

Научная статья
УДК 629.735.33.015.075
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181889>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗВЕНЬЕВ КОНТУРА «УПРУГИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ – КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ»

Глеб Вадимович Лисейкин¹, Камиль Зуфарович Сафин²✉

^{1,2}Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский, Московская область, Россия

¹gleb.liseykin@tsagi.ru

²kamilsafin1997@mail.ru ✉

Аннотация. В данной работе рассматривается разработка методов идентификации нелинейных систем в среде моделирования динамических систем на основе данных, полученных в ходе испытаний контура «упругий летательный аппарат (ЛА) – комплексная система управления (КСУ)». Конечной целью является разработка способа создания модели, обученной на данных из некоторого конечного числа экспериментов, таким образом, чтобы она могла описывать поведение системы при заданном сигнале любой амплитуды из определённого промежутка. В основном, в работе используется нелинейная модель Хаммерштайна-Винера.

На первом этапе были идентифицированы системы, созданные в среде моделирования динамических систем, на основе данных, полученных в виртуальном

эксперименте. К колебательному звену были добавлены различные нелинейности с известными параметрами нелинейности, а именно: зона нечувствительности, насыщение, запаздывание, квантование. В среде моделирования была получена модель, воспроизводящая поведение ранее упомянутой системы. По критерию NRMSE (normalized root mean square error – нормализованное среднеквадратическое отклонение) было получено качество модели выше 99%.

На следующем этапе работы с помощью подходов, разработанных при идентификации модели из среды моделирования динамических систем, на основе данных, полученных в ходе испытаний в аэродинамической трубе (АДТ), были идентифицированы реальные объекты управления. По критерию NRMSE было получено качество модели выше 90%.

Ключевые слова: идентификация, нелинейные системы, модель Хаммерштайна-Винера, виртуальный эксперимент

Для цитирования: Лисейкин Г.В., Сафин К.З. Идентификация нелинейных моделей звеньев контура «упругий летательный аппарат – комплексная система управления»

// Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181889>

Original article

IDENTIFICATION OF NONLINEAR MODELS OF THE COMPONENTS OF THE "ELASTIC AIRCRAFT – FLIGHT CONTROL SYSTEM" LOOP

Gleb Vadimovich Liseikin¹, Kamil' Zufarovich Safin²✉

^{1,2}Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

¹gleb.liseykin@tsagi.ru

²kamilsafin1997@mail.ru✉

Abstract. The process of identifying a control system involves creating a model in the time or frequency domain, which is expressed as a set of mathematical rules. This representation can be in the form of a set of objects whose behavior is assumed to be known, or by other means. Based on this mathematical model, a digital twin can be generated that can be used to conduct virtual tests or optimize various parameters of a real object. Currently, an important aspect in the field of automatic control theory is the development of methods for identifying nonlinear control systems. This article discusses the development of such methods in the context of modeling dynamic systems using data collected during testing of contour "elastic aircraft – integrated control system". The main goal is to develop a method for creating a model that would be trained based on data obtained from a finite number of experiments, so that it could accurately describe the behavior of the control system at any given input signal in a given amplitude range. For this purpose, the nonlinear Hammerstein–Wiener model is used in the work. This model has a number of advantages over other approaches, including its ability to take into account the physical parameters of the system in question, ease of implementation and speed of operation compared to neural networks or Volterra models. In addition, the model allows you to obtain a linear approximation, which can be useful under certain

circumstances. It should also be noted that it can be applied to systems with multiple input/output channels (MIMO), which expands its capabilities.

At the initial stage, the goal was to identify a system created in a dynamic modeling environment based on data collected in a virtual experiment. Various nonlinearities with known parameters were introduced into the oscillatory link, in particular: dead zone, saturation, transmission delay and quantization. As part of the dynamic system simulation, a model has been developed that reproduces the behavior of the above-mentioned system. Based on the NRMSE (normalized root mean square error) indicator, it was determined that the accuracy of the model exceeds 99%.

At the next stage of the project, real control objects were identified using methods developed to identify the model from the dynamic systems modeling environment, using data collected during wind tunnel tests. According to the NRMSE assessment, the quality of the model turned out to be more than 90% accurate.

Keywords: identification, nonlinear systems, Hammerstein-Wiener model, virtual experiment

For citation: Liseikin G.V., Safin K.Z. Identification of nonlinear models of the components of the "elastic aircraft – flight control system" loop. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181889>

Процесс идентификации системы управления представляет собой создание модели во временной и/или частотной области, выраженной в форме математических законов, в виде совокупности объектов, поведение которых считается известным, или иными способами. На основе математической модели

системы можно создать её цифровой двойник, который может быть использован для проведения виртуальных экспериментов или для оптимизации различных параметров самого объекта. На сегодняшний день важным направлением в теории автоматического управления является разработка методов идентификации нелинейных систем управления [1-5].

Некоторое время назад идентификация нелинейных систем была областью, где применялось лишь несколько специальных подходов, каждый из которых был применим только к очень ограниченному типу систем. С появлением нейронных сетей и современных методов оптимизации можно работать с гораздо более широким классом систем. В последние годы были разработаны инструменты, позволяющие использовать один и тот же подход для идентификации большого количества различных объектов. Безусловно, более специфичная для конкретной задачи процедура обычно обеспечивают лучшую производительность, но с промышленной точки зрения решающим критерием успеха является разумный компромисс между усилиями по разработке и производительностью [6-9]. В данной работе используются модели Хаммерштайна-Винера [10-14], так как они позволяют получить достаточно хорошие модели без использования больших вычислительных мощностей.

1. Описание задачи

Исследование запасов устойчивости замкнутого контура «упругий летательный аппарат – комплексная система управления» (рис. 1) является одной из задач динамической аэроупругости. Выводы о соответствии летательного аппарата

нормированным запасам делаются исходя из результатов расчетов, экспериментов в АДТ и, при необходимости, летных испытаний [15, 16].

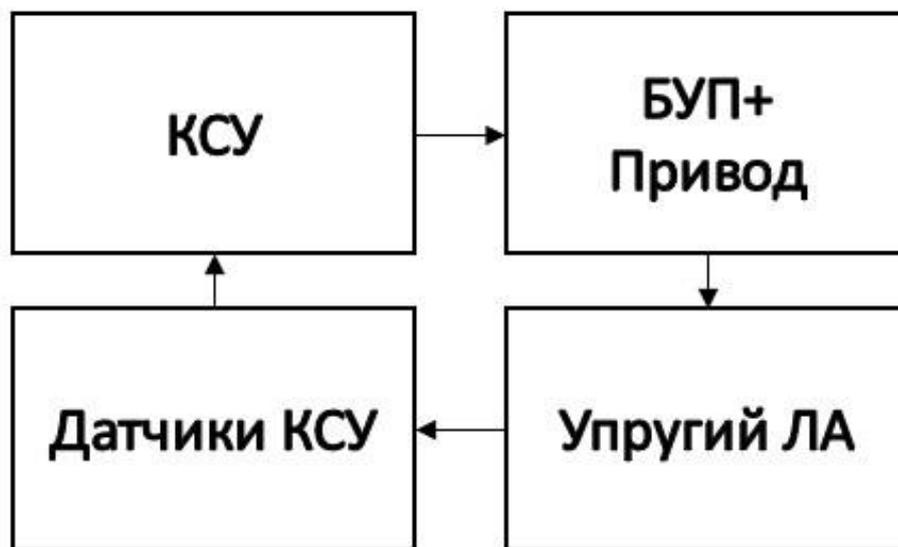


Рис. 1. Контур «упругий летательный аппарат – комплексная система управления»

Каждый из этих блоков может включать в себя следующие типы нелинейностей: упругий ЛА – люфты, сухое трение; датчики КСУ – зоны нечувствительности, квантование по уровню; цифровая КСУ – дискретизация по времени, квантование управляющего сигнала по уровню; приводы с блоками управления – люфты, ограничение скорости и насыщение [17-20]. Характеристики некоторых типов нелинейностей во временной области приведены на рис. 2.

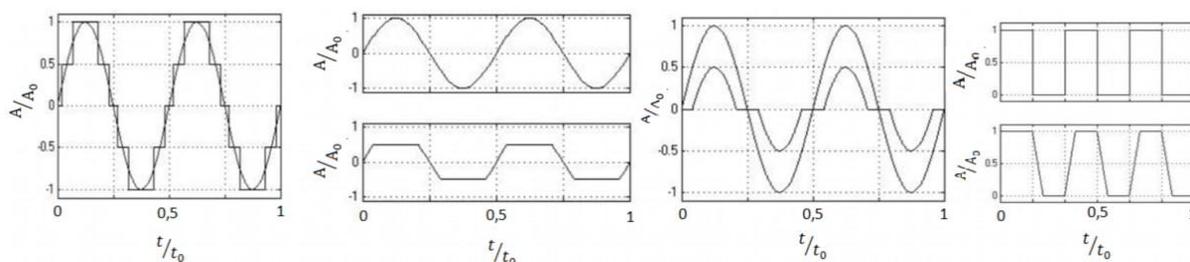


Рис. 2. Характеристики во временной области прямоугольного сигнала при наличии квантования, насыщения, зоны нечувствительности при гармоническом сигнале и ограничения скорости

Основной целью работы является разработка способа создания модели, обученной на данных из некоторого конечного числа экспериментов, таким образом, чтобы она могла описывать поведение системы управления при заданном сигнале любой амплитуды из определённого промежутка.

2. Описание модели Хаммерштайна-Винера

Модель Хаммерштайна-Винера состоит из трёх частей: входной и выходной нелинейностей и линейной части между ними (рис. 3).



Рис. 3. Структурная схема модели Хаммерштайна-Винера

Нелинейные звенья модели могут быть кусочно-линейными функциями, однослойными сигмоидными сетями, вейвлетами, функцией насыщения, зоной нечувствительности или полиномами.

Основными преимуществами модели являются связь с физическими параметрами системы, простота внедрения и скорость работы, по сравнению с нейросетями и моделями Вольтерры, возможность выделения линейной модели, возможность использования для систем с несколькими входами и выходами [3, 4].

3. Основные этапы идентификации

Основные этапы идентификации:

- подготовка данных, обучающей и тестовой выборок: фильтрация, ресамплинг, устранение смещения и нормализация (при необходимости);
- настройка структуры модели: выбор порядка полиномов линейной модели, величины задержки, выбор типов входных/выходных нелинейных звеньев, выбор функции потерь и алгоритма идентификации, регуляризация, настройка параметров выбранного алгоритма (количество итераций/условия остановки);
- идентификация и валидация на тестовой выборке;
- визуальная оценка, оценка доверительных интервалов, оценка точности по метрике NMRSE [3, 4].

4. Создание виртуальной модели в среде моделирования динамических систем

На первом этапе была поставлена задача идентификации системы (рис. 4), созданной в среде моделирования динамических систем, на основе данных, полученных в виртуальном эксперименте.

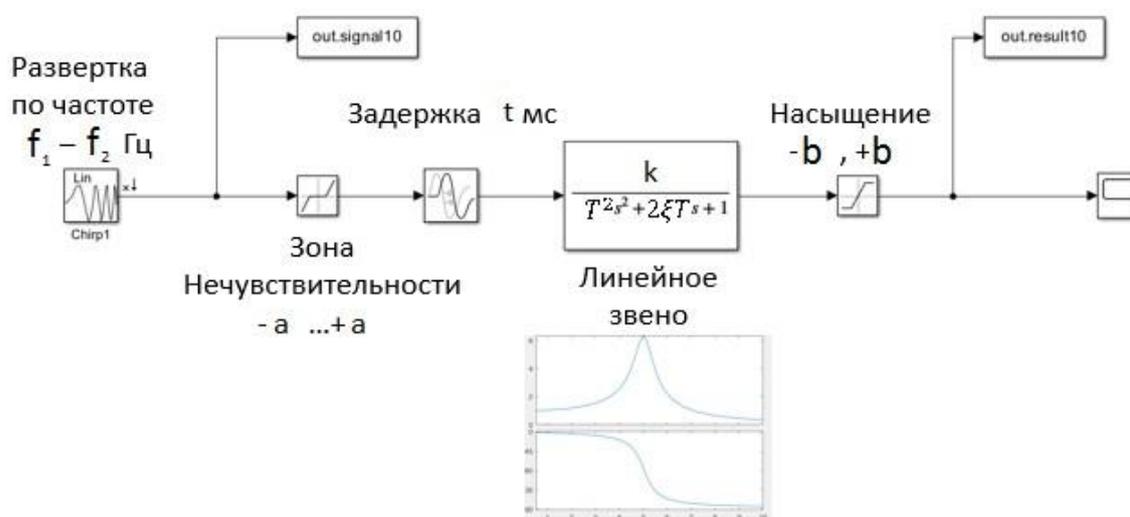


Рис. 4. Модель, созданная в среде моделирования динамических систем

В реальном эксперименте измерения проводятся по методу пошагового синуса, поэтому и в виртуальной модели использовался такой же тип сигнала.

5. Результаты моделирования

В ходе виртуального эксперимента были получены наборы данных во временной области для различных значений амплитуд входного сигнала (рис. 5). Часть данных была использована для оценки параметров модели, другая – для валидации.

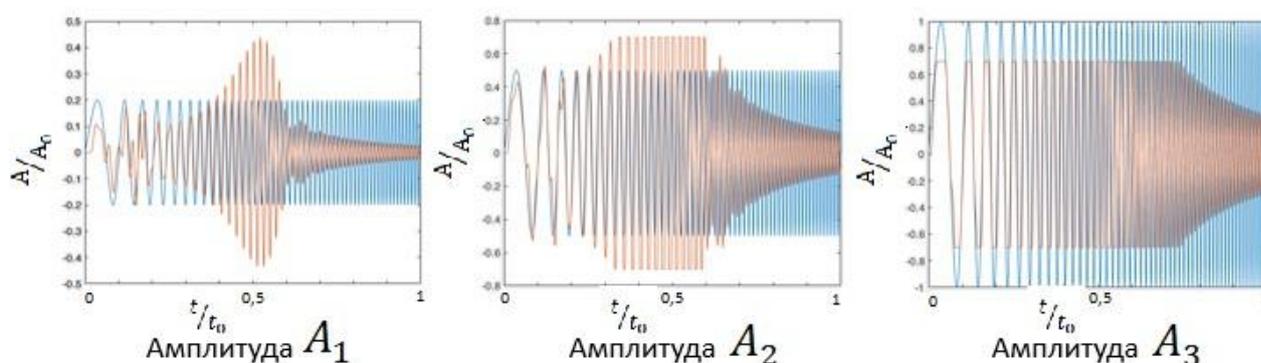


Рис. 5. Наборы данных, полученные в виртуальном эксперименте

На рис. 5 изображены 3 набора данных при различных амплитудах входного сигнала: набор 1 – амплитуда входного сигнала больше величины зоны нечувствительности, амплитуда выходного сигнала не превышает величину насыщения; набор 2 – амплитуда входного сигнала больше величины зоны нечувствительности, амплитуда выходного сигнала иногда превышает величину насыщения; набор 3 – амплитуда входного сигнала всегда больше величины насыщения.

6. Настройка процедуры идентификации

Процедура идентификации состояла из двух этапов.

На первом этапе были указаны типы входных и выходных нелинейных звеньев. В данном случае были выбраны нелинейности типа зона нечувствительности и насыщение, так как именно они присутствуют в исходной модели. У данных типов нелинейностей гиперпараметры отсутствуют. При использовании других типов нелинейностей придётся также дополнительно подбирать гиперпараметры, которые имеются у этих звеньев.

На втором этапе были указаны порядки числителя и знаменателя линейной модели, а также величина задержки. При подборе данных параметров сначала была получена наилучшая линейная модель порядка не выше 10. Параметры подобранной линейной модели использовались в качестве ориентира при подборе порядка линейного звена в модели Хаммерштайна-Винера.

Нормализация и регуляризация при идентификации не использовались.

7. Проверка результатов идентификации

После процесса идентификации была проведена перекрёстная проверка результатов идентификации (рис. 6), то есть модель обучалась на входе и выходе системы при одной амплитуде входного сигнала, после чего сравнивались выход системы и модели при другой амплитуде входного сигнала. По метрике NMRSE модель показала точность порядка 99%.

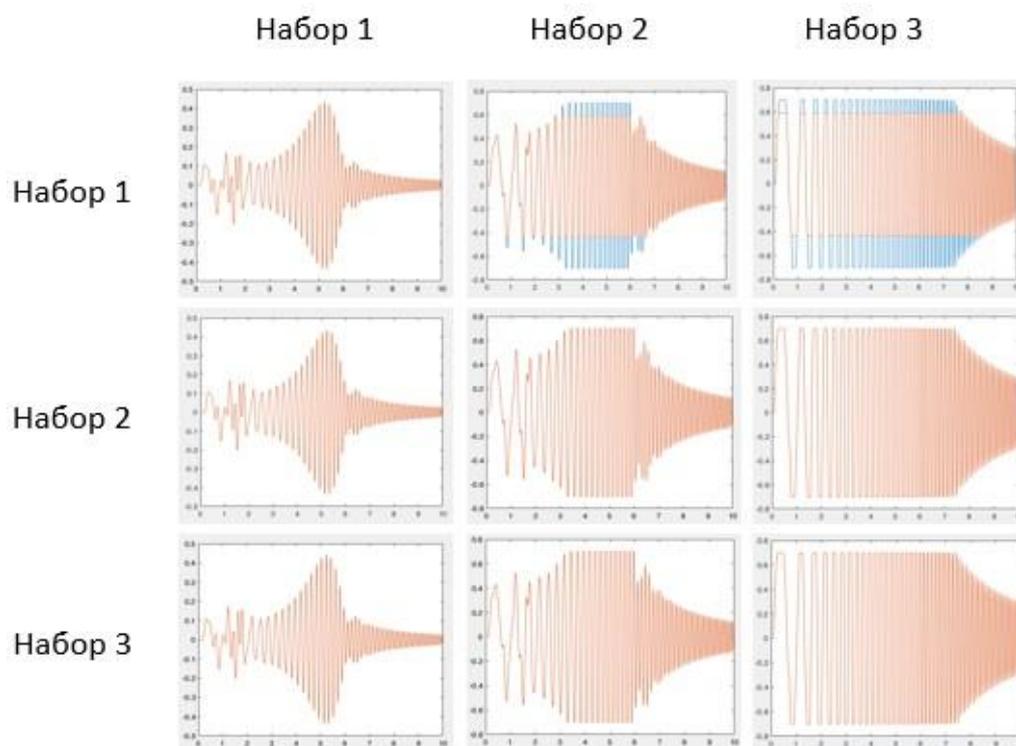


Рис. 6. Перекрёстная проверка

8. Эксперимент

На следующем этапе работы с помощью подходов, разработанных при идентификации модели из среды моделирования динамических систем, на основе данных, полученных в ходе испытаний в аэродинамической трубе, была идентифицирована модель электрического привода руля высоты динамически-подобной модели самолета (рис. 7). Сигналы датчика положения руля и генератора представлены на рис. 8. Результат идентификации модели представлен на рис. 9. Точность модели по метрике NMRSE составила порядка 93%.



Рис. 7. Схема модели из испытаний в аэродинамической трубе

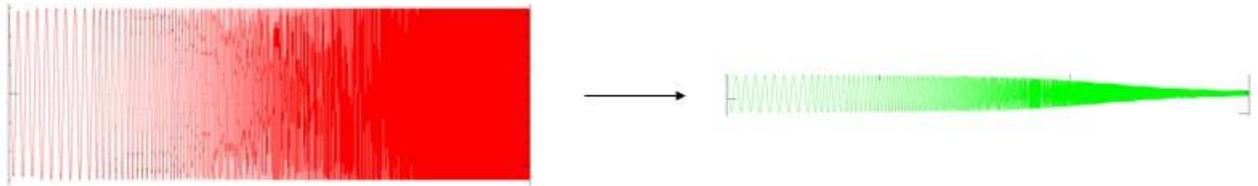


Рис. 8. Сигнал генератора (слева) и сигнал датчика (справа)

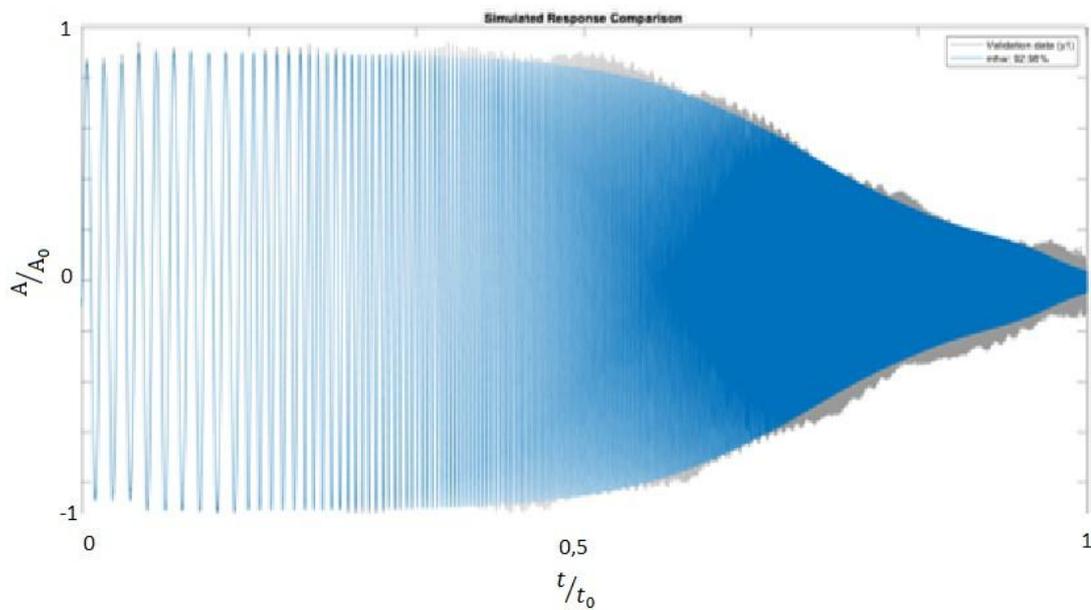


Рис. 9. Результаты идентификации

10. Выводы

Рассмотрены основные звенья контура «упругий ЛА – КСУ», указаны виды нелинейностей в звеньях. Для уточнения расчетов контура по результатам экспериментальных исследования предлагается использовать модели

Хаммерштайна-Винера. Показаны примеры идентификации нелинейных звеньев по результатам виртуального и натурного экспериментов.

Список источников

1. Brunton S.L., Kutz J.N. Data-Driven Science and Engineering. Cambridge, Cambridge University Press, 2022, pp. 360-392. DOI: [10.1017/9781009089517](https://doi.org/10.1017/9781009089517)
2. Гуськов А.А, Спирин А.А., Норинская И.В. Имитационная модель электромеханического рулевого привода малогабаритного высокоманевренного летательного аппарата // Труды МАИ. 2019. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112813>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-14)
3. Ватаева Е.Ю. Параметрический синтез операторов управления САУ при полиномиальной аппроксимации характеристик нелинейных элементов // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171404>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-16](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-16)
4. Буренко Е.А. Математическая модель контура управления системы радиотеленавещения // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176855>
5. Егорчев М.В., Тюменцев Ю.В. Нейросетевой полуэмпирический подход к моделированию продольного движения и идентификации аэродинамических характеристик маневренного самолета // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=81171>

6. Nelles O. Nonlinear system identification: From classical approaches to neural networks, fuzzy models and Gaussian processes. Cham, Springer, 2021, pp. 1-20. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47439-3_1
7. Фадин Д.А. Использование среды MATLAB-Simulink для реализации вычислительных алгоритмов в целочисленных микропроцессорных системах // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57021>
8. Эзрохи Ю.А., Каленский С.М. Идентификации математической модели ГТД по результатам испытаний // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
9. Калягин М.Ю., Волошин Д.А., Мазаев А.С. Моделирование системы управления полетом квадрокоптера в среде Simulink и Simscape Multibody // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116625>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-20](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-20)
10. Wills A., Schön T.B., Ljung L., Ninness B. Identification of Hammerstein-Wiener models // Automatica, 2013, vol. 49(1), pp. 70–81. DOI: [10.1016/j.automatica.2012.09.018](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.09.018)
11. Алесенко В.В., Больших А.С., Генкин М.Д. и др. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Измерения и испытания. Т. 5. – М.: Машиностроение, 1981. С. 366-374.
12. Морозов А.Ю. Интерполяционный подход в задачах моделирования динамических систем с эллипсоидными оценками параметров // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167168>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-24)

13. Родионова Д.А. Синтез оптимальных детерминированных систем с полной обратной связью методом итерационного динамического программирования // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63137>
14. Семаков С.Л., Семаков И.С. Простейшая прогнозная модель временного ряда и ее реакция на линейное и параболическое входные воздействия // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93446>
15. Вавилов А.А. Частотные методы расчёта нелинейных систем. - Ленинград: Энергия, 1970. С. 50-75.
16. Лаврентьева М.В., Говорков А.С. Идентификация объектов структуры электронной модели изделия с помощью выявленных формализованных параметров из конструкторско-технологической среды // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85930>
17. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных схемах. - М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1973. С. 20-34.
18. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. С. 7-26.
19. Кириллов В.В., Моисеев В.С. Аналоговое моделирование динамических систем. - Ленинград: Машиностроение, 1977. С. 59-94.
20. Костин С.В., Петров Б.И., Гамынин Н.С. Рулевые приводы. - Москва: Машиностроение, 1973. С. 150-164.

References

1. Brunton S.L., Kutz J.N. *Data-Driven Science and Engineering*. Cambridge, Cambridge University Press, 2022, pp. 360-392. DOI: [10.1017/9781009089517](https://doi.org/10.1017/9781009089517)
2. Gus'kov A.A., Spirin A.A., Norinskaya I.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112813>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-14)
3. Vataeva E.Yu. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171404>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-16](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-16)
4. Burenko E.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176855>
5. Egorchev M.V., Tyumentsev Yu.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81171>
6. Nelles O. *Nonlinear system identification: From classical approaches to neural networks, fuzzy models and Gaussian processes*. Cham, Springer, 2021, pp. 1-20. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47439-3_1
7. Fadin D.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57021>
8. Ezrokhi Yu.A., Kalenskii S.M. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
9. Kalyagin M.Yu., Voloshin D.A., Mazaev A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116625>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-20](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-20)
10. Wills A., Schön T.B., Ljung L., Ninness B. Identification of Hammerstein-Wiener models, *Automatica*, 2013, vol. 49(1), pp. 70–81. DOI: [10.1016/j.automatica.2012.09.018](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.09.018)

11. Alesenko V.V., Bol'shikh A.S., Genkin M.D. et al. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t. Izmereniya i ispytaniya. T. 5.* (Vibrations in technology: A reference book. In 6 volumes. Measurements and tests. Vol. 5.), Moscow, Mashinostroenie, 1981, pp. 366-374.
12. Morozov A.Yu. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167168>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-24)
13. Rodionova D.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63137>
14. Semakov S.L., Semakov I.S. *Trudy MAI*, 2018, no 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93446>
15. Vavilov A.A. *Chastotnye metody rascheta nelineinykh sistem* (Frequency methods for calculating nonlinear systems), Leningrad, Energiya, 1970, pp. 50-75.
16. Lavrent'eva M.V., Govorkov A.S. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85930>
17. Popov E.P. *Prikladnaya teoriya protsessov upravleniya v nelineinykh skhemakh* (Applied theory of control processes in nonlinear circuits), Moscow, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1973, pp. 20-34.
18. Popov E.P. *Teoriya nelineinykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* (Theory of nonlinear automatic control and control systems), Moscow, Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1979, pp. 7-26.
19. Kirillov V.V., Moiseev V.S. *Analogovoe modelirovanie dinamicheskikh sistem* (Analog modeling of dynamic systems), Leningrad, Mashinostroenie, 1977, pp. 59-94.
20. Kostin S.V., Petrov B.I., Gamynin N.S. *Rulevye privody* (Steering drives), Moscow, Mashinostroenie, 1973, pp. 150-164.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

Одобрена после рецензирования 19.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 19.06.2024; approved after reviewing on 19.07.2024;
accepted for publication on 28.08.2024