| 9,5 | 469 | 4,46 | 465 | 4,42 | 0 | 0 | 0,0180 |
| 10 | 465 | 4,65 | 463 | 4,63 | 0 | 0 | 0,0182 |

Из таблицы 1 видно, что при малых значениях M колебания в объекте практически полностью подавляются, но при этом затягиваются процессы регулирования в системе. С увеличением показателя M быстродействие и точность системы повышаются до тех пор, пока величина M не станет равной оптимальному для данного объекта значению; при дальнейшем увеличении этого параметра возрастает колебательность процессов и система переходит в неустойчивый режим.

По данным табл. 1 построены графики зависимостей $t_{пер1}(M)$, $t_{пер2}(M)$ и СКО(M), показанные на рисунке 5, из которых видно, что при заданном периоде $T = 0,004$ с оптимальное значение $M_{опт} \approx 0,0035$.

Некоторые характерные для рассматриваемого случая процессы адаптации в системе при различных значениях M показаны на рисунках 6 и 7.

ВАРИАНТ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИ M = CONST; T = VAR

По результатам моделирования составлена таблица 2, которая отражает зависимость показателей качества адаптивной системы от шага дискретизации T при значении $M_{опт} = 0,0035$.

На рисунке 8 показаны графики зависимостей $t_{пер1}(T)$, $t_{пер2}(T)$ и СКО(T). Характерные процессы в адаптивной системе при различных значениях T показаны на рисунке 9.

Из приведённых данных видно, что шаг дискретизации сигналов по времени оказывает существенное влияние на свойства системы: при малых значениях T процессы неустойчивы; увеличение шага дискретизации приводит к уменьшению колебательности и затягиванию переходных процессов.

Анализ характеристик на рисунках 5 и 8 показывает, что частичного или полного выполнения требований, предъявляемых к качеству управления рассматриваемым объектом, можно добиться путём соответствующего выбора отношения параметров M/T^* , где $T^* = T/t_{уст2}$ – масштабированное значение шага дискретизации. На рисунке 10 показаны графики зависимости величин СКО и σ_2 от соотношений M/T^* , которые иллюстрируют это положение.

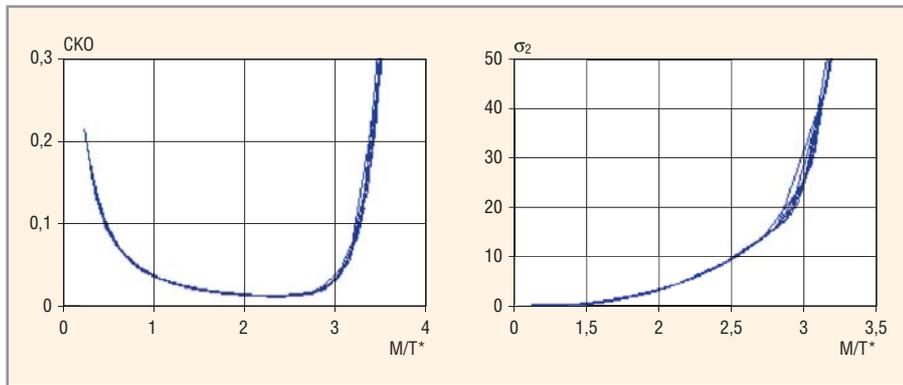


Рис. 10. Зависимости величин SКО и σ_2 от значений M/T^*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

- метод адаптивного обратного моделирования может успешно применяться в задачах управления упругомассовыми объектами с неопределёнными математическими моделями;
- разработанный способ формализации процедуры синтеза адаптивного регулятора позволяет обеспечить минимизацию среднеквадратической ошибки системы и

практически полное подавление колебаний на выходе рабочего органа объекта. Однако, поскольку имитационное моделирование адаптивной системы проводилось только для конкретного вида объектов, данный вывод не может претендовать на общность и его подтверждение требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1992.

2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб: Профессия, 2004.

3. Тарарыкин С.В., Копылова Л.Г., Тотиков В.В. Особенности управления состоянием электромеханических систем при ограниченной мощности исполнительных устройств. Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 6.

4. Гудкова Н.В., Чуйков В.М. Синтез упругомассовых систем управления по желаемой переходной характеристике. Современная электроника. 2011. № 3.

5. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М: Радио и связь, 1989.

6. Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования. Автоматизация и современные технологии. 2006. № 4.

7. Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach, Wiley, Hoboken, NJ, 2008.

8. Гудкова Н.В. Приложение принципов адаптивного моделирования к задачам управления динамическими объектами типа «чёрный ящик». Современная электроника. 2012. № 8.

