

# ПРИМЕНЕНИЕ НАСТРАИВАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФИЛЬТРАХ ЛАГЕРРА ДЛЯ ПОИСКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ САУ

## APPLICATION OF CONFIGURABLE MODELS ON LAGUERRE FILTERS FOR FINDING PARAMETRIC DEFECTS IN NONLINEAR ACS

*V. Bloschinskiy*

*Summary.* The paper presents an algorithm based on configurable isomorphic diagnostic models based on Laguerre filters with only a recursive part for finding parametric defects in nonlinear automatic control systems. Two types of nonlinearities in the object are considered: saturation and dead zone. With the help of a software package developed using the Scilab/Xcos block modeling environment, numerical experiments were carried out to configure diagnostic models, sets of vectors of reference defective technical states of the diagnostic object were determined, test diagnostics of the introduced defects was carried out by calculating the distinguishability by the values of diagnostic features. An evaluation of the efficiency and accuracy of the algorithm is given, based on which a conclusion is made about the suitability of using isomorphic models for finding defects in nonlinear dynamic objects.

*Keywords:* parametric defect, automatic control system, nonlinear object, diagnostic object, diagnostic feature, Laguerre filter, configurable model.

*Блощинский Владислав Дмитриевич*  
Аспирант, Тихоокеанский государственный  
университет, Хабаровск  
vladkms94@mail.ru

*Аннотация.* В работе представлен алгоритм, основанный на настраиваемых изоморфных диагностических моделях, построенных на фильтрах Лагерра только с рекурсивной частью, для поиска параметрических дефектов в нелинейных системах автоматического управления. Рассмотрены два вида нелинейностей в объекте: насыщение и зона нечувствительности. С помощью программного комплекса, разработанного в среде блочного моделирования Scilab/Xcos, проведены численные эксперименты по настройке диагностических моделей, определены наборы векторов эталонных дефектных технических состояний объекта диагностирования, проведено тестовое диагностирование введенных дефектов с помощью расчета различимости по значениям диагностических признаков. Дана оценка эффективности и точности работы алгоритма, исходя из которой сделан вывод о пригодности использования изоморфных моделей для поиска дефектов в нелинейных динамических объектах.

*Ключевые слова:* параметрический дефект, система автоматического управления, нелинейный объект, объект диагностирования, диагностический признак, фильтр Лагерра, настраиваемая модель.

## Введение

**В** настоящее время особую актуальность приобретает оперативное решение диагностических задач для эффективной эксплуатации сложной и дорогостоящей аппаратуры. Это приводит к необходимости решения задач по разработке диагностических алгоритмов математического обеспечения систем обработки поступающей информации, которые позволили бы автоматизировать процессы контроля систем. В настоящее время имеется множество отечественных и зарубежных работ по различным вопросам идентификации и диагностики, в том числе и по теории математического описания диагностируемых систем управления и оценки их текущего состояния [1–6]. Но в большинстве случаев разбираются довольно частные вопросы.

В вопросах решения задач автоматизации процессов диагностирования можно выделить следующие направления: использование статистических методик, построение диагностических моделей системы и применение нейросетевого подхода. Первый подход наиболее тривиален, универсален и исторически сложился первым. Основывается на различных показателях надежности автоматических систем и статистических зависимостей, что требует больших баз знаний о принципах функционирования компонентов исследуемого объекта. Третий подход является более современным и может быть менее затратен в разработке, но требует много априорной информации об объекте и его функционировании во времени.

Таких недостатков частично лишены алгоритмы, строящиеся согласно второму подходу. К ним относятся

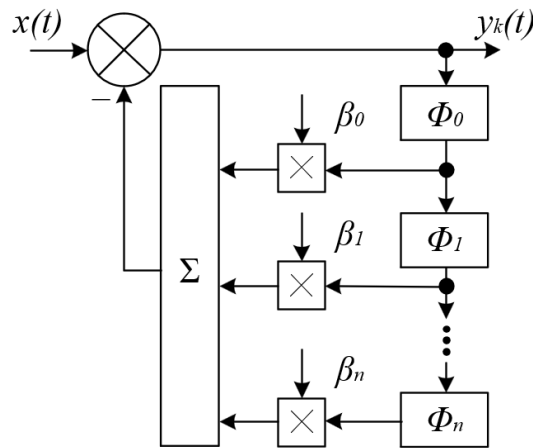


Рис. 1. Структура изоморфной диагностической модели для  $k$ -ой контрольной точки

методы поиска дефектов на основе моделей дефектов, с применением моделей чувствительности, с помощью граф-моделей и т.д. [7–9]. Широкое распространение в диагностировании технического состояния систем автоматического управления (САУ) получили классические типы математических моделей, которые являются предметом исследований теории идентификации [10, 11].

Данная работа является продолжением исследовательских работ [12–14], идея которых основывается на объединении методов идентификации и диагностики, которые по отдельности уже имеют определенные реализации, но на сегодняшний день не рассматривались в качестве единого алгоритма поиска дефектов САУ. В этих работах для поиска параметрических дефектов рассматривалось применение динамических изоморфных моделей, построенных на двух видах фильтров: на элементах задержки и на основе функций Лагерра. Также рассматривались три формы построения модели: в каноническом виде, только с рекурсивной и только с нерекурсивной частями, а также различные подходы к настройке этих моделей. Было установлено что наиболее оптимальный вариант изоморфной модели — это использование функций Лагерра в качестве базиса при построении только с рекурсивной частью. Но во всех предыдущих работах рассматривались только линейные непрерывные САУ. Цель данной работы — рассмотреть возможность применения настраиваемых изоморфных моделей для поиска дефектов в нелинейных САУ, то есть имеющих нелинейные составляющие, и определение преимуществ и недостатков такого подхода.

### Описание алгоритма

Построение диагностической модели имеет общие черты в любых методах и алгоритмах. При разработке

модели необходимо определить вектор диагностических параметров, который определяет оценку состояния объекта диагностирования. Координатами такого вектора могут служить почти любые внутренние параметры модели.

В работе рассматривается изоморфная модель только с рекурсивной частью, построенная на основе фильтров Лагерра. Общий вид модели для  $n$  базисных функций фильтра  $\Phi_i(t)$  представлен на рисунке 1.

На рисунке 1 обозначены следующие элементы:  $x(t)$  — диагностический сигнал, подаваемый на вход диагностической модели и объекта;  $y_k(t)$  — выходной сигнал модели для  $k$ -ой контрольной точки;  $\beta_1 \dots \beta_n$  — настраиваемые коэффициенты модели;  $\Phi_1 \dots \Phi_n$  — блоки, реализующие передаточные функции базисных функций фильтра  $\Phi_i(t)$ .

Система базисных функций фильтра реализуется с помощью ортогональных функций Лагерра, которые имеют следующие передаточные функции:

$$\Phi_0 = \frac{s}{s+b}, \quad \Phi_i = \frac{s-b}{s+b},$$

где  $b$  — характеристический коэффициент функций Лагерра;  $\Phi_0$  — передаточная функция первого звена фильтра;  $\Phi_i$  — передаточные функции последующих звеньев.

Коэффициенты  $\beta_i$  получаются из контуров самонастройки, которые строятся по градиентному методу, где в качестве критерия близости сигналов контрольных точек объекта диагностирования и изоморфных моделей принят квадрат их разности. Таким образом, расчет коэффициентов осуществляется согласно следующему выражению:

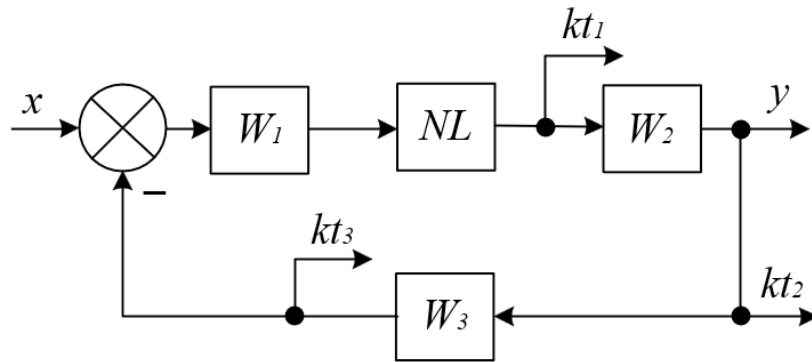


Рис. 2. Структур рассматриваемого объекта диагностирования

$$\beta_i(t) = -\gamma \int_0^t e(t) \varphi_i(t) dt,$$

где  $\varphi_i(t)$  — функция выхода  $i$ -го базисного блока в динамической модели,  $e(t)$  — функция критерия близости,  $\gamma$  — изменяемый коэффициент.

Алгоритм поиска дефектов основывается на методе распознавания образов. Таким образом, поиск параметрического дефекта в объекте осуществляется сравнением вектора параметров текущего состояния объекта с набором векторов параметров эталонных дефектов, полученных предварительно при настройке диагностической модели. Как уже упоминалось, векторы могут состояться из почти любых параметров модели. В данном случае, это значения коэффициентов  $\beta_i$ , которые описывают одно из возможных состояний объекта. При правильно настроенной изоморфной модели, эти коэффициенты, за определенное время настройки, стремятся к константе, что и позволяет использовать их в качестве координат-параметров векторов состояний. Для сравнения векторов определяется их близость друг к другу с помощью расчета диагностических признаков дефектов, которые определяются согласно выражению [12]:

$$J_j = 1 - \left( \frac{(Y - N) \cdot (Z_j - N)}{\|Y - N\| \cdot \|Z_j - N\|} \right)^2,$$

где  $Y$  — вектор параметров текущего технического состояния объекта диагностирования;  $Z_j$  — вектор эталонных параметров для  $j$ -ого рассматриваемого дефектного состояния;  $N$  — вектор параметров исправного состояния объекта. Все три вектора составляются из совокупности коэффициентов  $\beta_i$  диагностических моделей для каждой контрольной точки. Значения такого признака лежат в пределах от 0 до 1, где 0 означает полное совпадение направлений (или их противоположность) нормированных векторов  $(Y-N)$  и  $(Z_j-N)$ .

### Численные эксперименты

В данной работе для проведения численных экспериментов по настройке диагностической модели и диагностированию для доказательства работоспособности предлагаемого алгоритма используется среда блочного моделирования Scilab/Xcos. В качестве объекта диагностирования была выбрана САУ в типичном представлении, состоящая из двух последовательно соединённых блоков и еще одного блока в общей отрицательной обратной связи. Структура объекта показана на рисунке 2, где обозначены следующие сигналы:  $x$  — входной сигнал;  $y$  — выходной сигнал объекта;  $kt_1$  ...  $kt_3$  — сигналы с выбранных контрольных точек, для каждого из которых строится изоморфная диагностическая модель.

Динамические блоки « $W_1$ » ... « $W_3$ » в объекте реализуют передаточные функции согласно следующим выражениям:

$$W_1(s) = \frac{b_{10}}{a_{11}s + 1} = \frac{1}{0.1s + 1},$$

$$W_2(s) = \frac{b_{20}}{a_{21}s + 1} = \frac{2}{2s + 1},$$

$$W_3(s) = b_{30} = 1.$$

Динамический блок « $NL$ » реализует нелинейный элемент системы. В данной работе рассматривается два вида нелинейности: зона нечувствительности и насыщение. Ввиду того, что изоморфная модель работает по принципу аппроксимации характеристик объекта диагностирования и существуют определенные сложности аппроксимации нелинейных функций линейными, то параметры нелинейных объектов задавались так, чтобы исходные передаточные характеристики

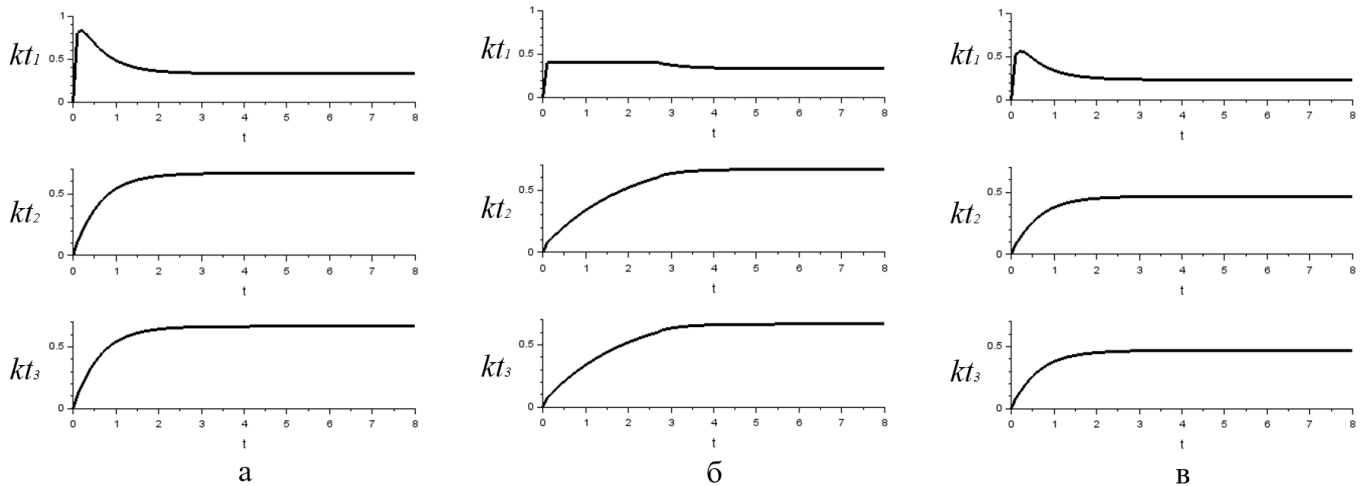


Рис. 3. Передаточные функции контрольных точек линейного объекта (а), объекта с нелинейностью типа насыщение (б) и объекта с зоной нечувствительности (в).

не сильно искажались. Таким образом, для нелинейности типа насыщение были заданы верхний и нижний пороги равные 0.4 и  $-0.4$ , соответственно, а для зоны нечувствительности 0.3 и 0. Данные параметры выбраны так, чтобы можно было дополнительно рассмотреть влияние степени нелинейности, то есть силы искажения передаточных характеристик линейной системы нелинейными блоками. На рисунке 3 показаны графики передаточных функций с контрольных точек объекта диагностирования без нелинейных элементов системы (а), с нелинейностью типа насыщение (б) и зоной нечувствительности (в).

Во время работы с диагностической моделью функции  $\beta_i(t)$  не всегда стремятся к определенным установившимся значениям, а могут совершать небольшие колебания вокруг некоторого значения. Поэтому коэффициенты  $\beta_i$ , которые далее будут использоваться в качестве координат в векторах состояния объекта, определяются как среднее по последним 10% отсчетов.

Ранее в работе [14] рассматривались два варианта настройки изоморфных моделей: совместная и индивидуальная. Вариант с индивидуальной настройкой дает немного лучшие показатели по точности диагностирования, но является немного более трудоемким и оправдывает себя в основном для структурно сложных объектов диагностирования. Поэтому в данной работе рассмотрим совместный вариант настройки, когда внутренние параметры изоморфных моделей для каждой контрольной точки соответственно равны друг другу. Общий подход к выбору параметров диагностической модели базируется на следующих рекомендациях. Параметр  $N$  — количество используемых базисных функций, определяется относительно порядка передаточной функции

объекта и выбирается равным ему или большим. Параметр  $b$  — характеристический коэффициент в функциях Лагерра, определяющий быстроедействие фильтров, выбирается так, чтобы переходные характеристики звеньев фильтра примерно соответствовали переходной характеристике объекта диагностирования. Параметр  $\gamma$  — изменяемый коэффициент в контурах самонастройки, влияющий на общую скорость работы и реакцию модели, необходимо определить экспериментально. При проведении настройки важно обращать внимание на время, за которое проходит настройка, то есть время, за которое функция ошибки рассогласования модели и объекта  $e(t)$  обращается 0, и время достижения функций  $\beta_i(t)$  константных значений. Таким образом, были выбраны следующие параметры изоморфных моделей для объекта диагностирования с зоной нечувствительности (db) и с нелинейностью типа насыщение (st):

$$N_{db} = 3, \quad b_{db} = 2.6, \quad \gamma_{db} = 1.3,$$

$$N_{st} = 5, \quad b_{st} = 2.1, \quad \gamma_{st} = 1.1.$$

Для дальнейшего исследования возможностей определения параметрических дефектов были созданы наборы векторов эталонных дефектных технических состояний рассматриваемого объекта для двух типов нелинейностей. Оба набора состоят из 20 векторов для отклонения значений каждого из параметров объекта на  $\pm 10\%$  и  $\pm 25\%$ . Для определения точности и адекватности работы представляемого алгоритма был проведен тестовый поиск дефектов, где рассматривались отклонения параметров на  $\pm 7\%$ ,  $\pm 14\%$  и  $\pm 20\%$ . Результаты проведенного диагностирования представлены в таблице 1. Для сокращения результатов в таблице приведены не все из рассмотренных дефектов и сокращен список значений диагностических признаков.

Таблица 1. Результаты диагностирования

Зона нечувствительности			Насыщение		
Введенный дефект	Эталонный дефект	Диагностический признак	Введенный дефект	Эталонный дефект	Диагностический признак
b10-14%	b10-10% b10+10% b10-25% b10+25% b20-25%	0.0000131 0.0001910 0.0002795 0.0003401 0.4274205	a11+7%	a11+10% a11-10% a11+25% a11-25% b10+10%	0.0034953 0.0275012 0.0496333 0.0967872 0.3539693
a11+7%	a11+25% a11+10% a11-25% a11-10% b30+25%	0.0000582 0.0000659 0.0005601 0.0014653 0.9054806	b20+14%	b20+25% b20+10% b20-10% b20-25% a21+25%	0.0022345 0.0024396 0.0047292 0.0115665 0.1311869
a21-7%	a21-10% a21+10% a21-25% a21+25% b20+25%	0.0002782 0.0085447 0.0108661 0.0275876 0.4637245	a21+20%	a21+25% a21+10% a21-10% a21-25% b20-25%	0.0000668 0.0001497 0.0188822 0.0561319 0.0887940
b30+20%	b30+25% b30+10% b30-10% b30-25% a11-25%	0.0003867 0.0017988 0.0192833 0.0522998 0.9085764	b30-7%	b30-10% b30-25% b30+10% b30+25% b20+25%	0.0007567 0.0102027 0.0191490 0.0197732 0.4810271

Результаты проведенных численных экспериментов показали, что предлагаемый алгоритм поиска дефектов в нелинейных системах, использующий изоморфные диагностические модели, может с высокой точностью определять одиночные параметрические дефекты нелинейных САУ. Вероятность определения введенных дефектов для САУ с нелинейностью вида зона нечувствительности составила 93%, а для системы с нелинейностью типа насыщение — 80%. Все ошибки были зарегистрированы внутри набора эталонных дефектов, относящихся к одному параметру. Таким образом, предлагаемый алгоритм позволил со 100% вероятностью определить параметр, в котором был дефект. Также стоит отметить, что малые значения диагностических признаков дефектов, являющихся различными отклонениями для одного и того же параметра, позволяют объединить эти эталонные наборы с целью уменьшения общего количества используемых эталонов без потери достоверности диагностирования.

В качестве оценки эффективности диагностирования дополнительно рассматривалась различимость дефектов, которая выражается в виде разницы между минимальным значением диагностического признака для вектора эталонного дефекта объекта не являющимся искомым и искомым. В среднем различимость дефектов для САУ с нелинейностью вида зона нечувствительности составила 0.0020636, а для САУ с нелинейностью типа насыщение — 0.001933. Полученные значения достаточно малы, но это можно объяснить тем, что

при расчете использовались значения признаков дефектов одного и того же параметра с разной степенью его отклонения. Поэтому дополнительно была рассчитана различимость для параметров, которая выражается в виде разницы между минимальным значением признака для вектора эталонного дефекта параметра не являющимся искомым и искомым. В таком случае средняя различимость для САУ с нелинейностью вида зона нечувствительности составила 0.6077048, а для САУ с нелинейностью типа насыщение — 0.2862066. Данные показатели говорят о том, что при исключении определения направления и степени изменения параметра и диагностировании только наличия дефекта в параметре показатели эффективности алгоритма становятся лучше. По результатам проведенных численных экспериментов видно, что чем больше степень нелинейности в объекте диагностирования, тем меньше вероятность верного определения направления и степени изменения параметра в системе и меньше различимость дефектов.

В работе [14] было рассмотрено применение представленного алгоритма для линейных САУ. Сравнив результаты численных экспериментов по поиску дефектов для аналогичных объектов диагностирования, можно сделать вывод, что предлагаемый алгоритм поиска параметрических дефектов с помощью динамических изоморфных моделей имеет меньшую различимость и вероятность обнаружения дефекта в параметре для динамического объекта, содержащего нелинейные эле-

менты. Это объясняется принципом работы изоморфной модели как аппроксимирующего блока для характеристик рассматриваемого объекта. Но при этом различимость дефектов с учетом направления и степени изменения параметра остаётся примерно на том же уровне.

## Выводы

В представленной работе рассмотрен алгоритм поиска одиночных параметрических дефектов непрерывных нелинейных САУ с помощью динамических изоморфных моделей, построенных на фильтрах Лагерра только с рекурсивной частью. Были рассмотрены два вида нелинейности: зона нечувствительности и насыщение. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что предложенный в данной работе алгоритм позволил определить все параметры, в которые вводились дефекты. При этом обеспечивается хорошая различимость для параметров, но определить направление и степень изменения параметра удается с меньшей различимостью и вероятностью. Но, с дру-

гой стороны, эта особенность является положительной чертой, так как многие методы диагностирования дефектов не позволяют выявить направление изменения конкретного параметра в объекте. В качестве рекомендации можно предложить объединить эталонные векторы дефектов для одного параметра за счет схожести их диагностических признаков, тем самым уменьшив количество векторов и возникающих ошибок диагностирования.

К общим преимуществам предлагаемого алгоритма, как для линейных САУ, так и содержащих нелинейные элементы, относится то, что для проведения процедуры настройки динамической изоморфной модели нет необходимости в знаниях о точном строении объекта диагностирования. Это позволяет снизить зависимость от большой априорно известной информации об объекте. Также ввиду того, что все процедуры настройки проводятся экспериментальными методами нет необходимости в проведении сложных расчетов при построении диагностической модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Iserman R. Fault-Diagnosis Application. Springer, 2011.
2. Шумский А.Е., Жирабок А.Н. Принятие решений при диагностировании нелинейных динамических систем непараметрическим методом. Автоматика и телемеханика. 2021. № 2. С. 111–131.
3. Cheng C., Chen T. Robust adaptive diagnostic observers design for actuator fault dynamic systems. 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), Taichung, 2014. P. 360–364.
4. Sayed-Mouchaweh M. Fault Diagnosis of Hybrid Dynamic and Complex Systems. Springer, 2018.
5. Voronin V.V., Davydov O.A. Local Area Network Failures Types, Consequences and Criticality Analysis. Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC), 2017. P. 184–187.
6. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRS Press, Boca Raton, 2019.
7. Бобышев В.В. Алгоритмы и программные средства диагностирования систем автоматического управления на основе теории чувствительности: дис. канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2002. 146 с.
8. Степаненко М.А. Разработка моделей и алгоритмов оптимизации процедур диагностирования на граф-моделях технических систем: дис. канд. техн. наук. Нижегородский гос. техн. ун-т, Нижний Новгород, 2007. 198 с.
9. Korablev Y u.A. Diagnostic system based on bank of fuzzy models. 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Publisher: IEEE., 2017, pp. 363–365.
10. Шалобанов С.С. Методы и алгоритмы поиска дефектов в системах автоматического управления на основе моделей дефектов: дис. канд. техн. наук. Тихоокеанский гос. ун-т, Хабаровск, 2013. 166 с.
11. Patton R.J., Frank P.M., Clark R.N. Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Springer, 2000.
12. Bloschinskiy V.D., Shalobanov S.V. Finding Parametric Defects in Continuous Dynamic Objects Using Isomorphic Models on IIR Filters and Laguerre Filters. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Publisher: IEEE, 2020, P. 1–5.
13. Блощинский В.Д., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Алгоритм поиска параметрических дефектов в непрерывных САУ с помощью настраиваемых моделей на фильтрах Лагерра. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2021. № 7. С. 50–54.
14. Блощинский В.Д., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Применение настраиваемых моделей на фильтрах Лагерра для поиска параметрических дефектов в непрерывных САУ. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2022. № 1–2. С. 12–17.

© Блощинский Владислав Дмитриевич (vladkms94@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»