

УДК 519.24

ИТЕРАЦИОННАЯ ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОКРАШЕННОГО ШУМА*

А.А. ВОЕВОДА¹, Г.В. ТРОШИНА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизирующей техники. E-mail: usit@usit.ru

² 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

Значительная стоимость практических исследований различных управляемых производственных процессов и трудности, возникающие при проведении экспериментов, а также наличие возмущающих воздействий и других случайных факторов приводит к необходимости разработки специального математического аппарата для построения различных систем управления и использования результатов из смежных областей науки и техники. Во многих случаях необходимо оценивать не только состояние системы, но и также оценивать параметры объекта. Для решения задачи оценивания параметров системы или, другими словами, для решения задачи идентификации предложено достаточно много методов, но до сих пор не существует метода, который был бы идеальным и хорошо используемым во всех возможных случаях. Желательно иметь такую процедуру идентификации системы, которая бы обладала, например, заданными свойствами эффективности, простотой реализации, возможностью идентификации в реальном времени. В этом случае задачу идентификации параметров системы можно было бы решать параллельно с задачей оценивания состояния объекта. Оптимальность алгоритмов зависит в той или иной степени от достоверности тех данных, которые используются при описании математической модели. В ряде случаев из-за недостатка точных данных качество результатов, полученных при работе алгоритмов оценивания, может оказаться невысоким. Выбор метода, используемого в инженерной практике, во многом зависит от конкретного математического объекта, а также от требований, предъявляемых к сложности метода, или, например, ограничений, накладываемых на управление. В данной работе приведен практический пример итерационной процедуры оценивания параметров модели при наличии окрашенного шума.

* Статья получена 26 октября 2015 г.

Ключевые слова: математическая модель, идентификация, функция правдоподобия, моделирование, белый шум, управление, оценивание параметров, информационная матрица Фишера

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-26-36

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–22] представлены методы, используемые в алгоритмах для оценивания состояния и параметров математических моделей при действии шумов, возникающих в динамической системе и при наличии ошибок измерителя. При активной идентификации динамических объектов часто используется информационная матрица Фишера в установившемся режиме [9–19].

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ПРИ НАЛИЧИИ ОКРАШЕННОГО ШУМА

Рассматривается линейная модель со многими входами-выходами в следующей форме [8]:

$$A(z)y_k = B(z)u_k + \xi_k,$$

где u , y , ξ являются входной, выходной и возмущающей последовательностями соответственно. Предполагается, что

$$B(z) = B_1 z^{-1} + B_2 z^{-2} + \dots + B_n z^{-n}, \quad A(z) = \text{diag}[a(z), \dots, a(z)],$$

где $a(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$. Также принято, что ξ может быть представлена в виде авторегрессионной линейной модели, то есть

$$F(z)\xi_k = \varepsilon_k,$$

где ε_k является независимой гауссовской последовательностью с нулевым средним и общей ковариацией Σ , и $F(z)$ может быть представлена в виде

$$F(z) = I + F_1 z^{-1} + \dots + F_q z^{-q}.$$

Для этой модели функция правдоподобия выглядит следующим образом:

$$p(y|\theta) = [(2\pi)^m \det \Sigma]^{-N/2} \exp \left\{ (-1/2) \sum_{k=1}^N w_k^T \Sigma^{-1} w_k \right\},$$

где m – число случайных величин вектора y ; θ – вектор неизвестных параметров, содержащихся в A , B , F , Σ . При этом w определяется как

$$w_k = F(z)\eta_k,$$

где η_k удовлетворяет выражению

$$\eta_k = A(z)y_k - B(z)u_k.$$

Логарифмическая функция правдоподобия $J = \log p(y|\theta)$ имеет вид

$$J = -\frac{1}{2}mN \log 2\pi - \frac{N}{2} \log \det \Sigma - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N w_k^T \Sigma^{-1} w_k.$$

Логарифмическая функция правдоподобия J является неквадратичной функцией по параметрам, входящим в A , B , F и Σ . Поэтому максимизация J требует выполнения некоторой итерационной процедуры. Но если зафиксировать параметры, содержащиеся в F и Σ , то тогда J является квадратичной функцией по параметрам, входящим в $A(z)$ и $B(z)$, которые далее будем обозначать через α . Поэтому выражаем w_k как линейную функцию α :

$$w_k = \bar{y}_k - X_k \alpha,$$

где $k=1, \dots, N$, $\alpha^T = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_{11}^T, \dots, b_{mn}^T)$, b_{ij} – i -й столбец матрицы B_j .

Определяем X следующим образом:

$$X_k = \left[\bar{y}_{k-1}, \dots, \bar{y}_{k-n}; Fu_{k-1}^1, Fu_{k-1}^2, \dots, Fu_{k-n}^m \right],$$

где $\bar{y}_k = F(z)y_k$ и Fu_{k-i}^j обозначает матрицу, которую можно определить как $\sum_{l=0}^q u_{k-i-l}^j F_l$, и u_k^j есть j компонента вектора u_k . Подставим полученное выражение w_k в соотношение для логарифмической функции правдоподобия и проведем максимизацию J относительно параметров α . Дифференцирование J относительно параметров α дает

$$-\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k^T \Sigma^{-1} (\bar{y}_k - X_k \alpha) = 0.$$

Отсюда получаем оценку

$$\hat{\alpha} = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k^T \Sigma^{-1} X_k \right]^{-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k^T \Sigma^{-1} \bar{y}_k \right].$$

Аналогично поступая, можно зафиксировать параметры α , и тогда логарифмическая функция правдоподобия будет иметь единственный максимум относительно параметров, входящих в $F(z)$ и Σ . Для этого надо записать w_k в виде

$$w_k = \eta_k - F\gamma_k,$$

где $\eta_k = A(z)y_k - B(z)u_k$, $F = [F_1, F_2, \dots, F_k]$, $\gamma_k^T = [-\eta_{k-1}^T, \dots, -\eta_{k-q}^T]$.

Подстановка w_k в выражение для логарифмической функции правдоподобия дает

$$J = -\frac{1}{2} mN \log 2\pi - \frac{N}{2} \log \det \Sigma - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left[(\eta_k - F\gamma_k)^T \Sigma^{-1} (\eta_k - F\gamma_k) \right].$$

Проведя максимизацию последнего выражения параметров, входящих в F и Σ , получаем оценки:

$$\hat{F} = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \eta_k \gamma_k^T \right] \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \gamma_k \gamma_k^T \right]^{-1},$$

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[(\eta_k - \hat{F}\gamma_k)(\eta_k - \hat{F}\gamma_k)^T \right].$$

При дифференцировании выражения для J относительно Σ использовались следующие формулы матричного дифференцирования:

$$(\partial / \partial \Sigma) \log \det \Sigma = (\Sigma^{-1})^T,$$

$$(\partial / \partial \Sigma) \text{tr} A \Sigma^{-1} B = (\Sigma^{-1} B A \Sigma^{-1})^T.$$

Алгоритм по шагам можно сформулировать следующим образом [8]:

- задаются начальные оценки, например, $\hat{\Sigma} = I$, $\hat{F} = I$;
- вычисляются оценки параметров, входящих в $A(z)$ и $B(z)$ при использовании выражения для $\hat{\alpha}$;
- уточняются оценки параметров, входящих в $F(z)$, при использовании выражения для \hat{F} ;
- аналогично уточняются оценки параметров, входящих в Σ , при использовании выражения для $\hat{\Sigma}$.

2. ПРИМЕР

Модель системы имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_k = a_1 \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} b_1^{11} & b_1^{12} \\ b_1^{21} & b_1^{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}_{k-1} + \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}_k,$$

$$\begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}_k + \begin{bmatrix} f_1^{11} & f_1^{12} \\ f_1^{21} & f_1^{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}_{k-1} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix}_k,$$

где ε_k является последовательностью независимых, одинаково распределенных гауссовских случайных переменных, имеющих нулевое среднее и ковариацию Σ , т. е.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_0^{11} & \Sigma_0^{12} \\ \Sigma_0^{21} & \Sigma_0^{22} \end{pmatrix}.$$

В качестве базовых значений приняты следующие величины: $a_1 = 0.9$,

$$B = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.3 \\ 0.3 & 0.4 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.3 \\ 0.4 & 0.6 \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.5 \\ 0.5 & 1.0 \end{pmatrix}.$$

В результате работы алгоритма оценивания параметров были получены следующие оценки параметров: $a_1=0.8913$,

$$B = \begin{pmatrix} 0.7862 & 0.3360 \\ 0.2663 & 0.3816 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0.5976 & 0.2784 \\ 0.4822 & 0.5932 \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} 0.9772 & 0.4278 \\ 0.4278 & 0.9478 \end{pmatrix}.$$

Результаты оценивания приведены после третьей итерации. Наиболее хорошие оценки получаются после 9–10-й итерации, но при этом увеличивается время счета, которое зависит также и от выбранного количества исходных точек. В данном примере число исходных точек принято равным $N = 600$. Полученные результаты демонстрируют удовлетворительную работу алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена практическая реализация алгоритма оценивания параметров модели при наличии окрашенного шума. При проведении практических исследований часто бывает необходимо улучшить априорную информацию об объекте с помощью подходящих алгоритмов оценивания параметров, используя данные, полученные в процессе работы системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Острем К.* Введение в стохастическую теорию управления. – М.: Мир, 1973. – 320 с.
2. *Льюнг Л.* Идентификация систем: теория для пользователя / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
3. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
4. *Медич Дж.* Статистически оптимальные линейные оценки и управление. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
5. *Сейдж Э.П., Мелса Дж.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976. – 495 с.
6. *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.
7. *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.

8. *Goodwin G.C., Payne R.L., Kabaila P.V.* On canonical forms and algorithms for multivariable time series analysis // The 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Tbilisi, 21–27 September 1976. – Amsterdam, New York: North-Holland Publ., 1978. – Vol. 3. – P. 1965–1973.

9. *Воевода А.А., Трошина Г.В.* Оценивание параметров моделей динамики и наблюдения для линейных стационарных дискретных систем с использованием информационной матрицы Фишера // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3 (24). – С. 199–200.

10. *Трошина Г.В.* Активная идентификация линейных динамических дискретных стационарных объектов во временной области: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2007. – 171 с.

11. *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.

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. *Трошина Г.В.* D-оптимальный план эксперимента в задачах активной идентификации по данным установившегося режима для линейных стационарных дискретных систем // Наука. Промышленность. Оборона: труды VII всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 445–449.

14. *Трошина Г.В.* О методах оценивания вектора состояния в задачах идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 69–78.

15. *Voevoda A.A., Troshina G.V.* Active identification of linear stationary dynamic object on base of the Fisher information matrix: the steady state // Proceedings of the XII International Conference "Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2014)", Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 745–749. – doi: 10.1109/APEIE.2014.7040785.

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

18. *Трошина Г.В.* Об активной идентификации динамических объектов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 41–52. – doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52.

19. 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.

20. Трошина Г.В. Моделирование динамических объектов в среде Simulink. Ч. 1 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 55–68. – doi: 10.17212/2307-6879-2015-3-55-68.

21. 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.

22. Рева И.Л., Воевода А.А., Трошина Г.В. О некоторых типах случайных процессов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 2 (80). – С. 45–55. – doi: 10.17212/2307-6879-2015-2-45-55.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 200 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

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 iterative procedure of the model parameters estimation at action of the painted noise*

A.A. Voevoda¹, G.V. Troshina²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, doctor of Technical Sciences, professor of the automation department. E-mail: ucit@ucit.ru

² 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 practical researches considerable cost of the various operated productions, the difficulties arising when carrying out experiments, and also existence of the revolting noises and other random factors, results in need of the special mathematical apparatus development for the various control systems creation and use of results from the adjacent field of science and tech-

* Received 26 October 2015.

nique. In many cases it is necessary to estimate not only the system condition, but also to estimate the object parameters. For the solution of the system parameters estimation problem or, in other words, for the solution of the identification problem, many methods are offered, but still there is no method which would be ideal and well used in all chances. It is desirable to have such procedure of the system identification which would possess, for example, the set properties of efficiency, the realization simplicity, a possibility of identification in real time. In this case the system parameters identification problem could be solved with the object condition estimation problem in parallel. The algorithms optimality depends in a varying degree on the reliability of those data which are used at the mathematical model description. In some cases, the results quality received during the work of the estimation algorithms can be low because of the exact data lack. The method choice used in engineering practice in many respects depends on the concrete mathematical object, and also on the requirements imposed on the method convergence, or, for example, the restrictions, imposed on the control. In this work the practical example of the model parameters estimation iterative procedure in the presence of the painted noise is given.

Keywords: mathematical model, identification, likelihood function, modeling, white noise, control, parameters estimation, Fischer information matrix

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-26-36

REFERENCES

1. Åström K.J. *Introduction to stochastic control theory*. New York, London, Academic Press, 1970. 298 p. (Russ. ed.: Ostrem K. *Vvedenie v stokhasticheskuyu teoriyu upravleniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1973. 320 p.).
2. 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.).
3. 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. 680 p.).
4. Meditch J.S. *Stochastic optimal linear estimation and control*. New York, McGraw-Hill, 1969. 384 p. (Russ. ed.: Medich Dzh. *Statisticheski optimal'nye lineinye otsenki i upravlenie*. Translated from English. Moscow, Energiya Publ., 1973, 440 p.).
5. Sage A.P., Melse J.L. *Estimation theory with application to communication and control*. New York, McGraw-Hill, 1972. 540 p. (Russ. ed.: Seidzh E.P., Melsa Dzh. *Teoriya otsenivaniya i ee primeneniye v svyazi i upravlenii*. Translated from English. Moscow, Svyaz' Publ., 1976. 495 p.).
6. 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.
7. 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.

8. Goodwin G.C., Payne R.L., Kabaila P.V. On canonical forms and algorithms for multivariable time series analysis. *The 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation*, Tbilisi, 21–27 September 1976, vol. 3, pp. 1965–1973.
9. Voevoda A.A., Troshina G.V. Otsenivanie parametrov modelei dinamiki i nablyudeniya dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem s ispol'zovaniem informatsionnoi matritsy Fishera [Parameters estimation of dynamics and supervision models for linear stationary discrete systems with use of Fischer information matrix]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (24), pp. 199–200.
10. Troshina G.V. *Aktivnaya identifikatsiya lineinykh dinamicheskikh diskretnykh statsionarnykh ob"ektov vo vremennoi oblasti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Active identification of linear dynamic discrete stationary objects in a time domain. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2007. 171 p.
11. 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.
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. Troshina G.V. [D-optimum design of experiment in active identification problems on base of steady state for single-line stationary discrete systems]. *Trudy VII vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Nauka. Promyshlennost'. Oborona"* [Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference "Science. Industry. Defence"], Novosibirsk, 2006, pp. 445–449. (In Russian)
14. Troshina G.V. O metodakh otsenivaniya vektora sostoyaniya v zadachakh identifikatsii [About state vector estimation methods in identification problems]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 69–78.
15. Voevoda A.A., Troshina G.V. Active identification of linear stationary dynamic object on base of the Fisher information matrix: the steady state. *Proceedings of the XII International Conference "Actual problems of electronic instrument en-*

gineering (APEIE-2014)", Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, pp. 745–749. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040785

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. 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.

18. Troshina G.V. Ob aktivnoi identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [About active identification of dynamic objects]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (78), pp. 41–52. doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52

19. 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

20. Troshina G.V. Modelirovanie dinamicheskikh ob"ektov v srede Simulink. Ch. 1 [The dynamic objects modelling in Simulink environment. Pt. 1]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 55–68. doi: 10.17212/2307-6879-2015-3-55-68.

21. 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

22. Reva I.L., Voevoda A.A., Troshina G.V. O nekotorykh tipakh sluchainykh protsessov [About some types of the stochastic processes]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 2 (80), pp. 45–55. doi: 10.17212/2307-6879-2015-2-45-55