

## Адаптивный регулятор сигнального типа для управления нестационарной электромеханической системой

Д.В. Горлатов<sup>1</sup>, Д.А. Томчин<sup>2</sup>, Т.А. Свенцицкая<sup>3</sup>, О.И. Токарева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения Российской Академии наук

<sup>3</sup>Военно-космическая Академия имени А.Ф. Можайского

<sup>4</sup>Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С.О. Макарова

**Аннотация:** Рассматривается нестационарная система автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока с адаптивным регулятором. Произведено сравнительное имитационное моделирование в Simulink системы с адаптером и без него. Результаты моделирования подтверждают устойчивость адаптивной системы в большом диапазоне изменения нестационарного параметра по сравнению с обычной системой. При этом быстродействие и качество переходных процессов сохраняются на уровне, рекомендуемом для подобных систем.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, нестационарность, адаптивный регулятор, система подчиненного регулирования, электромеханический объект, двигатель постоянного тока.

### Введение

В современном технологически развитом мире, с постоянно увеличивающимся числом всевозможных машин и технических устройств, как малых (пользовательского уровня), так и больших (промышленного уровня), требующих точности и непрерывного контроля, на первый план выходят системы автоматического управления, способные с точностью и реакцией, превышающей человеческую, выполнять функции управления. Поэтому одной из актуальных проблем современной теории управления является разработка алгоритмов, обеспечивающих требуемое качество процессов для сложных объектов, в том числе характеризующихся неопределенностью или нестационарностью параметров. Одним из эффективных подходов к решению этой задачи является использование адаптивных алгоритмов [1], [2].

Данный подход целесообразно применять для управления такими техническими системами как металлорежущие станки [3], в том числе для

---

самопрограммирования траекторий перемещения режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ [4]. Кроме того, данный подход эффективен при разработке систем управления роботами-манипуляторами [5], [6] и нелинейными объектами в приборостроении [7], [8].

При управлении электромеханическими объектами (ЭМО) с неизменяющимися параметрами хорошо зарекомендовал себя подход, базирующийся на использовании структур подчиненного регулирования [9], [10].

Однако при расчете параметров типовых регуляторов, применяющихся в указанных структурах, необходима точная информация о значениях массо-инерционных параметров ЭМО, которые, в свою очередь, определяют коэффициенты усиления и постоянные времени в модели объекта.

В данной работе исследуется ЭМО в виде двухконтурной структуры подчиненного регулирования скорости электродвигателя постоянного тока (ДПТ). При создании модели будем считать механическое соединение между электроприводом и движимым им механизмом жестким.

В таком случае требуемые показатели качества во всем диапазоне изменения переменного параметра может обеспечить ввод в структуру управления дополнительного адаптивного регулятора.

В данной статье для управления ЭМО предлагается использовать адаптивный регулятор сигнального типа. Исследование эффективности разработанной адаптивной системы управления при изменении суммарного момента инерции производится с помощью программы Simulink, причем предполагается, что нестационарный коэффициент передачи в исходном объекте изменяется линейно.

## **1. Описание исследуемого электромеханического объекта**

В данной статье в качестве ЭМО рассматривается двухконтурная структура подчиненного регулирования скорости электрического двигателя

постоянного тока (рис. 1). На рис. 1 использованы следующие обозначения: РС, РТ – пропорционально-интегральные регуляторы скорости и тока; ТП – тиристорный силовой преобразователь; Д – двигатель, ДС, ДТ – датчики скорости и тока;  $I_{я}$  – ток якоря;  $\omega$  – угловая скорость двигателя;  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;  $k_d = 1/k\Phi$  – коэффициент передачи двигателя по моменту;  $k_{п}$ ,  $k_{от}$ ,  $k_{от}$  – коэффициенты усиления П и обратных связей по току и скорости;  $T_{тп}$ ,  $T_{дт}$ ,  $T_{дс}$  – постоянные времени преобразователя, датчиков тока и скорости;  $T_{я}$  – постоянная времени якоря;  $R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи;  $\beta_1$ ,  $\tau_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\tau_2$  – динамические коэффициенты усиления и постоянные времени РС и РТ соответственно;  $U_{рс}$ ,  $U_{рт}$ ,  $U_{дт}$ ,  $U_{дс}$  – выходные напряжения регуляторов и датчиков;  $U_{зс}$  – задающее напряжение.

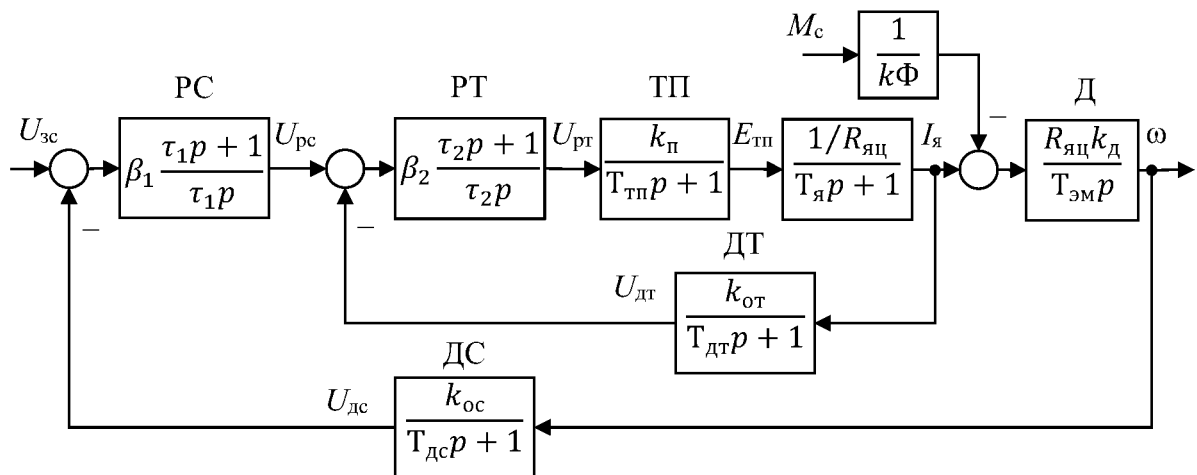


Рис. 1 – Двухконтурная структура подчиненного регулирования скорости электрического двигателя постоянного тока

Однако у таких объектов параметры в процессе работы могут меняться. Например, при работе карусельного станка может варьироваться момент инерции механизма  $J_M$ . Это приводит к изменению суммарного момента инерции системы «двигатель – механизм»  $J_{\Sigma} = J_D + J_M$ , где  $J_D$  – момент инерции двигателя.

$J_{\Sigma}$  непосредственно влияет на инерционность ЭМО, т. е. на  $T_{\Sigma}$ , участвующую в расчете коэффициента усиления регулятора скорости  $\beta_1$ :

$$\beta_1 = T_{\Sigma} / (2k_{o1}T_{\Sigma1}); \tau_1 = 4T_{\Sigma1},$$

где  $T_{\Sigma} = J_{\Sigma}R_{яц} / (k\Phi)^2$ ;  $k_{o1} = R_{яц}k_{д}k_{oc} / k_{от}$ ;  $T_{\Sigma1} = 2T_{\Sigma2} + T_{дс}$ ;  $T_{\Sigma2} = T_{тп} + T_{дт}$ . Тогда качество процессов в ЭМО при значениях  $T_{\Sigma}$ , отличающихся от величины, для которой производился расчет  $\beta_1$ , будет неудовлетворительным. Данный факт указывает на необходимость ввода в систему адаптивного регулятора.

## 2. Алгоритм адаптивного управления для регулирования скорости электрического двигателя постоянного тока

Адаптивное управление целесообразно применять, если параметры объекта переменные или постоянные, но неизвестные, а известен лишь диапазон, в котором значения параметров могут изменяться. Двумя важнейшими классами ЭМО, в которых эффективно используется адаптивное управление, являются станки и манипуляционные роботы. Так, использование адаптации при управлении манипуляционными роботами может быть обусловлено изменением массо-инерционных параметров при наличии у манипулятора сочленений телескопического типа.

В электроприводах станков адаптивные системы управления предпочтительно применять в следующих случаях:

- при изготовлении на одном станке большого ассортимента деталей, подразумевающего обработку заготовок, сильно отличающихся друг от друга по габаритам и свойствам материалов;
- в прецизионных станках для обеспечения повышенных требований к допускам, особенно в условиях нестационарности каких-либо параметров;
- при выполнении работ с материалами, трудно поддающимся обработке, или необходимости изготовить деталь сложной формы и т. д.

Согласно [11], адаптивную систему управления ЭМО с эталонной моделью (ЭМ) можно представить в виде векторно-матричной модели. В случае линейной нестационарной модели объекта уравнение в пространстве состояний будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{x}(t) = A(\xi, t)x(t) + B(\xi, t)u(t). \quad (1)$$

Для задания желаемого поведения объекта (1), используется ЭМ:

$$\dot{x}_M(t) = A_M x_M(t) + B_M r(t), \quad (2)$$

где все элементы матриц  $A_M$  и  $B_M$  постоянные известные числа. Размеры векторов состояния  $x$ ,  $x_M \in R^n$ , а также матриц ЭМ и объекта согласованы:  $A(\xi, t)$ ,  $A(\xi)$ ,  $A_M$  –  $n \times n$ -матрицы,  $B(\xi, t)$ ,  $B(\xi)$ ,  $B_M$  –  $n \times m$ -матрицы,  $\xi$  – вектор неизвестных параметров объекта. Кроме того, матрица  $A_M$  – гурвицева, что гарантирует асимптотическую устойчивость адаптивной системы. Матрицы управления ЭМО и ЭМ ( $B$  и  $B_M$  соответственно) имеют полный ранг ( $\text{rang } B = m$ ,  $\text{rang } B_M = m$ ), что обеспечивает выполнение условий согласованности модели и объекта [12]:

$$A - A_M = BK_a, B - B_M = BK_b. \quad (3)$$

где  $m \times n$ -матрица  $K_a$  и  $m \times m$ -матрица  $K_b$  являются решениями уравнений (3).

Как известно, условие согласованности выполняется, если матрицы  $K_a$  и  $K_b$  существуют.

Цель управления может быть задана с помощью вектора ошибки  $e \in R^n$

$$e(t) = x(t) - x_M(t) \rightarrow 0, \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Тогда алгоритм адаптации сигнального типа следующий:

$$u_a(t) = -\gamma \text{sign}(B^T P e(t)), \quad (5)$$

где функция  $\text{sign } x = 1$  при  $x \geq 0$  и  $\text{sign } x = -1$  при  $x < 0$ , а  $n \times n$ -матрица  $P$  является решением матричного уравнения Ляпунова для матрицы  $A_M$  эталонной модели:  $A_M^T P + P A_M = -Q$ , где  $P = P^T > 0$ ,  $Q = Q^T > 0$ .

Адаптивный регулятор, синтезированный на основе формулы (5), рассчитывается следующим образом [13]:

$$u_a(t) = -\gamma \text{sign} \left\{ 0 \frac{1/k_{oc}}{2T_{\Sigma 1}^2} \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \right\} = -\gamma \text{sign} \left[ \frac{k_M}{2T_{\Sigma 1}^2} p_2 e_1(t) + \frac{k_M}{2T_{\Sigma 1}^2} p_3 e_2(t) \right],$$

где  $k_M = 1 / k_{oc}$ ,  $T_{\Sigma 1} = T_{dc} + 2(T_{дт} + T_{тп})$ ,  $p_i$  – элементы матрицы  $P$  (отметим, что коэффициент  $p_1$  при формировании сигнала адаптации не используется).

Сигнал управления системой, описываемой уравнениями (1) и (2), имеет следующую аддитивную форму:  $u(t) = r(t) + u_a(t)$ .

Адаптивная система управления исследуемым ЭМО показана на рис. 2.

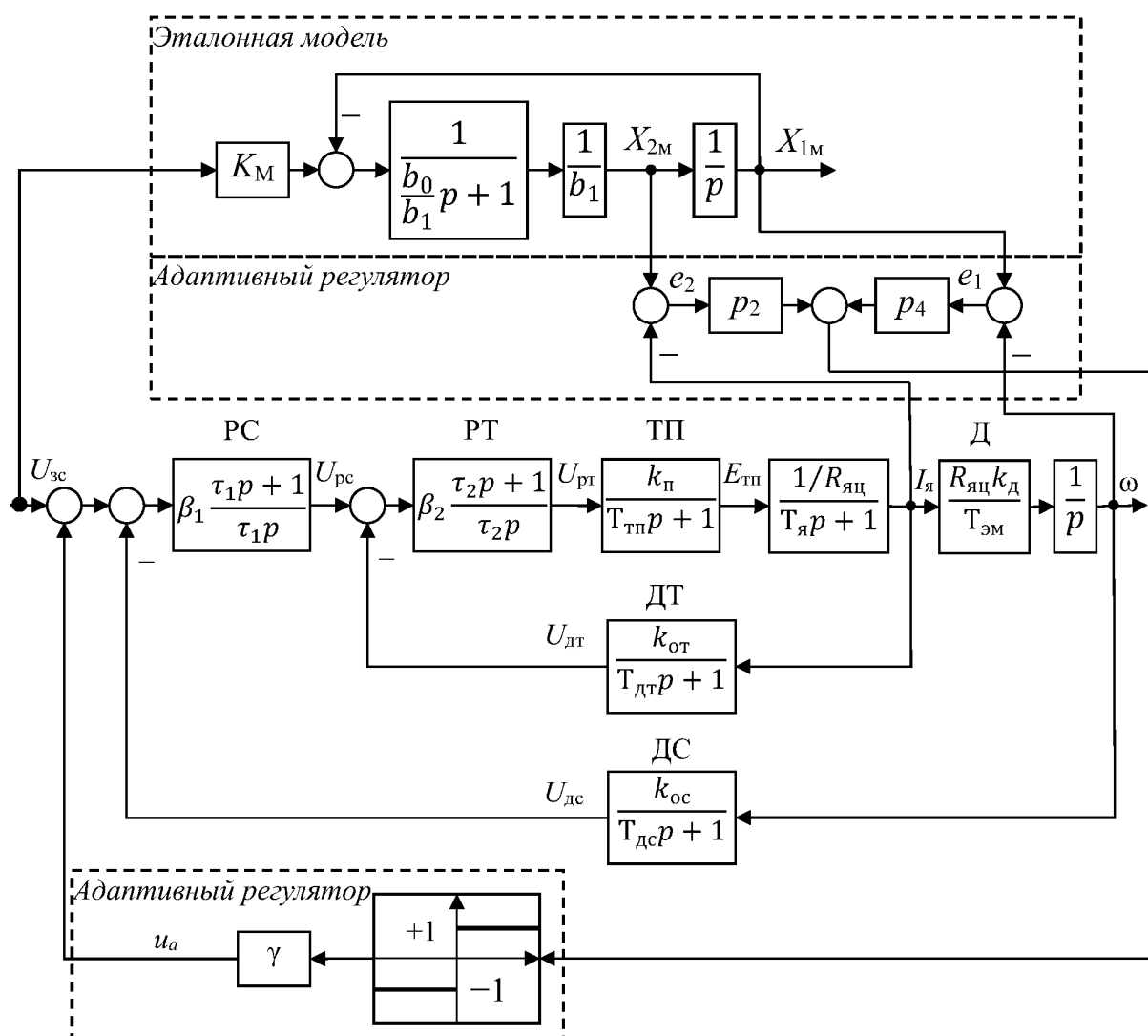


Рис. 2 – Адаптивная система сигнального типа для ЭМО типа ДПТ

### 3. Компьютерное исследование структуры подчиненного регулирования скорости нестационарного ЭМО без адаптивного регулятора

В данном разделе представлены результаты компьютерного исследования эффективности управления по схеме подчиненного регулирования для случая нестационарного суммарного момента инерции. Предполагалось, что изменение момента инерции осуществлялось после завершения переходного процесса в системе, причем момент изменялся по линейному закону до заранее заданной величины. Обозначим минимальное значение суммарного момента инерции  $J_{\Sigma \text{ном}}$ , а максимальное –  $J_{\Sigma \text{max}}$ .

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования неадаптивной системы управления для случаев, когда  $J_{\Sigma \text{max}} = 5J_{\Sigma \text{ном}}$  и  $J_{\Sigma \text{max}} = 4J_{\Sigma \text{ном}}$ .

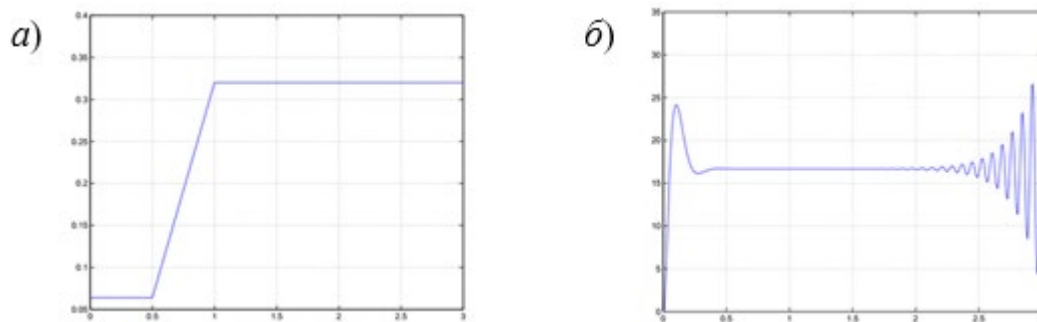


Рис. 3 – Результаты моделирования неадаптивной системы при  $J_{\Sigma \text{max}} = 5J_{\Sigma \text{ном}}$

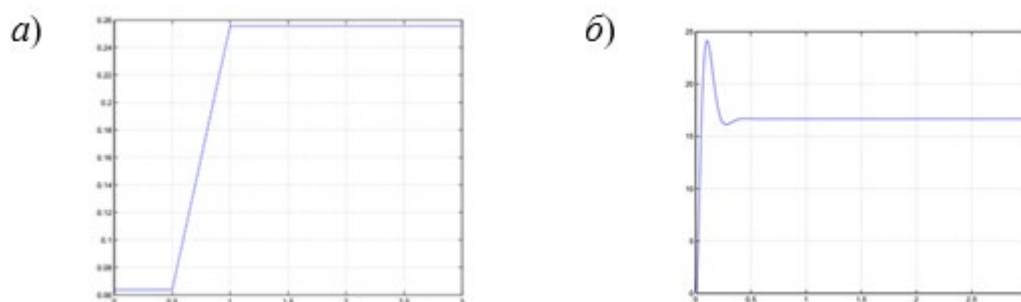


Рис. 4 – Результаты моделирования неадаптивной системы при  $J_{\Sigma \text{max}} = 4J_{\Sigma \text{ном}}$

Здесь *a)* – зависимость нестационарного коэффициента усиления от времени; *б)* – зависимость угловой скорости двигателя от времени.

Из рис. 3, 4 видно, что при  $J_{\Sigma \text{max}} = 4J_{\Sigma \text{ном}}$  система сохраняет работоспособность, но при  $J_{\Sigma \text{max}} \geq 5J_{\Sigma \text{ном}}$  – теряет устойчивость.

Структурная схема системы, на основании которой проводилось моделирование ЭМО с линейно изменяющимся моментом инерции  $J_{\Sigma}$ , представлена на рис. 5. В блоке формирования нестационарного коэффициента передачи двигателя осуществляется линейное нарастание указанного коэффициента до величины, соответствующей заданному максимальному значению момента инерции  $J_{\Sigma\max}$  (звено 1). Изменение  $J_{\Sigma\max}$  начинается с  $t_1 = t_{\text{пп}}$  ( $t_{\text{пп}}$  – время переходного процесса). Звено 2 в указанном блоке задает начальное значение этого коэффициента.

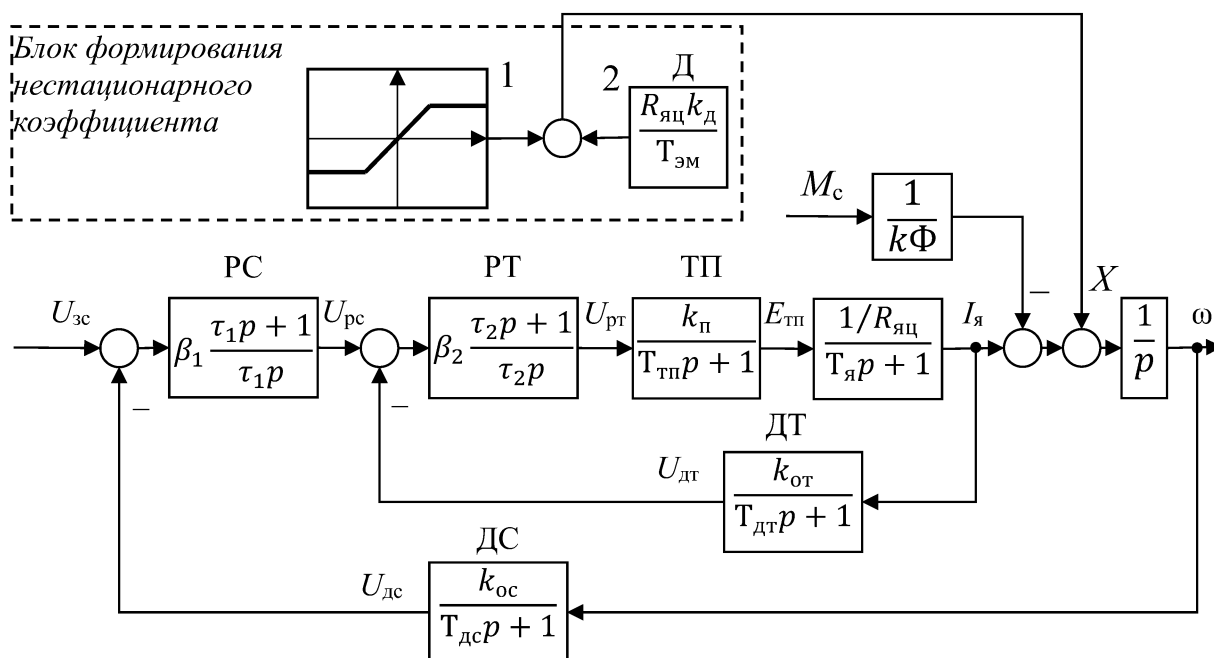


Рис. 5. – Структурная схема нестационарной САУ

#### 4. Исследование эффективности адаптивного регулятора при нестационарном моменте инерции механизма

На рис. 6-7 представлены результаты компьютерного исследования эффективности управления для нестационарного ЭМО с адаптивным регулятором: а) – изменение нестационарного коэффициента усиления двигателя; б) – скорость двигателя и в) – сигнал адаптивного управления.



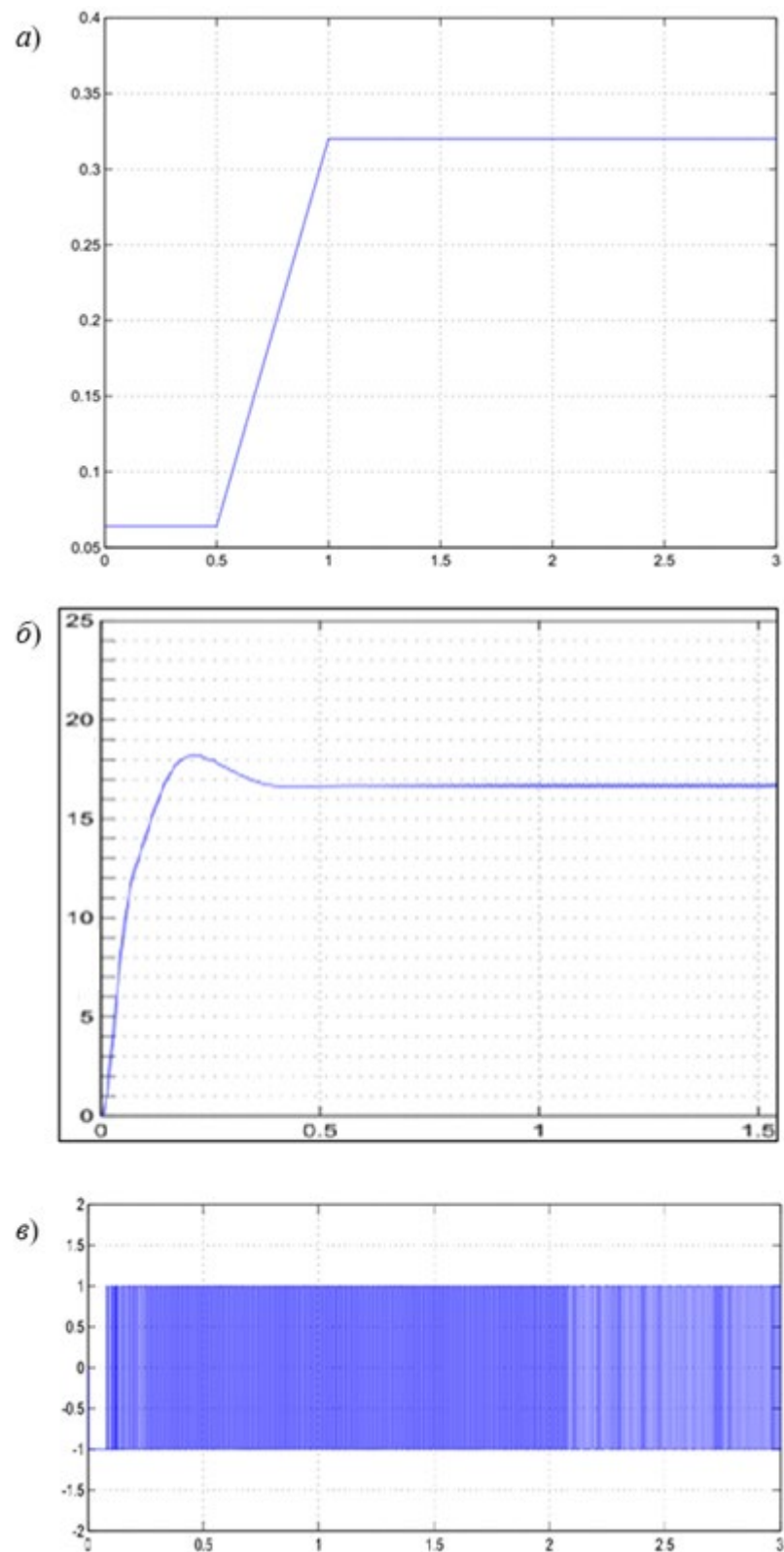


Рис. 6 – Результаты моделирования адаптивной системы при  $J_{\Sigma_{\max}} = 5J_{\Sigma_{\text{ном}}}$

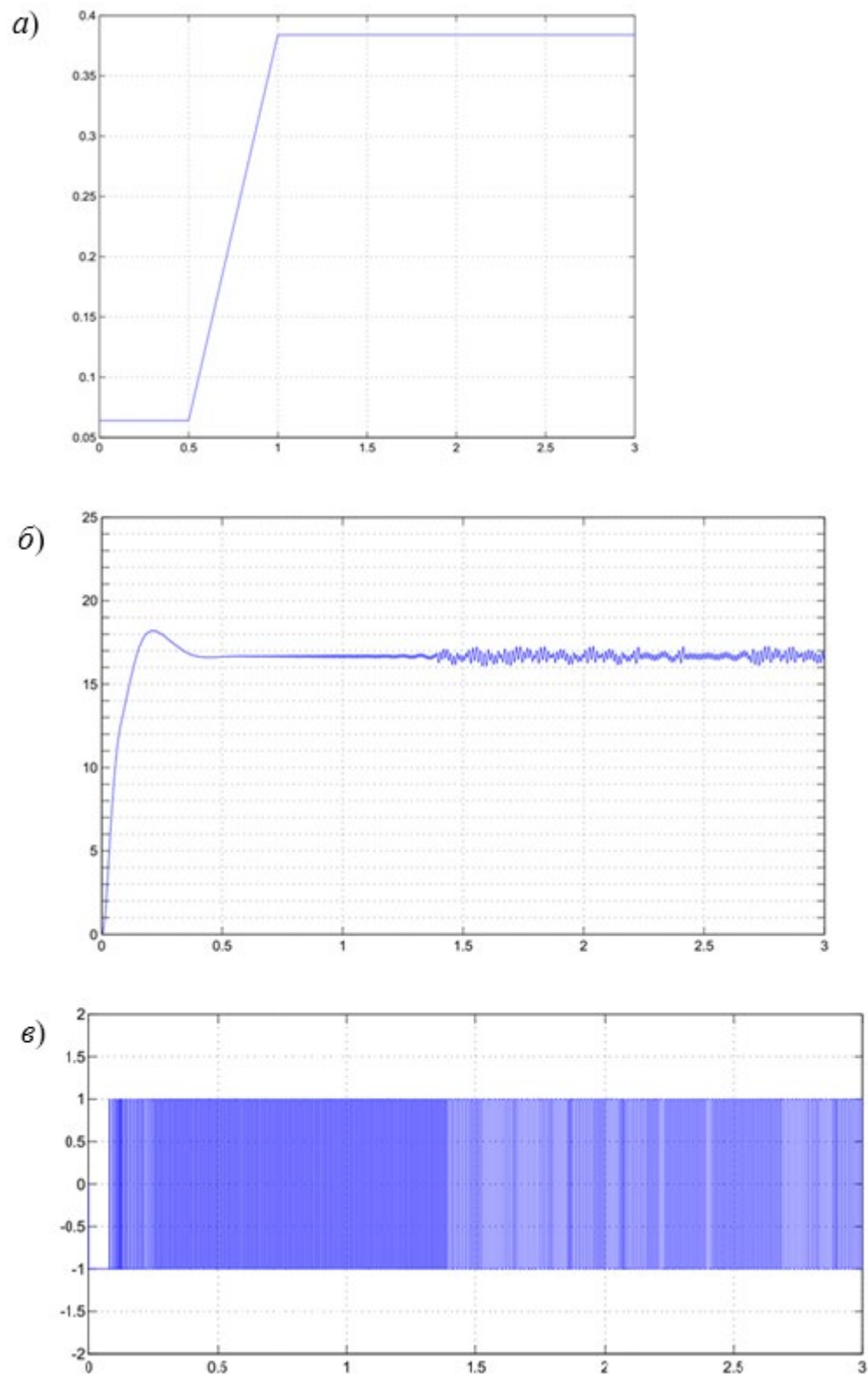


Рис. 7 – Результаты моделирования адаптивной системы при  $J_{\Sigma\max} = 6J_{\Sigma\text{ном}}$

Как видно рис. 6-7, нестационарный ЭМО с адаптивным регулятором сохраняет работоспособность в обоих случаях, хотя при  $J_{\Sigma\max} = 6J_{\Sigma\text{ном}}$



Кроме того, с помощью синтеза эталонной модели с заданными показателями качества переходных процессов можно обеспечить в системе с адаптацией переходные процессы, удовлетворяющие требованиям к подобным системам:

- время переходного процесса  $t_{\text{пн}} \leq 0,5$  с;
- перерегулирование  $\sigma < 10$  %.

*Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации (проект госзадания 124041500008-1).*

### Литература

1. Фрадков А.Л. Адаптивное управление сложными системами. М.: Наука, 1990. 296 с.
  2. Andrievsky B, Pogromsky A.Y., Plotnikov S.A. Speed-gradient Method in Adaptive Control and Identification. Historical overview. // IFAC PapersOnLine. 2020. Vol. 53. №2. Pp. 1367-1372.
  3. Балакшин Б.С. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
  4. Тимирязев В.А., Мухин А.В, Иванов А.А. Использование адаптивного управления для самопрограммирования траекторий перемещения режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №12. С. 94-101.
  5. Бобцов А. А., Никифоров В. О., Пыркин А. А. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 277 с.
  6. Лван Мо Аунг, Щагин А.В., Ла Мин Маун Маун, Аунг Мьо Наинг. Адаптивное ПИД-управление с компенсацией возмущений для траекторного следования в роботизированных манипуляторах // Инженерный вестник Дона, 2025, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9992](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9992).
-

7. Добриборщ Д., Колюбин С.А. Адаптивное управление роботоманипулятором с параллельной кинематической схемой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2017. Т. 60. № 9. С. 850-857.
8. Seron, M., Hill, D., Fradkov, A. Nonlinear adaptive control of feedback passive systems. // Automatica. 1995. Vol 31. №7. Pp. 1053-1060.
9. Борцов Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
10. Решетникова Н.В. Применение метода адаптивного управления в электроприводе // Инженерный вестник Дона, 2025, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/10005](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/10005).
11. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
12. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 214 с.
13. Томчина О.П., Бобкова А.В., Антипин С.С., Нестерова А.А. Адаптивная двухконтурная система подчиненного регулирования скорости электромеханической системы // Наука нового времени: сохраняя прошлое - создаем будущее. СПб.: КультИнформПресс, 2017. С. 236-239.

### References

1. Fradkov A.L. Adaptivnoe upravlenie slozhnymi sistemami [Adaptive control of complex systems]. Moskva, 1990. 296 p.
  2. Andrievsky B, Pogromsky A.Y., Plotnikov S.A. Speed-gradient Method in Adaptive Control and Identification. Historical overview, IFAC PapersOnLine. 2020. Vol. 53. №2. Pp. 1367-1372.
  3. Balakshin B.S. Adaptivnoe upravlenie stankami [Adaptive machine control] Moskva, 1973. 688 p.
-

4. Timiryazev V.A., Muhin A.V., Ivanov A.A. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2016. №12. pp. 94-101.
5. Bobcov A.A., Nikiforov V.O., Pyrkin A.A. Metody adaptivnogo i robastnogo upravleniya nelinejnymi ob"ektami v priborostroenii [Methods of adaptive and robust control of nonlinear objects in instrument engineering]. Sankt-Peterburg: NIU ITMO, 2013. 277 p.
6. Lvan Mo Aung, Shchagin A.V., La Min Maun Maun, Aung M'o Naing. Inzenernyj vestnik Dona, 2025, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9992](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9992).
7. Dobriborshch D., Kolyubin S.A. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie, 2017. T. 60. № 9. pp. 850-857.
8. Seron, M., Hill, D., Fradkov, A. Nonlinear adaptive control of feedback passive systems, Automatica. 1995. Vol 31. №7. Pp. 1053-1060.
9. Borcov Yu.A. Avtomatizirovannyj elektroprivod s uprugimi svyazyami [Automated electric drive with elastic connections]. Sankt-Peterburg: Energoatomizdat, 1992. 288 p.
10. Reshetnikova N.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2025, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/10005](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/10005).
11. Andrievskij B.R., Fradkov A.L. Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB [Selected chapters of the theory of automatic control with examples in MATLAB]. Sankt-Peterburg: Nauka, 1999. 467 p.
12. Borcov Yu.A., Polyahov N.D., Putov V.V. Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrad: Energoatomizdat, 1984. 214 p.
13. Tomchina O.P., Bobkova A.V., Antipin S.S., Nesterova A.A. Nauka novogo vremeni: sohranyaya proshloe - sozdaem budushchee. Sankt-Peterburg, 2017, pp. 236-239.

**Дата поступления: 28.02.2025**

**Дата публикации: 25.04 2025**

---