

# ВЛИЯНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗОМОРФНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА РАЗЛИЧИМОСТЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В НЕПРЕРЫВНЫХ САУ

**Блощинский Владислав Дмитриевич**

Соискатель, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск  
vladkms94@mail.ru

**Шалобанов Сергей Викторович**

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

THE EFFECT OF ISOMORPHIC DYNAMIC MODELS' STABILITY ON THE DISTINGUISHABILITY OF PARAMETRIC DEFECTS IN CONTINUOUS ACS

**V. Bloschinskiy  
S. Shalobanov**

*Summary.* The paper presents an algorithm for diagnosing parametric defects in continuous automatic control systems based on configurable isomorphic diagnostic models. The influence of model stability on the ability to identify defects in the selected diagnostic object is considered. The results of determining the sets of vectors for the reference defective technical conditions of the diagnostic object and diagnosis of introduced defects by calculating the diagnostic signs distinguishability are presented. The efficiency of the algorithm was evaluated on five considered models with different stability, which showed a direct dependence of the diagnostic accuracy on the amplitude stability margin.

*Keywords:* parametric defect, automatic control system, diagnostic object, diagnostic sign, Laguerre filter, configurable model, stability, stability margin.

*Аннотация.* В работе представлен алгоритм для диагностирования параметрических дефектов в непрерывных системах автоматического управления, основанный на настраиваемых изоморфных диагностических моделях. Рассмотрено влияние устойчивости модели на способность определять дефекты в выбранном объекте диагностирования. Представлены результаты определения наборов векторов эталонных дефектных технических состояний объекта диагностирования и диагностирования вводимых дефектов путем расчета различимости по диагностическим признакам. Проведена оценка эффективности работы алгоритма на пяти рассматриваемых моделях с различной устойчивостью, которая показала прямую зависимость точности диагностирования от запаса устойчивости по амплитуде.

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

## Введение

На сегодняшний день обеспечение надежности систем автоматического управления (САУ) становится все более важной задачей ввиду большего усложнения объектов управления. На фоне этого активно развиваются направления технической диагностики и идентификации САУ для обеспечения высоких требований к надежности и качеству таких систем. Поэтому решение задач по разработке и исследованию алгоритмов диагностирования [1–4] играет важную роль в вопросах построения высокоэффективных технологий диагностического обеспечения САУ. В данной области широкое распространение получили классические типы математических моделей, являющиеся предметом исследований теории идентификации [5–7] и реализующиеся как с помощью графоаналитического описания с использованием структурных схем, так и путем описания их в пространстве состояний.

Данная работа предлагается как логическое продолжение исследовательской деятельности, описанной в работах [8–10], где для поиска параметрических дефек-

тов в САУ использовались динамические изоморфные модели, построенные на двух видах звеньев: на элементах задержки и на основе функций Лагерра. Рассматривалось три вида построения: с включением звеньев только в прямой цепи, с включением звеньев только в обратную связь, а также представление в канонической форме. Уже было исследовано влияние на диагностические способности модели двух типов входных тестовых сигналов: «ступень» и синусоидальный. Рассматривались два вида настройки внутренних параметров моделей: совместный для каждой контрольной точки, когда соответствующие внутренние параметры моделей были равны между собой, и индивидуальный, когда настройка ведется отдельно для каждой контрольной точки.

Идея представляемого алгоритма построена на объединении методов диагностики и идентификации. Она состоит в том, что динамические изоморфные модели могут подстраиваться под динамику исследуемого объекта диагностирования, а ее внутренние параметры служат как описание его технического состояния. Таким образом, имея несколько эталонных дефектных технических состояний, выраженных как совокупность внутрен-

них параметров используемой модели, можно сделать вывод о том, насколько близко текущее техническое состояние объекта к одному из дефектных. По результатам проведенных ранее численных экспериментов было определено, что лучшие результаты диагностирования обеспечивают модели, построенные на звеньях Лагерра, включенных в обратную связь. При этом, более трудозатратный и наиболее точный индивидуальный вид настройки внутренних параметров изоморфной модели будет оправдывать себя для структурно сложных объектов с различной динамикой блоков. Поэтому в данной работе будет рассмотрена модель на звеньях Лагерра, включенных в обратную связь, с совместной настройкой параметров для каждой контрольной точки.

В предыдущих работах не учитывалась устойчивость уже настроенных динамических изоморфных моделей при диагностике дефектов САУ, так как вся настройка проходит эмпирическим способом. Цель данной работы — рассмотреть влияние устойчивости модели на способность определять параметрические и структурные дефекты в выбранном объекте диагностирования и определить возможные зависимости точности диагностирования от устойчивости, то есть от правильности выбора внутренних параметров изоморфной модели.

**Описание алгоритма**

В данной работе для исследования выбрана изоморфная динамическая модель, построенная на основе звеньев Лагерра, включенных в обратную связь. Реализация такой модели уже была рассмотрена в работах [8–10]. Общий вид построения диагностической модели представлен на рисунке 1, где обозначены следующие элементы:  $x(t)$  — 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  $\Phi_i(t)$ .

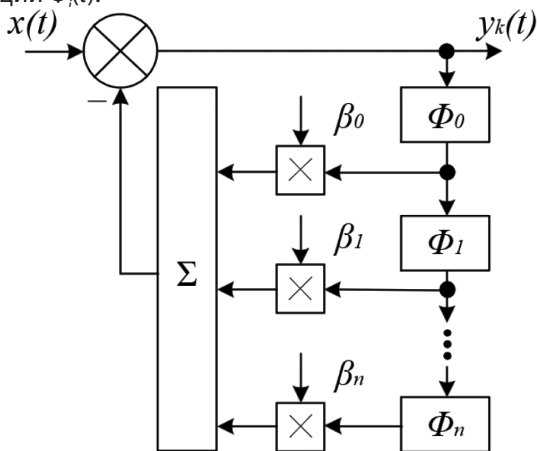


Рис. 1. Структура диагностической модели для  $k$ -ой контрольной точки

В качестве передаточных базисных функций используются ортогональные функции Лагерра, которые в области преобразования Лапласа имеют следующие изображения:

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

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

Самонастраивающиеся коэффициенты  $\beta_i$  берутся из контуров, построенных по градиентному методу. Каждый контур зависит от двух функций: функции выходного сигнала блока  $i$ -го звена и функции критерия близости выходных сигналов контрольной точки объекта и диагностической модели, которая в данной работе принята как квадрат их разности. Таким образом, 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.

Алгоритм определения дефекта объекта диагностирования основан на сравнении вектора параметров текущего состояния объекта с набором векторов параметров эталонных дефектов, полученных предварительно при настройке диагностической модели. В качестве координат для каждого вектора используются значения коэффициентов  $\beta_j$ , которые описывают одно из возможных состояний объекта. В правильно настроенной диагностической модели, т.е. той, в которой верно подобраны сочетания ее внутренних параметров (количество базисных функций, их характеристические коэффициенты и изменяемый коэффициент контуров самонастройки), коэффициенты  $\beta_j$  стремятся к константе за определенное время настройки. Этот факт позволяет использовать их в качестве координат-параметров векторов при описании технического состояния объекта диагностирования. Сравнение векторов друг с другом проходит путем определения их близости друг к другу с помощью расчета диагностических признаков дефектов, которые определяются согласно выражению [10]:

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

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. Каждый из описанных векторов составляется из совокупности коэффициентов  $\beta_i$  всех диагностических моделей, которые используются для контрольных точек. 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

В данной работе для проведения всех численных экспериментов, включающих настройку изоморфной диагностической модели, диагностирование тестовых дефектов и проверку работоспособности рассматриваемого алгоритма, используется пакет прикладных математических программ Scilab и среда блочного моделирования Scilab/Xcos.

В качестве объекта диагностирования для проведения исследований была выбрана САУ в типовом представлении — объект управления и регулятор, охваченные обратной связью. Данная структура, показанная на рисунке 2, состоит из трех блоков: два блока соединены последовательно, а третий находится в общей отрицательной обратной связи. На рисунке также введены следующие обозначения:  $x$  — входной сигнал объекта диагностирования,  $y$  — выходной сигнал объекта диагностирования,  $kt_1 \dots kt_3$  — сигналы с выбранных контрольных точек,  $W_1 \dots W_3$  — блоки.

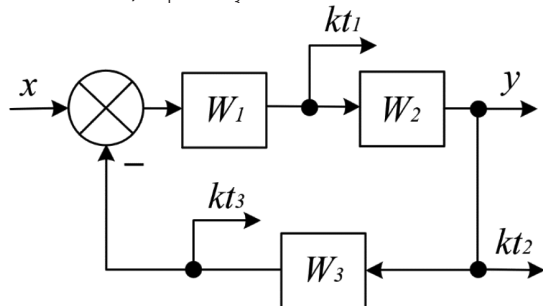


Рис. 2. Структура рассматриваемого объекта диагностирования

Динамические изоморфные модели строятся для каждой контрольной точки объекта согласно рисунку 1. В качестве сигналов с контрольных точек выбраны выходные сигналы с динамических блоков, реализующих передаточные функции согласно следующим выражениям:

$$W_1(s) = \frac{b_{110}}{a_{111}s + 1} = \frac{1}{0.1s + 1},$$

$$W_2(s) = \frac{b_{120}}{a_{121}s + 1} = \frac{2}{2s + 1},$$

$$W_3(s) = b_{130} = 1.$$

Во время проведения процедур настройки изоморфных моделей, а также во время диагностирования коэф-

фициенты  $\beta_i$  не всегда могут принимать определенное установившееся значение, а могут совершать небольшие колебания вокруг некоторого постоянного значения. Поэтому для расчета конечных значений коэффициентов, которые далее будут использоваться в качестве координат векторов технических состояний исследуемого объекта, используется усреднение по значениям последних 10 % отсчетов.

В данной работе используется совместный вариант настройки динамических моделей. В данном случае внутренние параметры моделей соответственно равны между собой. Настройка проводится эмпирическим методом, но в ходе проведения предыдущих работ [9–10] уже были предложены принципы предварительного выбора параметров, которые бы обеспечивали удовлетворительную настройку. Предлагается использовать общий подход к выбору внутренних параметров диагностических моделей, который базируется на следующих принципах. Параметр  $n$  — количество используемых звеньев (базисных функций) можно определить относительно порядка передаточной функции объекта и выбирать равным ему или большим. Параметр  $b$  — характеристический коэффициент функций Лагерра, который определяет быстродействие всех звеньев, лучше выбирать таким, чтобы общие переходные характеристики звеньев примерно соответствовали переходной характеристике объекта диагностирования. Параметр  $a$  — изменяемый коэффициент в контурах самонастройки, который влияет на общую скорость работы и реакцию диагностической модели, лучше определять экспериментально. Также, во время проведения настройки, важно обращать внимание на поведение функций  $\beta_i(t)$ , так как необходимо, чтобы значение функций стремилось к константе к концу времени, за которое проходит настройка. Исходя из этого, для выбранного объекта диагностирования и формы построения диагностической изоморфной модели, были выбраны следующие параметры:

$$n = 3, b = 2.1, a = 30.$$

Для исследования влияния устойчивости модели на способность определять параметрические и структурные дефекты необходимо также рассмотреть варианты настройки, которые были бы менее (или более) устойчивыми во время проведения процедур диагностирования. Поэтому дополнительно рассмотрим еще четыре варианта настройки диагностической модели, которые будут отличаться от изначального по значению параметров  $b$  и  $a$ . Для дальнейших исследований были выбраны параметры моделей, помеченных индексами «b2.9», «b3.3», «a40» и «a60»:

$$\begin{aligned}
 n_{b_{2.9}} &= 3, & n_{b_{2.9}} &= 2.9, & a_{b_{2.9}} &= 30, \\
 n_{b_{3.3}} &= 3, & b_{b_{3.3}} &= 3.3, & a_{b_{3.3}} &= 30, \\
 n_{a_{40}} &= 3, & b_{a_{40}} &= 2.1, & a_{a_{40}} &= 40, \\
 n_{a_{60}} &= 3, & b_{a_{60}} &= 2.1, & a_{a_{60}} &= 60.
 \end{aligned}$$

Достаточное время настройки диагностических моделей для пяти наборов внутренних параметров, определяющееся по времени, которое требуется функциям коэффициентов  $\beta_i(t)$  для достижения установившихся значений, получилось примерно равным 80.

Для определения устойчивости динамической системы и его запаса применяют критерии устойчивости, которые можно разделить на два вида: алгебраические критерии (Рауса, Гурвица) и частотные (Михайлова, Найквиста). Но для применения таких критериев необходи-

мо явное выражение характеристического уравнения системы, то есть все переменные должны быть явно определены. В нашем случае, в динамической изоморфной модели, присутствуют изменяемые со временем коэффициенты  $\beta_i(t)$ , что дает изменение переходных характеристик во времени. Поэтому напрямую использовать расчет критериев невозможно. Для решения такой проблемы используют принцип замороженных коэффициентов, который применяется в тех случаях, когда линейная система с переменными параметрами работает только в течение ограниченного интервала времени. В нашем случае данный интервал ограничен временем настройки модели, которое было определено ранее. В соответствии с принципом замороженных коэффициентов, для некоторого фиксированного времени определяют соответствующие ему значения перемен-

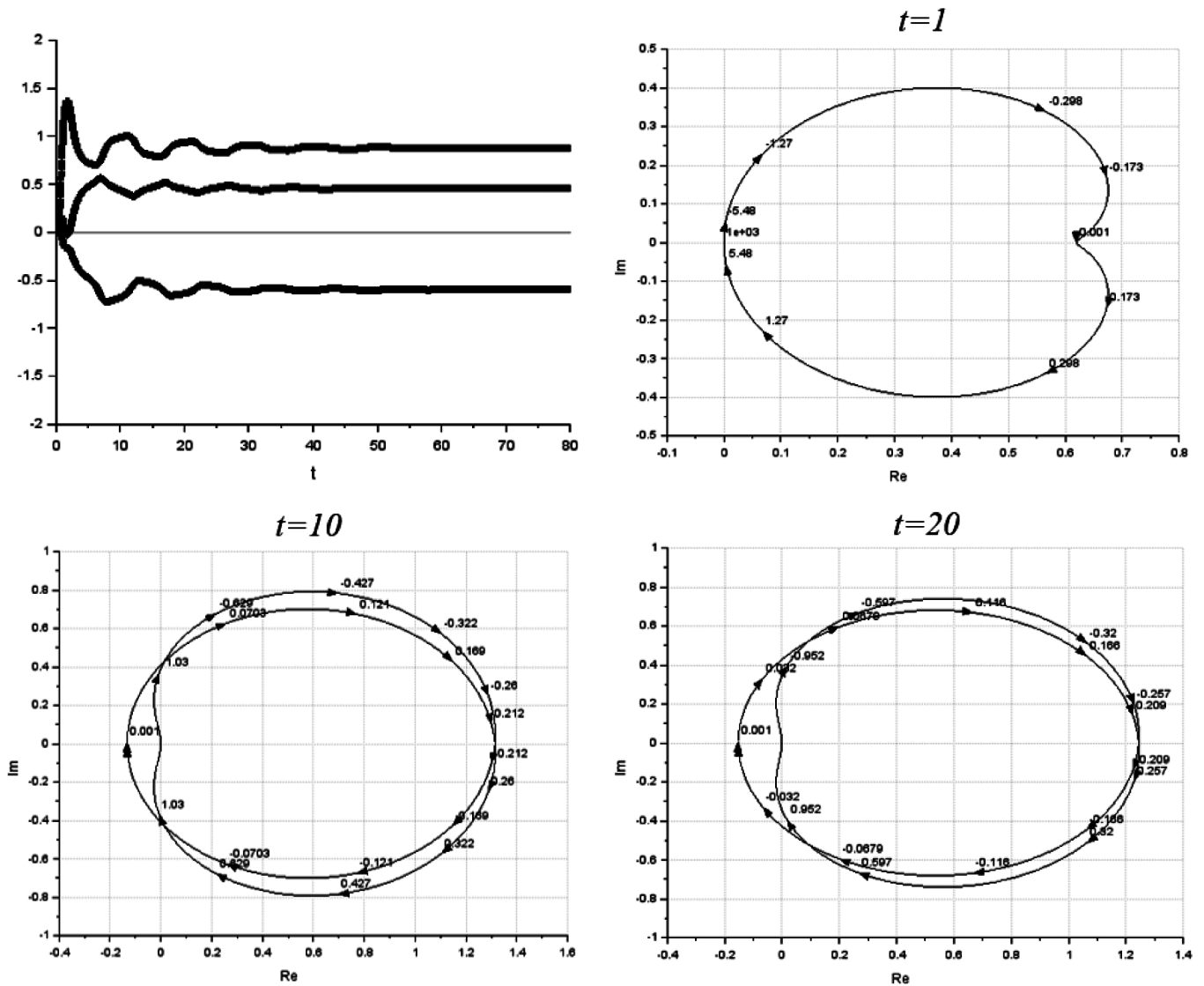


Рис. 3. Пример определения устойчивости исходной модели для контрольной точки  $kt_2$ . Слева сверху — график настройки коэффициентов  $\beta_i(t)$ , справа сверху — диаграмма Найквиста для набора в момент времени равным 1, слева внизу — диаграмма Найквиста для в момент времени равным 10, справа внизу — диаграмма Найквиста для набора в момент времени равным 20



ных коэффициентов, затем заменяют исходную систему некоторой фиктивной стационарной, в которой переменные коэффициенты заменены на выбранные значения, и исследуют её устойчивость по любому критерию. Затем проводят аналогичное исследование для других фиксированных моментов времени, лежащих в пределах времени работы. Если полученные таким образом стационарные системы устойчивы, то считается, что исследуемая система с переменными коэффициентами тоже устойчива в рассматриваемые моменты времени.

Для определения и сравнения устойчивости пяти моделей с разными параметрами настройки, описанными выше, необходимо определить наборы фиксированных коэффициентов  $\beta_i$ , которые будут использоваться для анализа по критериям устойчивости Найквиста. При этом

можно будет определить запас устойчивости по амплитуде построив диаграмму Найквиста. Согласно принципу замороженных коэффициентов, необходимо определить фиксированные моменты времени, в которых будут браться значения  $\beta_i$ . Исходя из динамики изменения графика настройки коэффициентов  $\beta_i(t)$  и времени переходного процесса исследуемого объекта диагностирования, в интервале времени от 0 до 10 брались моменты времени с шагом равным 1, в интервале от 10 до 20 — с шагом 2, в интервале от 20 до 30 — с шагом 5, а в интервале от 30 до 80 — с шагом 10. Таким образом, для всех пяти моделей были определены по двадцать наборов. На рисунках 3 и 4 представлены примеры графиков настройки коэффициентов  $\beta_i(t)$  в контрольной точке  $kt_2$ , а также диаграммы Найквиста для трех из двадцати наборов значений коэффициентов  $\beta_i$  соответственно для

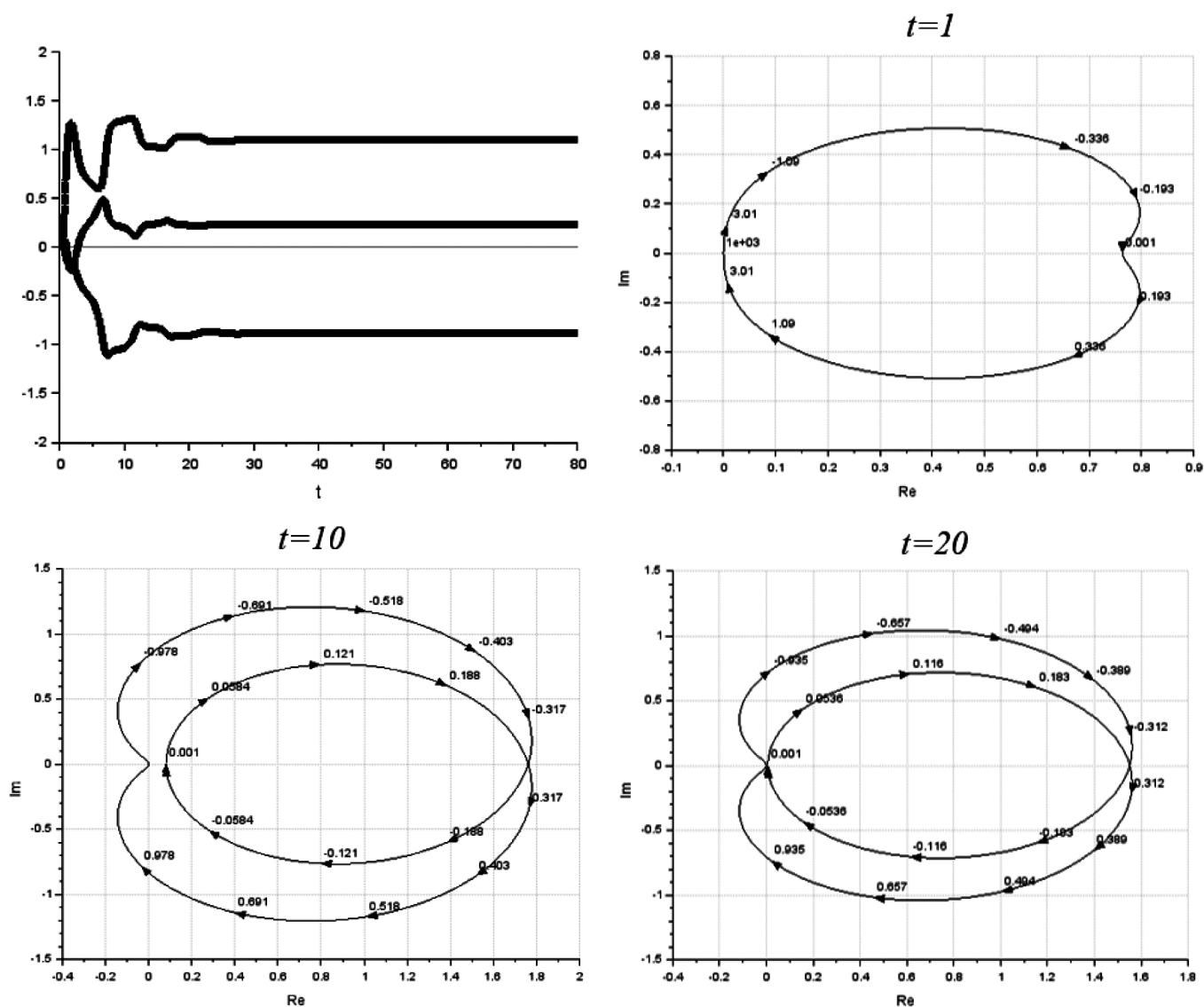


Рис. 4. Пример определения устойчивости модели с измененным параметром  $b$  под индексом «b2.9» для контрольной точки  $kt_2$ . Слева сверху — график настройки коэффициентов  $\beta_i(t)$ , справа сверху — диаграмма Найквиста для набора в момент времени равным 1, слева внизу — диаграмма Найквиста для в момент времени равным 10, справа внизу — диаграмма Найквиста для набора в момент времени равным 20

исходной модели и модели с измененным параметром  $b$  под индексом «b2.9».

По результатам проведенного сравнения было установлено, что все пять рассматриваемых моделей устойчивы на каждом выбранном наборе коэффициентов  $\beta_i$ . Таким образом, согласно методу замороженных коэффициентов, все рассматриваемые модели можно считать устойчивыми в целом. Помимо определения факта устойчивости был рассчитан запас устойчивости по амплитуде для всех пяти моделей, который определяется по диаграмме Найквиста и выражается в виде расстояния от точки  $(-1, 0j)$  до ближайшей к ней точки пересечения годографа и оси действительных значений. Ввиду того, что в исследовании на устойчивость рассматрива-

лись по 20 диаграмм для каждой модели, то за значение запаса устойчивости по амплитуде принималось среднее его значение по всем 20-и наборам коэффициентов  $\beta_i$  для конкретной модели. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Запас устойчивости по амплитуде рассматриваемых изоморфных диагностических моделей

Модель	Исходная	«b2.9»	«b3.3»	«a40»	«a60»
Запас устойчивости	0.8601	0.7883	0.7454	0.8621	0.8623

Для исследования влияния устойчивости модели на возможности определения параметрических дефектов были определены наборы векторов эталонных де-

Таблица 2.

Результаты диагностирования

Введенный дефект	Эталонный дефект	Диагностический признак	Введенный дефект	Эталонный дефект	Диагностический признак
<b>Исходная модель</b>					
$b_{10} + 7 \%$	$b_{10} + 10 \%$	0.0000223	$b_{20} - 20 \%$	$b_{20} - 25 \%$	0.0005816
	$b_{10} + 25 \%$	0.0007268		$b_{20} - 10 \%$	0.0021815
	$b_{10} - 10 \%$	0.0008114		$b_{20} + 10 \%$	0.0178034
	$b_{10} - 25 \%$	0.0031254		$b_{20} + 25 \%$	0.0369823
	$b_{20} - 25 \%$	0.5979590		$a_{21} + 25 \%$	0.3975551
$a_{11} - 14 \%$	$a_{11} - 10 \%$	0.0000085	$a_{21} + 7 \%$	$a_{21} + 10 \%$	0.0002823
	$a_{11} - 25 \%$	0.0000662		$a_{21} + 25 \%$	0.0091290
	$a_{11} + 10 \%$	0.0002926		$a_{21} - 10 \%$	0.0101703
	$a_{11} + 25 \%$	0.0007479		$a_{21} - 25 \%$	0.0381501
	$b_{30} + 25 \%$	0.8951637		$b_{20} + 10 \%$	0.4611375
<b>Модель с измененным параметром <math>b</math> под индексом «b3.3»</b>					
$b_{10} - 7 \%$	$b_{10} - 10 \%$	0.0000013	$b_{20} + 14 \%$	$b_{20} + 10 \%$	0.0002243
	$b_{10} + 10 \%$	0.0000264		$b_{20} + 25 \%$	0.0015943
	$b_{10} - 25 \%$	0.0000621		$b_{20} - 10 \%$	0.0087075
	$b_{10} + 25 \%$	0.0000661		$b_{20} - 25 \%$	0.0241555
	$b_{20} - 25 \%$	0.2141614		$b_{10} - 25 \%$	0.2610138
$a_{11} - 20 \%$	$a_{11} - 25 \%$	0.0000049	$b_{30} + 14 \%$	$b_{30} + 10 \%$	0.0003148
	$a_{11} - 10 \%$	0.0000190		$b_{30} + 25 \%$	0.0020507
	$a_{11} + 10 \%$	0.0001630		$b_{30} - 10 \%$	0.0138630
	$a_{11} + 25 \%$	0.0003557		$b_{30} - 25 \%$	0.0424617
	$b_{20} + 25 \%$	0.7570946		$a_{11} - 25 \%$	0.7857444
<b>Модель с измененным параметром <math>a</math> под индексом «a60»</b>					
$b_{10} - 20 \%$	$b_{10} - 25 \%$	0.0001872	$b_{20} + 7 \%$	$b_{20} + 10 \%$	0.0001657
	$b_{10} - 10 \%$	0.0006698		$b_{20} + 25 \%$	0.0054330
	$b_{10} + 10 \%$	0.0051469		$b_{20} - 10 \%$	0.0059867
	$b_{10} + 25 \%$	0.0102722		$b_{20} - 25 \%$	0.0228969
	$b_{20} - 25 \%$	0.6137655		$a_{21} + 25 \%$	0.3903731
$a_{11} + 14 \%$	$a_{11} + 10 \%$	0.0000138	$a_{21} + 20 \%$	$a_{21} + 25 \%$	0.0006467
	$a_{11} + 25 \%$	0.0001009		$a_{21} + 10 \%$	0.0028828
	$a_{11} - 10 \%$	0.0005195		$a_{21} - 10 \%$	0.0291526
	$a_{11} - 25 \%$	0.0014182		$a_{21} - 25 \%$	0.0695188
	$b_{10} + 25 \%$	0.8934565		$b_{20} + 10 \%$	0.4076971

фектных технических состояний рассматриваемого объекта диагностирования. Было составлено пять наборов, которые соответствовали одной из рассматриваемых моделей. Каждый набор состоит из 20-и векторов, которые советуют отклонениям значений каждого из параметров рассматриваемого объекта на  $\pm 10\%$  и  $\pm 25\%$ . Для проведения последующего сравнительного анализа рассматривались отклонения параметров на  $\pm 7\%$ ,  $\pm 14\%$  и  $\pm 20\%$ . В таблице 2 приведена только малая часть результатов проведенного диагностирования и сокращен список значений диагностических признаков, ввиду необходимости сокращения объемов представляемых данных при сохранении их информативности.

Проведенные численные эксперименты показали, что все пять рассматриваемых изоморфных моделей обеспечивают достаточную точность диагностирования параметрических дефектов. Вероятности определения введенных дефектов для всех пяти моделей составили 100%. Также, по приведенным результатам видно, что эталоны, соответствующие одному параметрическому дефекту с разной степенью отклонения имеют малые значения. Это позволяет уменьшить количество используемых эталонных дефектных технических состояний без ущерба для достоверности определения места дефекта в объекте диагностирования.

В качестве дополнительной меры оценки качества диагностирования были рассчитаны различимости дефектов, которые определялись как разница между минимальным значением диагностического признака для вектора эталонного дефекта объекта, не являющегося искомым, и искомым. Результаты вычислений представлены в таблице 3. Полученные показатели различимости очень схожи между собой, а также имеют довольно малые значения. Это можно объяснить тем, что диагностические признаки эталонов для одного и того же параметра, но с разной степенью отклонения, очень схожи, о чем было сказано ранее. Поэтому, для дополнительной оценки эффективности работы алгоритма диагностирования с помощью пяти рассматриваемых моделей были рассчитаны различимости по параметрам, которые определялись как разница между минимальным значением признака для вектора эталонного дефекта параметра, не являющегося искомым, и искомым. В данном случае признаки дефектов с разной степенью отклонения для одного параметра рассматривались как единой целое. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Показатели различимости между параметрами, имеют уже большее различие, что дает возможность оценить зависимость эффективности диагностирования (различимости) от запаса устойчивости по амплитуде используемой модели. Для этого был построен график в виде линии тренда, представленный на рисунке 5.

Таблица 3.

Результаты определения различимости дефектов

Модель	Различимость между эталонами	Различимость между параметрами
Исходная	0.0023678	0.6551133
«b2.9»	0.0025124	0.5505493
«b3.3»	0.0025503	0.4856676
«a40»	0.0024232	0.6609121
«a60»	0.0025234	0.6610304

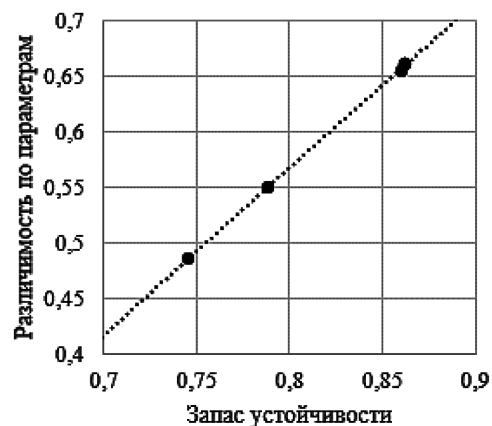


Рис. 5. График зависимости различимости от запаса устойчивости по амплитуде

Исходя из полученных результатов оценки можно сделать вывод, что устойчивость модели напрямую влияет на эффективность диагностирования параметрических дефектов. При этом была получена практически линейная зависимость, хотя она возможно может проявляться только на определенном диапазоне. Таким образом, учет запаса устойчивости может сыграть важную роль в правильном выборе параметров изоморфной модели при ее настройке. Это будет особенно необходимо для структурно сложных объектов диагностирования с различной динамикой блоков, из которых он состоит. Для таких объектов также будет важно применение индивидуальной настройки изоморфных моделей для каждой контрольной точки, что было показано в [9].

### Выводы

В данной работе был рассмотрен алгоритм для диагностирования одиночных параметрических дефектов непрерывных САУ с помощью динамических изоморфных моделей на звеньях Лагерра, включенных в обратную связь, с совместной настройкой параметров для каждой контрольной точки. Был рассмотрен способ определения устойчивости настраиваемых моделей и оценки запаса устойчивости по методу замороженных коэффициентов. По результатам проведенных численных экспериментов был сделан вывод, что предложенный алгоритм диагностирования обеспечивает

хорошую различимость параметрических дефектов, позволяя определить место возникновения дефекта в объекте диагностирования, и с малыми значениями различимости позволяет определять направление и степень изменения параметра. Последнее является положительной отличительной чертой, так как многие существующие подходы к диагностированию дефектов в САУ не позволяют выявить направление изменения параметров в исследуемом объекте. Также было установлено, что качество диагностирования напрямую зависит от устойчивости (запаса устойчивости по амплитуде) изоморфных диагностических моделей. Что приводит к увеличению роли проведения операций определения устойчивости в процедуре первоначальной настройки.

Общим преимуществом предлагаемого алгоритма является то, что для настройки изоморфной диагностической модели объекта диагностирования не требуется точное знание о его строении. Это означает, что необходимость в большом количестве априорно известной информации об объекте отсутствует. Другим положительным аспектом рассматриваемой методики является то, что нет необходимости в выполнении сложных расчетов для построения изоморфной динамической модели. Все процедуры настройки проводятся с использованием экспериментальных методов для заведомо исправного объекта диагностирования. Это исключает возможные 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., Shalobanov S.S. Application Of Customized Models On Laguerre Filters To Search For Parametric Defects In Continuous Automatic Control Systems. 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Publisher: IEEE, 2022, P. 583–587.
9. 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.
10. Блощинский В.Д. Применение настраиваемых моделей на фильтрах Лагерра для поиска параметрических дефектов в нелинейных САУ // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки*. 2022. № 10. С. 57–62.

---

© Блощинский Владислав Дмитриевич (vladkms94@mail.ru); Шалобанов Сергей Викторович (shalobanov@mail.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»