

УДК 519.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ФИШЕРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Г.В. ТРОШИНА

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

Вычисление информационной матрицы Фишера в подавляющем большинстве случаев является наиболее важной и сложной в вычислительном плане частью в инженерных расчетах при решении задачи планирования экспериментов для идентификации динамических объектов, описываемых моделями в пространстве состояний. Отметим, что неизвестные параметры, подлежащие определению, могут находиться в различных комбинациях матриц состояния и наблюдения. Как правило, для определения вектора состояния используются фильтры и не учитывается тот факт, что точные значения параметров объекта не известны. Погрешности, связанные с определением параметров динамических объектов, оказывают значительное влияние на погрешности оценок, полученных при вычислении вектора состояния. Использование установившегося режима значительно упрощает методику вычисления информационной матрицы Фишера и является актуальным для практического применения. В данной статье рассматриваются основные соотношения, необходимые для вычисления элементов информационной матрицы Фишера в случае, когда неизвестные параметры находятся как в матрице состояния, так и в матрице возмущения. В рамках данной работы предполагается, что все переходные процессы закончились, т. е. рассматривается установившейся режим. Для оценки вектора состояния рассматриваемой динамической системы используется фильтр Калмана с обновленной последовательностью. Процесс вычисления элементов информационной матрицы Фишера в установившемся режиме можно разбить на три основные группы. Одна группа уравнений решается как система нелинейных алгебраических уравнений, вторая группа – как система линейных алгебраических уравнений, третья группа уравнений – как совокупность линейных уравнений, решаемых последовательно друг за другом.

Ключевые слова: идентификация, оценивание состояния, динамическая система, фильтр Калмана, оценивание параметров, матрица Фишера, математическая модель, установившейся режим

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-52-61

* Статья получена 20 апреля 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение точности и надежности управления динамическими объектами во многих областях науки и техники требует дальнейшего развития и совершенствования методов их идентификации [1–22]. В последнее время особенно важными оказываются такие методы оценки качества экспериментальных данных, которые должны обеспечить наиболее точные оценки состояния и параметров динамического объекта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для линейного динамического объекта

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Psi u_k + \Gamma w_k, \quad y_{k+1} = Hx_{k+1} + v_{k+1}$$

постановка задачи аналогична задаче, сформулированной в работах [12–14]. Рассмотрим методику формирования информационной матрицы Фишера для случая, когда неизвестные параметры $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ находятся не только в матрице Φ , но и в матрице Γ , т. е. $\Phi(\theta)$, $\Gamma(\theta)$.

Отметим, что для оценки вектора состояния рассматриваемой динамической системы используется фильтр Калмана [16–20]:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi \hat{x}_k + \Psi u_k + K v_k, \quad y_{k+1} = H \hat{x}_k + \Sigma v_k,$$

где $v_k = \Sigma^{-1} [y_k - H \hat{x}_k]$;

$$P_{k+1,k} = \Phi P_{k,k} \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T, \quad \Sigma = (H P_{k+1,k} H^T + R)^{1/2}, \quad K = \Phi K1_{k+1},$$

$$K1_{k+1} = P_{k+1,k} H^T \Sigma_{k+1}^{-1}, \quad P_{k+1,k+1} = (I - K1_{k+1} \Sigma_{k+1}^{-1} H) P_{k+1,k}.$$

Предполагается, что все переходные процессы закончились, т. е. рассматривается установившийся режим [12–20]. Требуется оценить вектор параметров θ , используя несмещенную эффективную оценку $\hat{\theta}$ с ковариационной матрицей M^{-1} , где M – информационная матрица Фишера.

2. ВЫВОД ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ФИШЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

В нижеприведенных формулах зависимость матриц Φ и Γ от параметров θ в явном виде не указывается. Алгоритм вычисления элементов матрицы Фишера достаточно подробно рассмотрен, например, в работах [12–14]. Пусть $\Phi = \theta_1$, $\Psi = 1$, $\Gamma = \theta_2 = 1$, $H = 1$. Ниже приводится список формул, необходимый для инженерных расчетов.

Первая группа:

$$P_1 = \Phi P_0 \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T, \quad \Sigma_\infty = (H P_1 H^T + R)^{1/2},$$

$$K 1_\infty = P_1 H^T \Sigma_\infty^{-1}, \quad P_0 = (I - K 1_\infty \Sigma_\infty^{-1} H) P_1.$$

Вторая группа:

$$\frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} = \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_1} P_0 \Phi^T + \Phi \left(\frac{\partial P_0}{\partial \theta_1} \Phi^T + P_0 \frac{\partial \Phi^T}{\partial \theta_1} \right), \quad \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} = \Phi P_0 \Phi^T + \frac{\partial \Gamma}{\partial \theta_2} Q \Gamma^T + \Gamma Q \frac{\partial \Gamma^T}{\partial \theta_2},$$

$$\frac{\partial \Sigma_\infty^{-1}}{\partial \theta_1} = \left(-\frac{1}{2} \right) \Sigma_\infty^{-3} H \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} H^T, \quad \frac{\partial \Sigma_\infty^{-1}}{\partial \theta_2} = \left(-\frac{1}{2} \right) \Sigma_\infty^{-3} H \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} H^T,$$

$$\frac{\partial K 1_\infty}{\partial \theta_1} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} H^T \Sigma_\infty^{-1} + P_1 H^T \frac{\partial \Sigma_\infty^{-1}}{\partial \theta_1}, \quad \frac{\partial K 1_\infty}{\partial \theta_2} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} H^T \Sigma_\infty^{-1} + P_1 H^T \frac{\partial \Sigma_\infty^{-1}}{\partial \theta_2},$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial \theta_1} = \left(-\frac{\partial K 1_\infty}{\partial \theta_1} \Sigma_\infty^{-1} H - K 1_\infty \frac{\partial \Sigma_\infty^{-1}}{\partial \theta_1} H \right) P_1 + \left(I - K 1_\infty \Sigma_\infty^{-1} H \right) \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1},$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial \theta_2} = \left(-\frac{\partial K 1_\infty}{\partial \theta_2} \Sigma_\infty^{-1} H - K 1_\infty \frac{\partial \Sigma_\infty^{-1}}{\partial \theta_2} H \right) P_1 + \left(I - K 1_\infty \Sigma_\infty^{-1} H \right) \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2},$$

Третья группа:

$$K2_{\infty} = \Phi K1_{\infty}, \quad \frac{\partial K2_{\infty}}{\partial \theta_1} = \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_1} K1_{\infty} + \Phi \frac{\partial K1_{\infty}}{\partial \theta_1}, \quad \frac{\partial K2_{\infty}}{\partial \theta_2} = \Phi \frac{\partial K1_{\infty}}{\partial \theta_2},$$

$$\Phi_{A,1} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_1} & \Phi - K2_{\infty} \Sigma_{\infty}^{-1} H & 0 \\ 0 & 0 & \Phi - K2_{\infty} \Sigma_{\infty}^{-1} H \end{bmatrix}, \quad K_{A,1} = \begin{bmatrix} K2_{\infty} \\ \frac{\partial K2_{\infty}}{\partial \theta_1} - K2_{\infty} \Sigma_{\infty}^{-1} \frac{\partial \Sigma_{\infty}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial K2_{\infty}}{\partial \theta_2} - K2_{\infty} \Sigma_{\infty}^{-1} \frac{\partial \Sigma_{\infty}}{\partial \theta_2} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{A,1} = \begin{bmatrix} \Psi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{x}_{A,1} = \Phi_{A,1} \bar{x}_{A,1} + \Psi_{A,1} u, \quad \Sigma_{A,1} = \Phi_{A,1} \Sigma_{A,1} \Phi_{A,1}^T + K_{A,1} K_{A,1}^T.$$

$$E \left\{ \left[\frac{\partial \hat{x}_{k+1,k}}{\partial \theta_i} \right] \left[\frac{\partial \hat{x}_{k+1,k}}{\partial \theta_j} \right]^T \right\} = c_j \left[\Sigma_{A,k+1,k} + \bar{x}_{A,k+1,k} \bar{x}_{A,k+1,k}^T \right] c_i^T.$$

Отметим, что первая группа уравнений решается как система нелинейных алгебраических уравнений, вторая группа уравнений – как система линейных алгебраических уравнений, третья группа уравнений – как совокупность линейных уравнений, решаемых последовательно друг за другом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены расчетные соотношения для вычисления элементов информационной матрицы Фишера, когда параметры, подлежащие определению, находятся в элементах матрицы состояния Φ и элементах матрицы возмущения Γ при описании динамических систем в пространстве состояний по данным установившегося режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Льюнг Л.* Идентификация систем: теория для пользователя / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
2. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
3. *Mehra R.K.* Optimal input signal for parameter estimation in dynamic system – survey and new results // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. AC-19, N 6. – P. 753–768.
4. *Mehra R.K.* On the identification of variances and adaptive Kalman filtering // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1970. – Vol. AC-15, N 2. – P. 175–184.
5. *Сейдж Э.П., Уайт Ч.С.* Оптимальное управление системами. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
6. *Goodwin G.C., Payne R.L.* Dynamic system identification: experiment design and data analysis. – New York: Academic Press, 1977. – 291 p.
7. *Заболотнов Ю.М.* Оптимальное управление непрерывными динамическими системами: учебное пособие. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2005. – 129 с.
8. *Цыпкин Я.З.* Информационная теория идентификации. – М.: Наука: Физматлит, 1995. – 336 с.
9. *Черных И.В.* Simulink: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 496 с.
10. *Ощепков А.Ю.* Адаптивное управление линейными объектами с инерцией с использованием дискретных быстрых алгоритмов [Электронный ресурс] // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июня 2014 г.: труды. – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2332–2337. – URL: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (дата обращения: 23.11.2017).
11. *Хранилов В.П.* Идентификация внутренних операторов моделей управления для задач проектирования технических систем [Электронный ресурс] // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июня 2014 г.: труды. – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 3281–3288. – URL: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (дата обращения: 23.11.2017).
12. *Воевода А.А., Трошина Г.В.* Вычисление информационной матрицы Фишера для линейных стационарных дискретных систем с неизвестными параметрами в моделях динамики и наблюдения // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 2 (44). – С. 29–34.
13. *Воевода А.А., Трошина Г.В.* Использование информационной матрицы Фишера при выборе сигнала управления для оценки параметров моделей ди-

намики и наблюдения объектов невысокого порядка // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 3 (45). – С. 19–24.

14. Милованов М.В., Трошина Г.В. Разработка программного модуля для идентификации динамического объекта по данным установившегося режима // Наука и образование в современном обществе: вектор развития: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции 3 апреля 2014 г.: в 7 ч. – М.: АР-Консалт, 2014. – Ч. 4. – С. 114–116.

15. Воевода А.А., Трошина Г.В. Рекуррентный метод оценивания параметров в динамическом объекте // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 4 (65). – С. 7–18.

16. Воевода А.А., Трошина Г.В. О некоторых методах фильтрации в задаче идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 2 (76). – С. 16–25.

17. Воевода А.А., Трошина Г.В. Об оценке вектора состояния и вектора параметров в задаче идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 53–68. – doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-53-68.

18. Воевода А.А., Трошина Г.В. Моделирование фильтра Калмана с обновленной последовательностью в среде Simulink // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 2 (80). – С. 7–17. – doi: 10.17212/2307-6879-2015-2-7-17.

19. Трошина Г.В. Вычислительные аспекты задачи восстановления вектора состояния для модели с неточно заданными параметрами // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 3 (53). – С. 25–34.

20. Трошина Г.В. Об использовании фильтра Калмана при идентификации динамических систем // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 3 (77). – С. 37–52.

21. Трошина Г.В. Моделирование динамических объектов в среде Simulink. Ч. 2 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 31–41. – doi: 10.17212/2307-6879-2015-4-31-41.

22. Воевода А.А., Трошина Г.В. Стабилизация неминимально фазового объекта с использованием ПИ-регулятора // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 21–30. – doi: 10.17212/2307-6879-2015-4-21-30.

Трошина Галина Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – идентификация динамических объектов. Имеет более 60 публикаций. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

The steady-state use for Fisher matrix calculation at the parameters determination of the dynamic systems *

G.V. Troshina

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, candidate of technical sciences, associate professor of the computer engineering department. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

The Fischer information matrix calculation in the suppressed majority of cases is the most important and difficult part in the computing plan in engineering calculations at the problem solution of the experiments planning for the dynamic objects identification described by models in the states space. We will note that the unknown parameters which are subject to definition can be in the various combinations of the state and observation matrixes. As a rule, the filters are used for the state vector definition and the fact that the exact values of the object parameters aren't known isn't considered. The errors connected with the dynamic objects parameters determination exert considerable impact on the estimates errors received at the state vector calculation. The steady-state use considerably simplifies the calculation technique of the Fischer information matrix and is relevant for the practical use. In this article the main ratios necessary for the elements calculation of the Fischer information matrix are considered in case the unknown parameters are both in a state matrix, and in the noises matrix. Within this work it is supposed that all transition processes have ended, the steady-state is considered. The Kalman filter with the updated sequence is used for the state vector estimation of this dynamic system. The calculation process of the Fischer information matrix elements in the steady-state can be represented into three main groups. One group of the equations is solved as the nonlinear algebraic equations system, the second group of the equations is solved as the linear algebraic equations system, the third group of the equations – as set of the linear equations, solvable consistently one after another.

Keywords: identification, state estimation, dynamic system, Kalman filter, parameter estimation, Fischer matrix, mathematical model, steady-state

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-52-61

REFERENCES

1. Ljung L. *System identification: theory for the user*. New Jersey, Prentice Hall, 1987. 384 p. (Russ. ed.: L'yung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya*. Translated from English. Moscow, Nauka Publ., 1991. 432 p.).
2. Eykhoff P. *System identification: parameter and state estimation*. London, John Wiley & Sons, 1974. 555 p. (Russ. ed.: Eikkhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya: otsenivanie parametrov i sostoyaniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1975. 683 p.).

* Received 20 April 2017.

3. Mehra R.K. Optimal input signal for parameter estimation in dynamic system – survey and new results. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. AC-19, no. 6, pp. 753–768.
4. Mehra R.K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1970, vol. AC-15, no. 2, pp. 175–184.
5. Sage A.P., White C.C. *Optimum system control*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1977 (Russ. ed.: Seidzh E.P., Uait Ch.S. *Optimal'noe upravlenie sistemami*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 392 p.).
6. Goodwin G.C., Payne R.L. *Dynamic system identification: experiment design and data analysis*. New York, Academic Press, 1977. 291 p.
7. Zabolotnov Yu.M. *Optimal'noe upravlenie nepreryvnymi dinamicheskimi sistemami* [The optimum control of the continuous dynamic systems]. Samara, Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet Publ., 2005. 129 p.
8. Tsyppin Ya.Z. *Informatsionnaya teoriya identifikatsii* [Information theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., Fizmatlit Publ., 1995. 336 p.
9. Chernykh I.V. *Simulink: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenii* [Simulink: the environment of the engineering applications construction]. Ed. by V.G. Potemkin. Moscow, Dialog-MIFI Publ., 2003. 496 p.
10. Oshchepkov A.Yu. [Adaptive management of linear objects with inertia using of discrete fast algorithms]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proceedings of the XII All-Russian meeting on problems of management VSPU–2014], Moscow, 16–19 June 2014, pp. 2332–2337. In Russian. Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (accessed 23.11.2017).
11. Khranilov V.P. [Internal operators identification of management models for technical systems design problems]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proceedings of the XII All-Russian meeting on problems of management VSPU–2014], Moscow, 16–19 June 2014, pp. 3281–3288. In Russian. Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (accessed 23.11.2017).
12. Voevoda A.A., Troshina G.V. Vychislenie informatsionnoi matritsy Fishera dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem s neizvestnymi parametrami v modelyakh dinamiki i nablyudeniya [Fischer information matrix calculation for linear stationary discrete systems with unknown parameters in dynamics and supervision models]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 2 (44), pp. 29–34.
13. Voevoda A.A., Troshina G.V. Ispol'zovanie informatsionnoi matritsy Fishera pri vybore signala upravleniya dlya otsenki parametrov modelei dinamiki i nablyudeniya ob"ektov nevysokogo poryadka [The Fischer information matrix use at

the control signal choice for the parameters estimation in the dynamic and measurement models of the low order objects]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (45), pp. 19–24.

14. Milovanov M.V., Troshina G.V. [The program module development for the dynamic object identification according to the steady-state]. *Nauka i obrazovanie v sovremennom obshchestve: vektor razvitiya: sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 3 aprelya 2014 g.* [Science and education in modern society: a vector of development: a collection of scientific papers on the basis of an international scientific and practical conference on April 3, 2014]. Moscow, AR-Konsalt Publ., 2014, pt. 4, pp. 114–116. (In Russian).

15. Voevoda A.A., Troshina G.V. Rekurrentnyi metod otsenivaniya parametrov v dinamicheskom ob"ekte [A recurrent method for parameter estimation in the dynamic object]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (65), pp. 7–18.

16. Voevoda A.A., Troshina G.V. O nekotorykh metodakh fil'tratsii v zadache identifikatsii [About some filtration methods in the identification problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 2 (76), pp. 16–25.

17. Voevoda A.A., Troshina G.V. Ob otsenke vektora sostoyaniya i vektora parametrov v zadache identifikatsii [About parameters vector estimation and state vector estimation in identification problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (78), pp. 53–68. doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-53-68.

18. Voevoda A.A., Troshina G.V. Modelirovanie fil'tra Kalmana s obnovlennoi posledovatel'nost'yu v srede Simulink [The modelling of the Kalman filter with the updated sequence in Simulink environment]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 2 (80), pp. 7–17. doi: 10.17212/2307-6879-2015-2-7-17.

19. Troshina G.V. Vychislitel'nye aspekty zadachi vosstanovleniya vektora sostoyaniya dlya modeli s netochno zadannymi parametrami [Computing aspects of problem of the state vector recovering for models with inexact given parameters]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 3 (53), pp. 25–34.

20. Troshina G.V. Ob ispol'zovanii fil'tra Kalmana pri identifikatsii dinamicheskikh sistem [About Kalman filter using for dynamic systems identification]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 3 (77), pp. 37–52.

21. Troshina G.V. Modelirovanie dinamicheskikh ob"ektov v srede Simulink. Ch. 2 [The dynamic objects modelling in Simulink environment. Pt. 2]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 31–41. doi: 10.17212/2307-6879-2015-4-31-41.

22. Voevoda A.A., Troshina G.V. Stabilizatsiya neminimal'no fazovogo ob"ekta s ispol'zovaniem PI-regulyatora [The stabilization of not-minimum-phase object with the PI regulator use]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 21–30. doi: 10.17212/2307-6879-2015-4-21-30.