

ПРИМЕНЕНИЕ НАСТРАИВАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФИЛЬТРАХ ЛАГЕРРА ДЛЯ ПОИСКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В НЕПРЕРЫВНЫХ САУ¹

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

**V. Bloschinskiy
S. Shalobanov
S. Shalobanov**

Summary. The paper considers an algorithm using configurable diagnostic models based on Laguerre filters with only a recursive part for finding parametric defects in continuous automatic control systems. A comparison is made of two approaches to configuring models: combined and individual, in relation to the choice of model parameters for each control point in the diagnostic object. Numerical experiments were carried out to configure the diagnostic models, select sets of vectors of reference defect technical states of the diagnostic object, and diagnose introduced defects by calculating the distinguishability by diagnostic features. The accuracy of the algorithm as a whole and the effectiveness of configuring approaches for various diagnostic object are estimated. All numerical experiments and simulations were carried out in a software package developed in the Scilab/Xcos environment.

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

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

Шалобанов Сергей Викторович
Д.т.н, профессор, Тихоокеанский государственный
университет, Хабаровск
shalobanov@mail.ru

Шалобанов Сергей Сергеевич
К.т.н, доцент, Тихоокеанский государственный
университет, Хабаровск
shalobanov_ne@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается алгоритм, использующий настраиваемые диагностические модели, основанные на фильтрах Лагерра только с рекурсивной частью, для поиска параметрических дефектов в непрерывных системах автоматического управления. Проводится сравнение двух подходов к настройке моделей: совместный и индивидуальный, по отношению к выбору параметров моделей для каждой контрольной точки в объекте диагностирования. Проведены численные эксперименты по настройке диагностических моделей, выбору наборов векторов эталонных дефектных технических состояний объекта диагностирования и диагностированию вводимых дефектов с помощью расчета различимости по диагностическим признакам. Дана оценка точности алгоритма в целом и эффективности подходов настройки для различных объектов диагностирования. Все численные эксперименты и моделирование проводились в программном комплексе, разработанном в среде Scilab/Xcos.

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

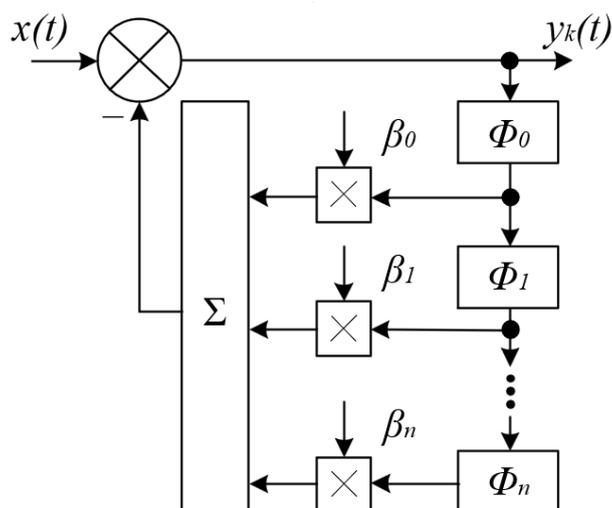
Введение

На сегодняшний день техническая диагностика и идентификация систем автоматического управления (САУ) является активно развивающимся направлением ввиду высоких требований к обеспечению надежности и качества таких систем. В таком ключе задачи разработки и исследования алгоритмов диагностирования [1–4] играют важную роль в вопросах построения высокоэффективных технологий диа-

гностического обеспечения САУ. Широкое распространение в диагностировании технического состояния систем автоматического управления получили классические типы математических моделей, которые являются предметом исследований теории идентификации [5–7].

Данная работа является продолжением исследовательских работ [8, 9], где для поиска параметрических дефектов в САУ рассматривалось применение динами-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-1616.2020.8


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

ческих изоморфных моделей, построенных на двух видах фильтров: на элементах задержки и на основе функций Лагерра. Описанный алгоритм построен на идее объединения методов диагностики и идентификации. По результатам проведенных численных экспериментов было определено, что лучшие результаты диагностирования обеспечивают модели на фильтрах Лагерра. Были рассмотрены различные способы построения фильтров: включение в обратную связь, в прямой цепи, а также представление в канонической форме. Каноническая форма обеспечивает немного лучшие показатели качества диагностирования, но увеличивает сложность настройки самой диагностической модели. Поэтому в данной работе рассмотрим построение фильтров, включенных в обратную связь. В предыдущих работах настройка диагностических моделей проводилась одинаково для каждой контрольной точки, то есть соответствующие внутренние параметры моделей были равны между собой. Цель данной работы — рассмотрение индивидуальной настройки изоморфной диагностической модели для каждой выбранной контрольной точки в объекте диагностирования и определение возможных преимуществ и недостатков такого подхода. Идея исходит из того, что каждая контрольная точка имеет отличные от других показатели переходных характеристик.

Описание алгоритма

В работе рассматриваются изоморфные динамические модели, построенные на основе фильтров Лагерра, в которых используется только рекурсивная часть. Подобные модели уже были рассмотрены в [8]. На рисунке 1 представлен общий вид модели для n базисных функций фильтра $\Phi_i(t)$. На рисунке обозначены: $x(t)$ —

диагностический сигнал, подаваемый на вход модели и объекта; $y_k(t)$ — выходной сигнал диагностической 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 $\Phi_i(t)$.

Система передаточных базисных функций фильтра реализуется с помощью ортогональных функций Лагерра, которые в области преобразования Лапласа имеют следующие изображения:

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

где b — характеристический коэффициент функций Лагерра; Φ_0 — передаточная функция первого звена фильтра; Φ_i — передаточные функции последующих звеньев.

Контуры самонастройки коэффициентов β_i строятся по градиентному методу, где в качестве критерия близости сигналов контрольных точек объекта и диагностических моделей используется квадрат их разности. Расчет коэффициентов в каждом контуре настройки осуществляется согласно следующему выражению:

$$\beta_i(t) = -a \int_0^t e(t) u_i(t) dt,$$

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

Поиск параметрического дефекта объекта диагностирования осуществляется при помощи сравнения полученного вектора параметров текущего состояния

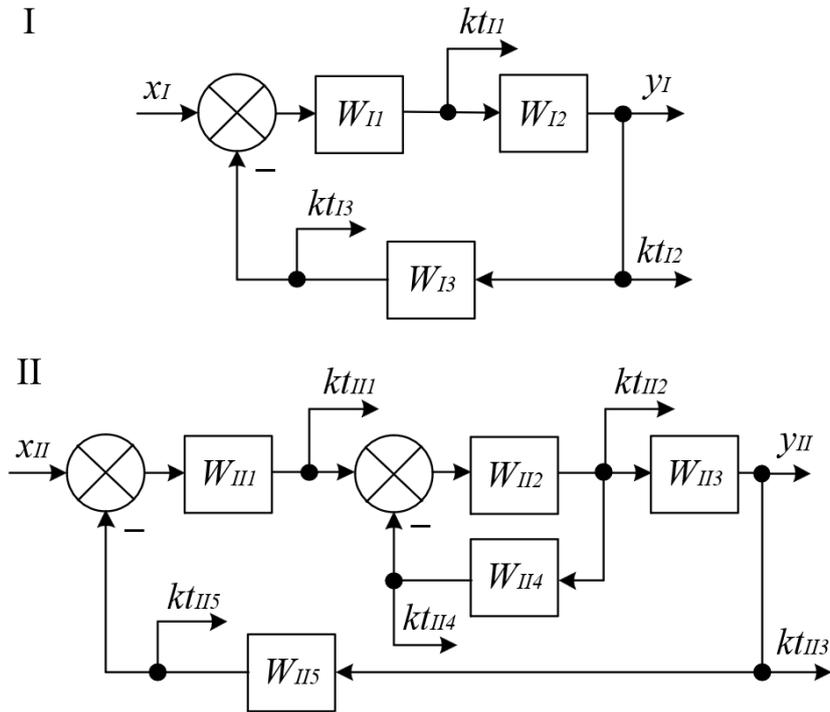


Рис. 2. Структуры рассматриваемых объектов диагностирования

объекта с набором векторов параметров эталонных дефектов, полученных предварительно при настройке диагностической модели. Векторы состоят из значений коэффициентов β_j , которые описывают одно из возможных состояний объекта. В правильно настроенной модели эти коэффициенты, за определенное время настройки, стремятся к константе, что и позволяет использовать их в качестве координат-параметров векторов при описании технического состояния объекта диагностирования. Для сравнения векторов определяется их близость друг к другу с помощью расчета диагностических признаков дефектов, которые определяются согласно выражению [9]:

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

где Y — вектор параметров текущего технического состояния объекта диагностирования; Z_j — вектор эталонных параметров для j -ого рассматриваемого дефекта; N — вектор параметров исправного состояния объекта диагностирования. Все три вектора составляются из совокупности коэффициентов β_j диагностических моделей для каждой используемой контрольной точки. Значения диагностического 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

Для проведения экспериментов по настройке, диагностированию и проверке работоспособности рассматриваемого алгоритма в работе используется среда блочного моделирования Scilab/Xcos. Были рассмотрены две структуры САУ, отличающиеся количеством динамических блоков и сложностью построения. Обе структуры (I и II) показаны на рисунке 2, где обозначены следующие виды сигналов объекта: x_I и x_{II} — входные сигналы, y_I и y_{II} — выходные сигналы, $kt_{I1} \dots kt_{I5}$ — сигналы с выбранных контрольных точек.

Контрольные точки в двух рассматриваемых объектах установлены после каждого динамического блока. Для каждой контрольной точки строится изоморфная модель согласно рисунку 1.

Динамические блоки « W_{I1} » ... « W_{II5} » в двух объектах реализуют передаточные функции согласно следующим выражениям:

$$W_{I1}(s) = \frac{b_{I10}}{a_{I11}s + 1} = \frac{1}{0.1s + 1},$$

$$W_{II1}(s) = \frac{b_{II1}s + b_{II0}}{a_{II1}s} = \frac{200s + 100}{s},$$

$$W_{I2}(s) = \frac{b_{I20}}{a_{I21}s + 1} = \frac{2}{2s + 1},$$

$$W_{II2}(s) = \frac{b_{II20}}{a_{II22}s^2 + a_{II21}s + 1} = \frac{0.2}{2s^2 + 4s + 1},$$

$$W_{I3}(s) = b_{I30} = 1,$$

$$W_{II3}(s) = \frac{b_{II30}}{a_{II31}s + 1} = \frac{1}{0.2s + 1},$$

$$W_{II4}(s) = \frac{b_{II40}}{a_{II41}s} = \frac{0.2}{s},$$

$$W_{II5}(s) = \frac{b_{II50}}{a_{II52}s^2 + a_{II51}s + 1} = \frac{0.02}{0.1s^2 + 0.1s + 1}.$$

При настройке диагностических моделей и проведении диагностирования коэффициенты β_i не всегда стремятся к определенным установившимся значениям, а могут совершать небольшие колебания вокруг некоторого постоянного значения. Поэтому конечные значения коэффициентов, которые далее будут использоваться в векторах состояния объекта, рассчитываются по среднему значению последних 10% отсчетов.

В предыдущих работах [8, 9] настройка изоморфных моделей проводилась совместно для всех моделей, подсоединенных к контрольным точкам. В данной работе рассматривается два подхода к настройке: совместный и индивидуальный, в котором параметры изоморфных моделей выбираются отдельно для каждой модели. Индивидуальный подход заключается в том, что настройка происходит относительно переходных характеристик объекта, получаемых для различных контрольных точек. Общий подход к выбору параметров диагностической модели базируется на следующих принципах. Параметр N — количество используемых базисных функций в фильтрах, определяется относительно порядка передаточной функции объекта и выбирается равным ему или большим. Параметр b — характеристический коэффициент функций Лагерра, определяющий быстродействие фильтров, выбирается так, чтобы переходные характеристики звеньев фильтра примерно соответствовали переходной характеристике объекта. Параметр a — изменяемый коэффициент в контурах самонастройки, влияющий на общую скорость работы и реакцию модели, определяется экспериментально. При настройке важно обращать внимание на время, за которое проходит настройка, и поведение функций $\beta_i(t)$, так как необходимо, чтобы к концу времени настройки значение функций стремилось к константе. Таким образом, для условий совместной настройки изоморфных моделей для объектов I и II, были выбраны следующие параметры:

$$kt_{I1}, kt_{I2}, kt_{I3}: \quad N_I = 3, \quad b_I = 2.1, \quad a_I = 30.$$

$$kt_{II1}, kt_{II2}, kt_{II3}, kt_{II4}, kt_{II5}: \quad N_{II} = 5, \quad b_{II} = 0.7, \quad a_{II} = 6.$$

Для условий индивидуальной настройки были выбраны следующие параметры:

$$kt_{I1}: \quad N_{I1} = 3, \quad b_{I1} = 2.1, \quad a_{I1} = 15.$$

$$kt_{I2}: \quad N_{I2} = 3, \quad b_{I2} = 2.3, \quad a_{I2} = 3.$$

$$kt_{I3}: \quad N_{I3} = 3, \quad b_{I3} = 2.3, \quad a_{I3} = 3.$$

$$kt_{II1}: \quad N_{II1} = 5, \quad b_{II1} = 1, \quad a_{II1} = 0.005.$$

$$kt_{II2}: \quad N_{II2} = 5, \quad b_{II2} = 0.7, \quad a_{II2} = 0.09.$$

$$kt_{II3}: \quad N_{II3} = 5, \quad b_{II3} = 0.7, \quad a_{II3} = 0.1.$$

$$kt_{II4}: \quad N_{II4} = 5, \quad b_{II4} = 2.1, \quad a_{II4} = 1.$$

$$kt_{II5}: \quad N_{II5} = 5, \quad b_{II5} = 0.7, \quad a_{II5} = 12.$$

Время настройки диагностических моделей, определяющееся по времени, которое требуется функциям коэффициентов $\beta_i(t)$ для достижения установившихся значений, получилось следующим: для модели I при совместной настройке — 40, при индивидуальной настройке — 25, а для модели II — 45 и 35, соответственно. Таким образом, настраивая модели отдельно друг от друга для каждой контрольной точки, мы можем получить выигрыш во времени, которое потребуется для диагностирования дефектов, по сравнению с совместной настройкой. Но при этом незначительно увеличивается сложность первоначального определения параметров моделей, за счет увеличения их количества.

Для исследования возможностей определения параметрических дефектов были определены наборы векторов эталонных дефектных технических состояний рассматриваемых объектов. Было составлено четыре набора, то есть по два набора для каждого объекта диагностирования, в которых один набор составлен для моделей, настраиваемых совместно, второй — для индивидуальной настройки. Наборы для объекта I состоят из 20 векторов для отклонения значений каждого из параметров на $\pm 10\%$ и $\pm 25\%$, а для объекта II — аналогично для 52 векторов. Для последующего сравнительного анализа алгоритмов для двух видов настройки моделей рассматривались отклонения параметров на $\pm 7\%$, $\pm 14\%$ и $\pm 20\%$. Результаты проведенного диагностирования представлены в таблице 1. Для сокращения представляемых результатов в таблице приведена только часть рассмотренных дефектов и сокращен список значений диагностических признаков.

Проведенные численные эксперименты показали, что предлагаемый алгоритм, использующий изоморфные диагностические модели, может с достаточной точностью диагностировать параметрические дефекты в САУ. Малые значения диагностических признаков, по-

Таблица 1. Результаты диагностирования

Объект диагностирования I			Объект диагностирования II		
Введенный дефект	Эталонный дефект	Диагностический признак	Введенный дефект	Эталонный дефект	Диагностический признак
Совместная настройка					
$b_{II0}-7\%$	$b_{II0}-10\%$	0.0000365	$a_{II22}-7\%$	$a_{II22}-10\%$	0.0000577
	$b_{II0}+10\%$	0.0010193		$a_{II22}+10\%$	0.0014175
	$b_{II0}-25\%$	0.0014191		$a_{II22}-25\%$	0.0019357
	$b_{II0}+25\%$	0.0032697		$a_{II22}+25\%$	0.0046441
	$b_{I20}-25\%$	0.623129		$b_{III}-25\%$	0.1535641
$a_{I21}-20\%$	$a_{I21}-25\%$	0.0011537	$b_{II40}-20\%$	$a_{II41}+25\%$	0.0000001
	$a_{I21}-10\%$	0.004248		$b_{II40}-25\%$	0.0003316
	$a_{I21}+10\%$	0.033318		$b_{II40}-10\%$	0.0010808
	$a_{I21}+25\%$	0.0669323		$a_{II41}+10\%$	0.0012734
	$b_{I20}+25\%$	0.5169377		$b_{II40}+10\%$	0.0076576
Индивидуальная настройка					
$a_{III}+20\%$	$a_{III}-25\%$	0.0000052	$a_{III1}+14\%$	$a_{III1}+10\%$	0.0000441
	$a_{III}-10\%$	0.0000189		$a_{III1}+25\%$	0.0003274
	$a_{III}+10\%$	0.0001533		$a_{III1}-10\%$	0.001617
	$a_{III}+25\%$	0.0003162		$a_{III1}-25\%$	0.0043227
	$b_{I30}+25\%$	0.8608269		$a_{II51}+25\%$	0.294881
$b_{I30}+14\%$	$b_{I30}+10\%$	0.0002551	$a_{II52}+20\%$	$a_{II52}+25\%$	0.0022166
	$b_{I30}+25\%$	0.001576		$a_{II52}+10\%$	0.0089731
	$b_{I30}-10\%$	0.0119863		$a_{II52}-10\%$	0.0697572
	$b_{I30}-25\%$	0.0378941		$a_{II52}-25\%$	0.1193561
	$a_{III}-25\%$	0.87464		$a_{III}+25\%$	0.8833308

лученные для различных величин отклонения одного и того же параметра, позволяют уменьшить количество используемых эталонов без потери достоверности диагностирования. Вероятность определения введенных параметрических дефектов для модели I составила 100%, а для модели II — 90% как для случая совместной настройки моделей, так и для индивидуальной. Все ошибки определения в модели II относились к блоку « W_{II4} », то есть ошибка не выходила за пределы блочного дефекта. Данный блок можно считать сложно диагностируемым, так как находится в обратной связи цепи, которая также охвачена обратной связью.

Дополнительно для оценки эффективности диагностирования вычислялась различимость дефектов, за которую была принята разница между минимальным значением диагностического признака для вектора эталонного дефекта объекта не являющимся искомым и искомым. Средняя различимость для объекта I для случая совместной настройки составила 0.0023978, а для случая индивидуальной настройки — 0.0021228, для объекта II — 0.001607 и 0.0032948 соответственно. Для объекта II также была отдельно рассчитана различимость только для ошибочных случаев, которая составила -0.0001351 и -0.0004591, соответственно для совместной и индивидуальной настройки. Различимость

для ошибочных случаев на порядок меньше средней общей различимости. Это говорит о том, что эталонные векторы дефектов очень схожи. Для нивелирования данной ошибки можно увеличить количество используемых базисных блоков в фильтрах (N), что увеличит размерность получаемых векторов и пространства рассматриваемых параметров-координат, что позволит точнее задавать эталоны. Из рассчитанных значений общей различимости можно сделать вывод, что для объекта I использование индивидуальной настройки практически не будет иметь значения для точности диагностирования, когда для объекта II различимость дефектов заметно улучшилась. При этом, для двух объектов использование индивидуальной настройки уменьшает время, необходимое для диагностирования.

Для дополнительной оценки эффективности алгоритма была рассчитана различимость для параметров, то есть разница между минимальным значением признака для вектора эталонного дефекта параметра не являющимся искомым и искомым. Средняя различимость параметра для объекта I для случая совместной настройки составила 0.6300558, а для случая индивидуальной настройки — 0.5957109, для объекта II — 0.256353 и 0.2589577 соответственно. Это говорит о гораздо лучших показателях эффективности алгоритма

ма, если исключить определение направления и степени изменения параметра, а диагностировать только наличие дефекта в параметре.

Выводы

В данной работе был рассмотрен алгоритм для диагностирования одиночных параметрических дефектов непрерывных САУ с помощью динамических изоморфных моделей, построенных на фильтрах Лагерра только с рекурсивной частью. Были рассмотрены два подхода к настройке диагностических моделей: совместный, когда соответствующие параметры диагностических моделей для каждой контрольной точки объекта диагностирования выбираются равными друг другу, и индивидуальный, в котором параметры изоморфных моделей выбираются отдельно для каждой модели. По результатам анализа проведенных численных экспериментов был сделан вывод о том, что предложенный в данной работе алгоритм в целом обеспечивает хорошую различимость параметрических дефектов и с малыми значениями различимости позволяет определять направление и степень изменения параметра объекта диагностирования. Это является положительной отличительной чертой, так как не все существующие методы диагностирования дефектов САУ позволяют выявить направление изменения конкретного параметра в объекте. Также было установлено, что использование индивидуальной настройки изоморфных моделей оправдывают себя для структурно сложных объектов с различной динамикой блоков, из которых он состоит.

Это объясняется тем, что при совместной настройке получаются одинаковые фильтры с переходными характеристиками, которые в среднем соответствуют сразу всем контрольным точкам объекта, когда при индивидуальной настройке получаются фильтры, обеспечивающие соответствующую реакцию моделей для конкретной переходной характеристики контрольной точки. При этом увеличивается сложность первоначальной настройки моделей за счет увеличения количества настраиваемых параметров, но достигается меньшее время, необходимое для работы моделей и последующего диагностирования, по сравнению с совместной настройкой. Стоит отметить, что, как и в работах [8, 9], также существует возможность уменьшения количества эталонных векторов дефектов в наборах, за счет схожести некоторых признаков дефектов для одного параметра.

Общим преимуществом предлагаемого алгоритма является то, что для проведения процедуры настройки изоморфной модели нет необходимости в точных знаниях о строении объекта диагностирования. Таким образом отсутствует зависимость от большой априорно известной информации об объекте. Также к положительным сторонам рассматриваемой методики можно отнести отсутствие необходимости сложных расчетов для построения изоморфной динамической модели, за счет того, что все процедуры настройки проводятся экспериментальными методами для заведомо исправного объекта диагностирования. Этот факт позволяет исключить ошибки, связанные с неадекватностью используемой 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. 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.
5. Sayed-Mouchaweh M. Fault Diagnosis of Hybrid Dynamic and Complex Systems. Springer, 2018.
6. Patton R.J., Frank P.M., Clark R.N. Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Springer, 2000.
7. Rosenwasser E.N., Yusupov R.M. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRS Press, Boca Raton, 2019.
8. Bloshchinskiy 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.
9. 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.

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

Шалобанов Сергей Викторович (shalobanov@mail.ru), Шалобанов Сергей Сергеевич (shalobanov_ne@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»