СБОРНИК **НАУЧНЫХ ТРУДОВ НГТУ. – 2015. – № 3(81).** – 55–68

УДК 519.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ SIMULINK. Часть 1*

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

Наиболее интересной особенностью пакета MATLAB является наличие в нем весьма эффективного средства составления специализированных моделей – пакета Simulink. С помощью пакета Simulink появляется возможность выполнять исследование поведения динамических линейных и нелинейных систем. Имеется возможность осуществлять ввод характеристик систем в диалоговом режиме. При создании моделей используется технология Drag-and-Drop. Как правило, модели, используемые на практике, имеют иерархическую структуру, при этом общее количество уровней иерархии не ограничивается. При построении моделей и последующем моделировании физических процессов существует возможность отслеживать промежуточные состояния системы с помощью специальных блоков, входящих в библиотеку Simulink. В случае разработки собственных блоков библиотека Simulink может быть дополнена самим пользователем. При формировании блок-схемы динамической системы должны быть включены один или несколько блоков-источников, генерирующих сигналы, а также один или несколько блоков-приемников, которые, собственно, и позволяют получать информацию о состоянии системы. Возможность быстрого получения графической информации об изменениях моделируемой системы за определенный промежуток времени является одним из важных преимуществ моделирования процессов в пакете Simulink. Также можно отметить широкие возможности для работы с сигналами, например, для расчета и проектирования фильтров, в том числе включая построение импульсных, частотных и переходных характеристик, оценки параметров фильтров по измеренным данным входных и входных последовательностей. В данной работе описываются некоторые этапы построения динамической системы при помощи блок-диаграмм с использованием пакета Simulink.

Ключевые слова: идентификация, библиотека Simulink, динамическая система, фильтр Калмана, единичный импульс, моделирование, пространство состояний, наблюдатель

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-55-68

---

* Статья получена 30 июня 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

В системе MATLAB значительное место отводится специализированным группам программ, называемых Toolboxes. Toolboxes представляет собой коллекцию функций MATLAB (M-файлов), которые позволяют решать частные классы задач. Toolboxes применяются, например, для обработки сигналов, систем контроля, нейронных сетей, нечеткой логики, вейвлетов, моделирования и т. д.

После запуска пакета MATLAB на панели инструментов необходимо выбрать пакет-расширение Simulink (рис. 1).

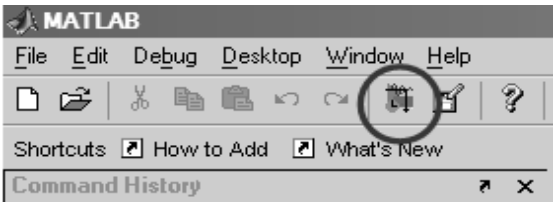

Рис. 1. Панель инструментов

Simulink – это интерактивная система для моделирования нелинейных динамических систем. Она представляет собой среду, которая позволяет моделировать процесс путем перетаскивания блоков и диаграмм на экране.

Simulink работает с линейными, нелинейными, непрерывными, дискретными, многомерными системами. В состав модуля Simulink входит библиотека элементов (рис. 2), необходимых для создания моделей объектов и систем.

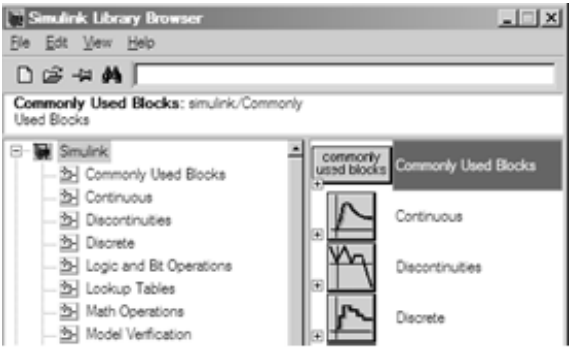

Рис. 2. Библиотека Simulink

При построении блок-схем используются элементарные блоки, позволяющие связать блок-схему со средой MATLAB и обеспечить функционирование в ней построенной модели как программы.

1. ЭЛЕМЕНТЫ БИБЛИОТЕКИ SIMULINK

Для построения динамической системы понадобятся элементы, изображенные на рис. 3.

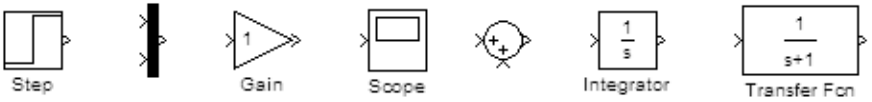

Рис. 3. Компоненты библиотеки Simulink

Рис. 4. Контекстное меню

Практически все элементы в Simulink имеют ряд параметров, которыми регулируются их поведение и свойства. Доступ к этим параметрам можно получить с помощью пункта “<название_компонента> Properties…” контекстного меню, открывающегося при нажатии правой кнопкой мыши на компоненте (рис. 4). Для остальных компонентов эти элементы имеют аналогичный вид и назначение.

Рассмотрим блоки, приведенные на рис. 3, более подробно (слева направо).

1. Единичный импульс («ступенька») – элемент Step группы Sources. При использовании данного элемента рекомендуется в его свойствах установить значение параметра Step Time равным нулю (рис. 5).

2. Мультиплексор – элемент Mux группы Signal Routing. Количество входов мультиплексора задается в свойствах параметром Numbers of inputs.

3. Коэффициент усиления – элемент Gain группы Math Operations. Значение коэффициента усиления задается параметром Gain. Если необходимо задать матрицу в качестве коэффициента усиления, то в этом случае в квадратных скобках ука-

зываются строки матрицы, разделяемые точкой с запятой. Порядок умножения задается в свойствах полем Multiplication.

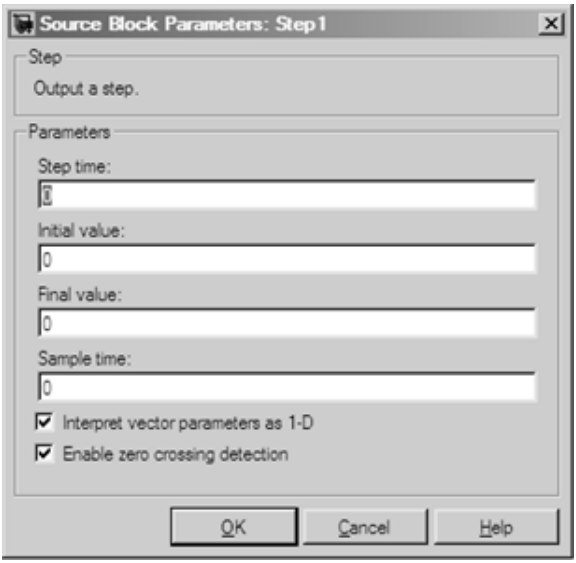

Рис. 5. Окно параметров элемента Step

4. Осциллограф – элемент Scope группы Sinks. Количество входов осциллографа задается параметром Number of axes в окне «Scope Parameters», вызываемом из экрана осциллографа. Для отображения нескольких сигналов на одной системе координат следует подавать их на один вход через мультиплексор.

5. Сумматор – элемент Sum группы Math Operations. Количество и знаки входов задаются параметром List of signs в свойствах элемента.

6. Интегратор – компонент Integrator группы Continuous.

7. Передаточная функция – компонент Transfer Fcn группы Continuous. Числитель и знаменатель передаточной функции задаются параметрами Numerator и Denominator соответственно, в квадратных скобках указываются коэффициенты при степенях полинома.

При составлении схемы каждый элемент рекомендуется выносить из библиотеки отдельно. Параметры блоков необходимо задавать до соединения с другими элементами схемы.

2. ПОСТРОЕНИЕ ОБЪЕКТА В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Задача идентификации динамических систем рассматривается в работах [1–16]. Рассмотрим алгоритм построения динамической системы в пространстве состояний, в котором объект описывается следующей системой:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad z(t) = Cx(t),$$

где $x(t)$ – вектор состояния с нулевым математическим ожиданием и неотрицательно определенной ковариационной матрицей P в начальный момент времени; A, B – матрицы состояния и управления соответственно; C – матрица наблюдения; $z(t)$ – вектор наблюдения, далее в аргументах t указывать не будем. Для дальнейших расчетов используем следующие значения:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1/3 & -4/3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 10/3 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Шаг 1. Создайте новый документ Simulink так, как это показано на рис. 6.

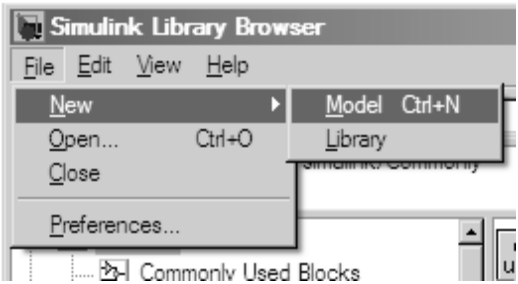

Рис. 6. Меню библиотеки Simulink

Шаг 2. Добавьте на рабочую область Simulink компонент Step. Для этого откройте в библиотеке Simulink группу Sources и щелкните правой кнопкой мыши на элементе Step. В открывшемся меню выберите пункт Add to untitled, чтобы добавить элемент в рабочую область. Аналогичным образом добавьте на рабочую область следующие элементы:

– элемент Step группы Sources;
– элемент MUX группы Signal Routing;
– элемент Gain группы Math Operations;
– элемент Scope группы Signal Sinks;
– элемент Sum группы Math Operations;
– элемент Integrator группы Continuous.

Шаг 3. Соедините вынесенные элементы модели. Каждый элемент имеет вход(ы) и/или выход(ы). На рис. 7 показано обозначение входов и выходов на примере элемента Gain.

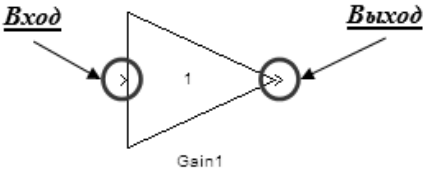

Рис. 7. Вход и выход элемента Gain

Шаг 4. Для формирования входного δ-импульса необходимо просуммировать два единичных импульса. Соедините выходы элементов Step со входами элементов Sum. В свойствах одного из элементов Step установите параметр Step Time = 0 и Final Value = 10, а в свойствах второго – Step Time = 0.1 и Final Value = –10. На рис. 8 показана полученная схема.

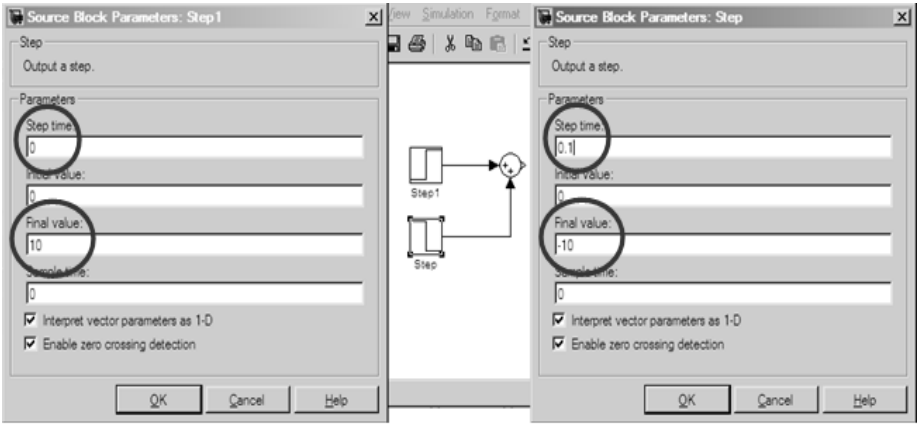

Рис. 8. Синтез входного импульса

Шаг 5. Внесите в свойства элементов Gain матрицы A, B, C объекта в пространстве состояния и соберите модель системы. На рис. 9 показана полученная схема.

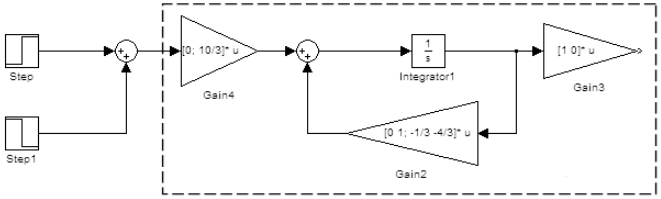

Рис. 9. Схема соединения элементов объекта

Если известны параметры математической модели системы, то существует возможность получения оценки вектора состояния системы по наблюдаемым входам и выходам. Устройство, позволяющее получить эту оценку, принято называть наблюдателем.

3. СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Наблюдатель описывается уравнением

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}),$$

где $\hat{x}$ – оценка вектора состояния x; L – матрица наблюдателя. Для рассматриваемого примера имеем $L = \begin{pmatrix} 56/3 \\ 673/9 \end{pmatrix}$. На рис. 10 показан результат моделирования объекта и наблюдателя в среде Simulink.

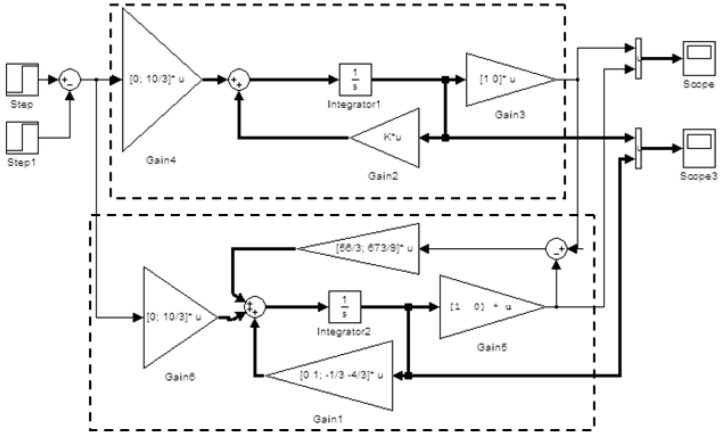

Рис. 10. Объект и схема соединения компонентов наблюдателя

Для выделения соединительных линий необходимо выбрать пункт Wide Nonscalar Lines из меню Format → Port/Signal Displays (рис. 11).

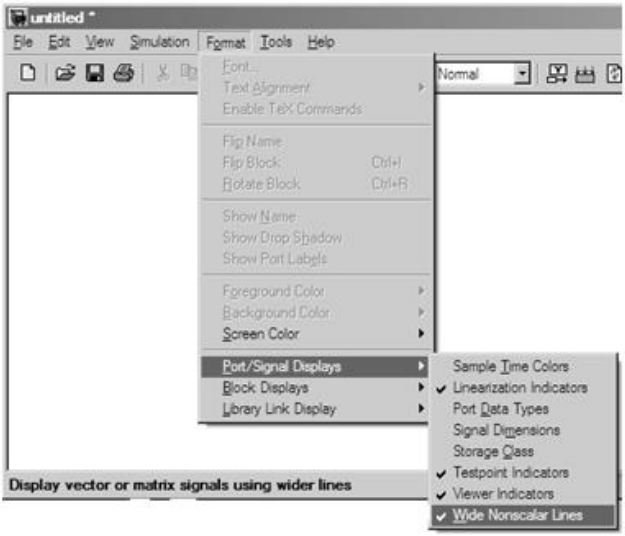

Рис. 11. Установка параметра выделения векторов

Для отображения нескольких сигналов на одном экране осциллографа используется компонент Mux.

В пакете-расширении Simulink не учитываются влияния помех и другие физические процессы. Поэтому, чтобы увидеть различия в переходных процессах исследуемых систем, можно задать различные начальные условия на интеграторах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены этапы построения модели динамической системы в графической среде имитационного моделирования Simulink. Необходимо отметить также некоторые трудности использования моделей в среде Simulink, например жесткость формы графического представления сигналов. В работах [17, 18] показано применение фильтра Калмана при решении задачи активной идентификации системы управления перевернутым маятником. Представляет интерес подход, предложенный в работах [19–21].

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. *Mehra R.K.* Optimal input signal for parameter estimation in dynamic system – survey and new results // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. 19, iss. 6. – P. 753–768. – doi: 10.1109/TAC.1974.1100701.

5. *Mehra R.K.* On the identification of variences and adaptive Kalman filtering. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1970. – Vol. 15, iss. 2. – P. 175–184. – doi: 10.1109/TAC.1970.1099422.

6. *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.

7. *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.

8. *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.

9. *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.

10. *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, 19–21 апреля 2006 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 445–449.

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

12. *Voevoda A.A., Troshina G.V.* Active identification of liner stationary dynamic objects on base of the Fisher information matrix: the steady state // Труды

XII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП–2014, Новосибирск, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 1. – С. 745–748.

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

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

15. *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.

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

17. *Troshina G.V., Voevoda A.A.* Parameters estimation with Fischer information matrix on the example of the control system of the inverted pendulum // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2015): proceedings, Omsk, Russia, 21–23 May 2015. – Omsk, 2015. – P. 1–4. – doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147243.

18. *Трошина Г.В., Воевода А.А.* Активная идентификация системы управления перевернутым маятником // 18 International conference on soft computing and measurements (SCM'2015) = 18 международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015), Санкт-Петербург, 19–21 may 2015: сборник докладов: в 2 т. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – Т. 1. – С. 153–156. – ISBN 978-5-7629-1613-4.

19. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.

20. *Воевода А.А., Чехонадских А.В.* Оптимизация расположения полюсов системы автоматического управления с регулятором пониженного порядка // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 113–123.

21. *Воевода А.А., Корюкин А.Н., Чехонадских А.В.* О понижении порядка стабилизирующего управления на примере двойного перевернутого маятника // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 69–83.

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 dynamic objects modelling in Simulink environment*

G.V. Troshina

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph. D. (Eng.), associate professor. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

The most interesting characteristic of a MATLAB package is the very effective means of drawing up specialized models – a Simulink package. By means of a Simulink package there is an opportunity to carry out research of behavior of dynamic linear and nonlinear systems. There is an opportunity to carry out the characteristics systems input in the dialogue mode. At models creation the Drag-and-Drop technology is used. As a rule, the models used in practice have hierarchical structure, thus the hierarchy levels total isn't limited. At models creation and the subsequent modeling of physical processes there is an opportunity to trace intermediate conditions of system by means of the special blocks entering into Simulink library. In case of the own blocks development the Simulink library can be added by the user. When forming the dynamic system flowchart one or several blocks sources generating signals, and also one or several blocks receivers which, actually, and allow to receive information on a system condition have to be switched on. The fast obtaining possibility of the graphic information on changes of the modelled system for a certain period is one of important advantages of processes modeling in a Simulink package It is also possible to note ample opportunities for work with signals, for example, for calculation and design of filters, including creation of pulse, frequency and transitional characteristics, the filters parameters estimates according to the measured data of input and output sequences. In this work the some creation stages of dynamic system by means of block charts with use of a Simulink package are described.

Keywords: identification, Simulink library, dynamic system, Kallman filter, single impulse, modeling, state space, observer

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-55-68

REFERENCES

1. Åstrŏm K.J. *Introduction to stochastic control theory*. New York, Academic Press, 1970. 299 p. (Russ. ed.: Ostrem K. *Vvedenie v stokhasticheskuyu teoriyu upravleniya.* Moscow, Mir Publ., 1973. 320 p.).

* *Received 30 June 2015.*

2. Ljung L. *System identification: theory for the user*. Prentice Hall, 1987. 384 p. (Russ. ed.: L'yung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 432 p.).

3. Eykhoff P. *System identification: parameter and state estimation*. Chichester, England, Wiley, 1974. 555 p. (Russ. ed.: Eikkhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya: otsenivanie parametrov i sostoyaniya*. Moscow, Mir Publ., 1975. 683 p.).

4. Mehra R.K. Optimal input signal for parameter estimation in dynamic system – survey and new results. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, iss. 6, pp. 753–768. doi: 10.1109/TAC.1974.1100701

5. Mehra R.K. On the identification of variences and adaptive Kalman filtering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 15, iss. 2, pp. 175–184. doi: 10.1109/TAC.1970.1099422

6. Voevoda A.A., Troshina G.V. Otsenivanie parametrov modelei dinamiki i nablyudeniya dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem ispol'zovaniem informatsionnoi matritsy Fishera [Parameters estimation of dynamics and supervi sion models for linear stationary discrete systems with use of Fischer information]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (24), pp. 199–200.

7. 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.

8. 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.

9. Voevoda A.A., Troshina G.V. Vychislenie informatsionnoi matritsy Fishera dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem s neizvestnymi parametrami v modelyakh dinamiki i nablyudeniya [Calculation of the Fisher information matrix for linear stationary discrete systems with unknown parameters in dynamics and observation 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.

10. 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 7th All-Russian scientific and technical conference "Science. Industry. Defence"], Novosibirsk, Russia, 19–21 April 2006, pp. 445–449. (In Russian)

11. 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.

12. Voevoda A.A., Troshina G.V. [Active identification of liner stationary dynamic objects on base of the Fisher information matrix: the steady state]. *Trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniya", APEP–2014*: v 7 t. [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE–2014: Proceedings: in 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 1, pp. 745–748. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040785

13. 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.

14. 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.

15. 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

16. 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

17. Troshina G.V., Voevoda A.A. Parameters estimation with Fischer information matrix on the example of the control system of the inverted pendulum. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2015): proceedings*, Omsk, Russia, 21–23 May 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147243

18. Troshina G. V., Voevoda A.A. [Active identification of the inverted pendulum control system]. *18 mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2015): sbornik dokladov*: v 2 t. [18th International conference on soft computing and measurements, SCM 2015, 19–21 May 2015: in 2 vol.]. St. Petersburg, 2015, vol. 1, pp. 153–156.

19. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: polinomial'nyi metod sinteza dvukhkanal'noi sistemy [Two-mass system stabilization: polynomial method of two-channel system design]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 2009, no. 4 (58), pp. 121–124.

20. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V. Optimizatsiya raspolozheniya polyusov sistemy avtomaticheskogo upravleniya s regulyatorom ponizhennogo poryadka [Optimization of the pole location of automatic control systems with a reduced-order controller]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, vol. 45, iss. 5, pp. 113–123. (In Russian)

21. Voevoda A.A., Koryukin A.N., Chekhonadskikh A.V. O ponizhenii poryadka stabiliziruyushchego upravleniya na primere dvoinogo perevernutogo mayatnika [Reducing the stabilizing control order for a double inverted pendulum]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, iss. 6, pp. 69–83. (In Russian)