

УДК 533.6.013.1: 517.938.5: 621.395
DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-122-129

АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА И ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «РОЯ» ДРОНОВ

А. И. Нистюк, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В данной статье рассматривается получение характеристического полинома динамической модели «роя» дронов. Разработанный алгоритм анализа топологических моделей позволяет получить характеристический полином и передаточную функцию системы в буквенно-численном виде методом присоединения по одной вершине. Алгоритм отличается от существующих применением более оптимального механизма построения деревьев и прадеревьев частей графа, позволившего сократить затраты времени и памяти. Формализованная информация о графе, включающая множество варьируемых параметров, и служит исходной информацией при построении характеристического полинома и передаточной функции системы.

Основными элементами этой информации являются внутренние и внешние вершины. Описание частей графа с целью выявления замкнутых контуров доводим с помощью специально разработанного множества кортежей части, элементами которого являются нулевая вершина и вершины множества. Описан процесс образования множества кортежей, производимых по разработанным правилам.

Представлены алгоритмы получения характеристического полинома части графа и характеристического полинома системы. Получение передаточной функции системы основано на применении рассмотренного алгоритма построения характеристического полинома для графа систем, в который введены дополнительные (структурные) дуги, указывающие пары входных и выходных узлов системы.

Представление весов ребер и в виде параметрической функции ребра позволяет расширить возможности методов топологического анализа при автоматизированном проектировании динамических систем с изменяющимися во времени параметрами.

Алгоритм дает возможность получать характеристический полином системы как явную функцию различных параметров, а не только тех, которые непосредственно являются коэффициентами дифференциальных уравнений системы. Это намного расширяет простор проектировщику в выборе параметров варьирования. Полученная модель учитывает изменчивость состава, структуры и уровня взаимодействия «роя». При изменении «роя» нет необходимости пересчитывать весь граф, а только изменившуюся часть.

Алгоритм отличается от существующих применением более оптимального механизма построения деревьев и прадеревьев частей графа, позволившего сократить затраты времени и памяти.

Ключевые слова: дрон, динамическая модель, топологическая модель, алгоритм.

Введение

Руководитель направления физико-технических исследований Фонда перспективных исследований Игорь Денисов считает, что задачи, стоящие перед оператором дронов, значительно сократятся. Предполагается, что они сведутся к корректной постановке задач группе дронов [1]. По его мнению, один из основных вопросов развития беспилотных летательных аппаратов – это управление группами аппаратов (роевые технологии).

«Рой» дронов – это группа нескольких аппаратов, выполняющих общую задачу. Преимущества «роя» очевидны: каждый аппарат выполняет свою подзадачу, большая площадь покрытия, образование информационной сети, изменение состава, структуры, конфигурации «роя» и т. д. «Рой» дронов обладает специфическими возможностями по сравнению с одиночными дронами [2].

«Рой» может управляться оператором или группой операторов, может действовать самостоятельно или в комбинации указанных способов [3]. Одна из самых простейших и распространенных технологий описана Стефаненом Лаззаро [4]. Технология заключается в управлении оператором одним дроном, в то время как остальные дроны стараются сохранить свое положение в «рое» относительно ведущего дрона и остальных дронов. При этом дроны в своем движении колеблются относительно заданной точки в «рое». Одна из главных проблем управления «роем» – это столкновения дронов друг с другом [5], отметил Уильям Ропер, руководитель Strategic Capabilities Office, в своем докладе.

Движение каждого дрона можно представить как поступательное по заданной траектории и колебательное, возникающее при попытке сохранить положение на траектории относительно других дронов. Целесообразно рассматривать

движение системы относительно координатных осей, движущихся со скоростью ведущего дрона. Таким образом, выделяются колебания движения дронов, а «рой» можно рассматривать как колебательную систему.

Представленная колебательная система обладает рядом особенностей: переменной структурой, переменным составом, уровнем взаимодействия [6]. В указанной динамической системе нас интересуют частоты собственных колебаний, поскольку наибольшая амплитуда колебаний возможна только при совпадении частоты возмущений с частотой собственных колебаний. С учетом потерь и запаздывания интерес представляют частоты свободных колебаний системы.

Алгоритм анализа топологических моделей «роя» дронов

Предлагается разработанный алгоритм анализа топологических моделей, с помощью которого можно получить передаточную функцию системы (ПФС) и характеристический полином (ХП). Передаточная функция и характеристический полином получают в буквенно-численном виде. При этом используется метод присоединения по одной вершине. Алгоритм по сравнению с существующими обладает оптимальным механизмом построения деревьев и прадеревьев частей графа. В конечном итоге сокращаются затраты памяти и времени вычислений. Таким образом, появляется возможность моделировать многокомпонентные «рои» дронов.

Исходной информацией при построении ХП системы служит формализованная информация о графе. Информация включает множество варьируемых параметров U , множества τ_i и Y_i .

Построим характеристические по заданным множествам τ_i и Y_i . Множества $H(\gamma_i)$ одновершинных множеств графа представляются в виде совокупности множеств $\{SL(\gamma_i), M(\gamma_i)\}$. Где $M(\gamma_i)$ – множество порядковых номеров вершин, соответствующих слагаемых. Множество слагаемых $SL(\gamma_i)$ характеристического полинома одновершинной части γ_i упорядочено по степеням p .

Путем сложения параметрических функций ребер, входящих в множество Y_i , получаем характеристический полином одновершинной части. Согласно [7], перемножив по особым правилам ХП $H(\gamma_1)$ первой вершины на ХП $H(\gamma_2)$ второй вершины, получим частичный ХП для части графа, который состоит уже из двух вершин $\gamma_{1,2}$. Далее, умножая полученный ХП для части $\gamma_{1,2}$ на ХП третьей вершины, получаем полином для части $\gamma_{1,2,3}$. Таким образом, можно

получить ХП всего графа. Для этого необходимо продолжить процесс до N -й вершины графа. При перемножении исключаются некоторые элементы ХП, а именно деревья, содержащие контуры. Основную задачу при получении частичных ХП составляет последовательное исключение таких элементов ХП на каждом i -м этапе перемножения, то есть выявление множества деревьев частичных графов с контурами.

Когда разрезаем дуги, граф разделяется на две части. Рассмотрим подробнее, как образуются части графа $\gamma_{1,2,\dots,i}$ присоединением одновершинных частей графа γ_i к части графа $\gamma_{1,\dots,i-1}$. Напомним, что вершины $\{i+1, i+2, \dots, N\}$ составляют множество внешних вершин нового графа, а вершины $\{1, 2, \dots, i\}$ составляют множество внутренних вершин. Поскольку при делении графа дуги разрезаются, то контуры теряются. Для последующего объединения частей графа необходимо хранить ту часть информации, которая дает возможность восстановить контур при операции объединения частей графа. Следовательно, необходима топологическая информация о дугах, которые соединяют внутренние вершины с внешними, и информация о внутренних путях части графа $\gamma_{1,2,\dots,i}$, которые принадлежат соединительным дугам. Эта информация содержится во внешних и внутренних вершинах, которые являются концами соединительных дуг. Назовем множеством внутренних соединительных вершин w_1 концы соединительных дуг, лежащих внутри графа. Назовем множеством внешних соединительных вершин w_2 концы соединительных дуг, лежащих вне части графа $\gamma_{1,2,\dots,i}$.

Пользуясь языком логики, определим множество внутренних соединительных вершин w_1 части графа следующим образом

$$j \in w_1, \text{ если } (1 \leq j \leq i) \& E_{m \in \tau_j} (m > i). \quad (1)$$

Через множество $w_1(i-1)$ части $\gamma_{1,2,\dots,i-1}$ можно определить множество $w_1(i)$ части $\gamma_{1,2,\dots,i}$.

$$j \in w_1(i), \text{ если } j \in [w_1(i-1)U\{i\}] \& E_{m \in \tau_j} (m > i). \quad (2)$$

Множество $w_2(i)$ определим по формуле

$$j \in w_2(i), \text{ если } [(i+1) \leq j \leq N] \& E_{m \in \tau_j} (m \leq i). \quad (3)$$

Замкнутые контуры выявляются следующим образом. Для этого специально разработаны множества кортежей части графа $KOR_2(i)$. Элементами множества кортежей части графа

$KOR_2(i)$ являются нулевая вершина и вершины множества $w_2(i)$.

Множество кортежей образуются по следующим правилам:

1. Присоединяем i -ю вершину к множеству $w_1(i-1)$ по выражению

$$G_1(i) = w_1(i-1) \cup \{i\}, \quad (4)$$

тем самым определяя множество головных вершин кортежей.

2. Строим множество кортежей $KOR_1(i)$ путем сочетаний кортежей и элементов множества τ_i , имея множество кортежей части $\gamma_{1,2,\dots,i-1}$ $KOR_2(i-1)$ и вершинных множеств τ_i части γ_i .

3. Анализируем на наличие контура каждый полученный кортеж множества $KOR_1(i)$. Смотрим, чему равен последний элемент кортежа, соответствующий i -й вершине. Если образованная вершина принадлежит множеству $w_1(i-1)$, то проверяем элемент на соответствие этой вершине. Если элемент равен i , то считается, что кортеж содержит контур.

4. Заменяем на нуль элемент кортежа, принадлежащий множеству внутренних вершин части $\gamma_{1,2,\dots,i}$. Таким образом, отмечается путь из корня в головную вершину элемента.

5. Заменяем на значение внешней вершины элемент кортежа, принадлежащий множеству внутренних вершин части. Замена производится потому, что для данного кортежа имеется путь из внешней вершины в головную.

6. Оставляем только те элементы в кортеже, которые соответствуют вершинам множества $w_1(i)$.

Полученное множество кортежей $KOR_2(i)$ содержит информацию о соединительных путях для части графа $\gamma_{1,2,\dots,i}$. Вместе с множеством $w_1(i)$ множество кортежей $KOR_2(i)$ участвует в образовании контуров на последующих этапах обработки.

Отметим, что множество $KOR_1(2)$ строится из вершинных множеств (ВМ) τ_1 и τ_2 для образования части $\gamma_{1,2}$ путем присоединения части γ_2 к одновершинной части γ_1 .

Рассмотрим процесс построения кортежей по приведенным правилам. В качестве примера возьмем часть графа $\gamma_{1,2}$, представленного на рис. 1.

Отметим, что множество головных вершин $G1$ состоит из вершины 1, 2, множество w_1 для части $\gamma_{1,2}$ состоит из вершины 2. Множество кортежей KOR_1 получаем из вершинных мно-

жеств $\tau_1 = \{0, 2\}$ и $\tau_2 = \{0, 1, 3\}$. Таким образом, применяя разработанные правила, получаем множество кортежей графа. В табл. 1 показан процесс образования кортежей по вышеизложенным правилам.

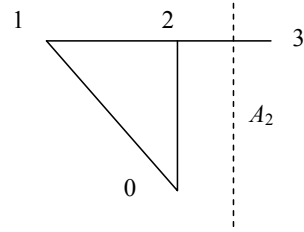


Рис. 1. Часть графа $\gamma_{1,2}$

Таблица 1. Таблица кортежей части $\gamma_{1,2}$

KOR_1 , исходные кортежи	KOR_1 , множество кортежей после замены элементов	KOR_2	Номер
(0,0)	(0,0)		
(0,1)	(0,0)		
(0,3)	(0,3)		
(2,0)	(0,0)		
(2,1)	-		
(2,3)	(3,3)		
		(0)	1
		(3)	2

Как видно из таблицы, при просмотре кортежа (2,1) из множества KOR_1 выделен контур. Это является основанием отбросить этот кортеж. В результате множество кортежей KOR_2 состоит из кортежей (0) и (3), которые соответствуют соединительной вершине 2.

Аналогично происходит процесс образования множества кортежей частей графа $\gamma_{1,2,3}$ и $\gamma_{1,2,3,4}$, которые показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

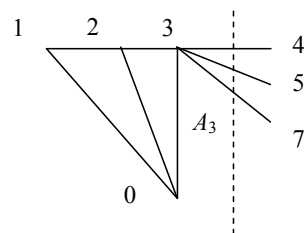


Рис. 2. Часть графа $\gamma_{1,2,3}$

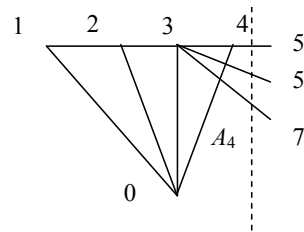


Рис. 3. Часть графа $\gamma_{1,2,3,4}$

Присоединяя вершины $i = 3$ к множеству $w_1(i - 1) = \{2\}$, получаем множество головных вершин G_1 части $\gamma_{1,2,3}$. Множество головных вершин $G_1 = \{2, 3\}$.

Рассуждая подобным образом, отмечаем, что множество $w_2(i) = \{4, 5, 7\}$, множество $w_1(i) = \{3\}$. На этом этапе множество кортежей KOR_1 получаем из множества кортежей предыдущего (табл. 1) этапа $KOR_2 = \{(0), (3)\}$ и вершинных множеств $\tau_3 = \{0, 2, 4, 5, 6\}$. Кортежи части $\gamma_{1,2,3}$ отображены в табл. 2. Очевидно, выделен контур при анализе кортежа $(3, 2)$. В конечном итоге внутренней соединительной вершине 3 соответствует множество кортежей KOR_2 и, соответственно, состоит из кортежей $(0), (4), (5), (7)$.

Таблица 2. Таблица кортежей части $\gamma_{1,2,3}$

KOR_1 , предыдущие кортежи	KOR_1 , множество кортежей после замены элементов	KOR_2	Номер
(0,0)	(0,0)		
(0,2)	(0,0)		
(0,4)	(0,4)		
(0,5)	(0,5)		
(0,7)	(0,7)		
(3,0)	(0,0)		
(3,2)	–		
(3,4)	(4,4)		
(3,5)	(5,5)		
(3,7)	(7,7)		
		(0)	1
		(4)	2
		(5)	3
		(7)	4

Подобным образом получаем $G_1 = \{3, 4\}$, $w_1 = \{3, 4\}$, $w_2 = \{5, 7\}$ для части $\gamma_{1,2,3,4}$. Аналогично проводится образования кортежей из вершинных множеств $\tau_4 = \{0, 3, 5\}$ и предыдущего множества KOR_2 . В табл. 3 показан процесс образования кортежей. Часть графа $\gamma_{1,2,3,4}$ имеет две внутренние соединительные вершины. В результате множество кортежей в данном случае состоит из семи двухэлементных кортежей.

Далее, чтобы получить частичный характеристический полином, необходимо определить его коэффициенты. Коэффициенты представляем в виде суммы слагаемых произведений числовых весов и различных степеней параметров множества U . Также необходимо определить номер элемента множества кортежей $KOR_2(i)$, который соответствует каждому слагаемому частичного характеристического полинома. Следовательно, совокупность множества номеров кортежей $MKOR(i)$ и множества слагаемых $SL(\gamma_{1,2,\dots,i})$ представляет частичный характеристический полином $H(\gamma_{1,2,\dots,i})$.

Таблица 3. Таблица кортежей части $\gamma_{1,2,3,4}$

KOR_1 , предыдущие кортежи	KOR_1 , множество кортежей после замены элементов	KOR_2	Номер
(0,0)	(0,0)		
(0,3)	(0,0)		
(0,5)	(0,5)		
(4,0)	(0,0)		
(4,3)	–		
(4,5)	(5,5)		
(5,0)	(5,0)		
(5,3)	(5,5)		
(5,5)	(5,5)		
(7,0)	(7,0)		
(7,3)	(7,7)		
(7,5)	(7,5)		
		(0,0)	1
		(0,5)	2
		(5,5)	3
		(5,0)	4
		(7,0)	5
		(7,7)	6
		(7,5)	7

Решение этой задачи авторы предлагают следующее.

Предполагаем, что найдены множества $w_1(i - 1)$ и $KOR_2(i - 1)$ для части графа $\gamma_{1,2,\dots,i-1}$. Предполагаем, что указанные кортежи множества $KOR_2(i - 1)$ пронумерованы в некотором порядке. Предполагаем, что у частичного характеристического полнома части графа $\gamma_{1,2,\dots,i-1}$ на предыдущем этапе найдено множество слагаемых $SL(\gamma_{1,2,\dots,i-1})$. Предполагаем, что установлено соответствие между кортежами множества $KOR_2(i - 1)$ и слагаемыми путем задания для каждого слагаемого номера кортежа, причем множество номеров кортежей $MKOR(i - 1)$ соответствует множеству слагаемых $SL(\gamma_{1,2,\dots,i-1})$.

Строим табл. 4 перемножения кортежей при образовании множества $KOR_2(i)$ из множеств $KOR_2(i - 1)$ и τ_i для частей графа $\gamma_{1,2}$ при перемножении частей графа γ_1 и γ_2 .

Таблица 4. Таблица умножения кортежей TU при перемножении $H(\gamma_1) \otimes H(\gamma_2)$

n	m		
	1	2	3
1	1	1	2
2	1	0	2

Здесь m – порядковый номер из множества N_{τ_i} ; n – порядковый номер кортежа $KOR_2(i - 1)$.

При этом считаем, что элемент таблицы TU_{nm} равен порядковому номеру кортежа множества $KOR_2(i)$, который получился в результате соче-

тания m -го элемента множества τ_i и n -го кортежа из множества $KOR_2(i-1)$.

Если обнаружен контур в образованном кортеже, то элемент таблицы T_{nm} принимаем за нуль.

Следовательно, сформировалась таблица перемножения для частичного характеристического полинома части $\gamma_{1,2,\dots,i}$. На основе таблицы находим номер кортежа слагаемого частичного характеристического полинома по номерам кортежей элементов характеристического полинома предыдущей части графа $\gamma_{1,2,\dots,i-1}$ и одновершинной части γ_i , образующих это слагаемое.

Аналогичным образом строим табл. 5, 6 перемножения кортежей при образовании множества $KOR_2(i)$ из множеств $KOR_2(i-1)$ и τ_i для частей графа $\gamma_{1,2,3}$, и $\gamma_{1,2,3,4}$ при перемножении частей графа $\gamma_{1,2}$ и γ_3 , $\gamma_{1,2,3}$ и γ_4 .

Таблица 5. Таблица умножения кортежей TU при перемножении $H(\gamma_{1,2}) \otimes H(\gamma_3)$

n	m				
	1	2	3	4	5
1	1	1	2	3	4
2	1	0	2	3	4

Таблица 6. Таблица умножения кортежей TU при перемножении $H(\gamma_{1,2,3}) \otimes H(\gamma_4)$

n	m		
	1	2	3
1	1	1	2
2	1	0	3
3	4	3	3
4	5	6	7

В результате получаем в множестве $KOR_2(i)$ порядковый номер кортежа.

Находим множества $SL(\gamma_{1,2,\dots,i})$ и множество $MKOR(i)$ путем перемножения частичного характеристического полинома $H(\gamma_{1,2,\dots,i-1})$ на характеристический полином $H(\gamma_i)$ ОЧ γ_i . Получаем коэффициенты частичного характеристического полинома $H(\gamma_{1,2,\dots,i})$ в порядке возрастания степеней переменной p . Сложением произведений коэффициентов частичного характеристического полинома $H(\gamma_{1,2,\dots,i-1})$ при степени p^h и коэффициентов характеристического полинома $H(\gamma_i)$ при степени p^l получаем коэффициент частичного характеристического полинома $H(\gamma_{1,2,\dots,i})$. При этом должно соблюдаться условие $l_1 + l_2 = K$.

Перемножением числовых множителей перемножаемых слагаемых из множеств $SL(\gamma_{1,2,\dots,i-1})$ и $SL(\gamma_i)$ получаем числовой множитель слагае-

мого коэффициента частичного характеристического полинома из множества $SL(\gamma_{1,2,\dots,i})$. Их степени складываем, если в перемножаемые элементы входят одинаковые буквенные параметры. По таблице перемножения кортежей TU_{nm} по и номеру m из множества $M(\gamma_i)$ номеру кортежа n из множества $MKOR(i-1)$ каждому слагаемому коэффициенту ставим в соответствие номер кортежа. И отбрасываем элементы с номерами кортежей, равными нулю.

Заменяем одним членом с суммарным числовым весом слагаемые коэффициента характеристического полинома при некоторой степени переменной p . Слагаемые коэффициента характеристического полинома должны быть с одинаковым вхождением буквенных параметров и одинаковой степенью этих параметров. Такая операция называется приведением подобных членов в коэффициенте.

На основе вышеприведенных рассуждений разработан укрупненный алгоритм получения характеристического полинома системы, который показан на рис. 4. Также на рис. 5 представлен алгоритм определения таблицы умножения TU для части $\gamma_{1,2,\dots,i}$ и множества кортежей $KOR_2(i)$.

Таким образом, получаем характеристический полином всей системы в виде множества слагаемых $SL(\gamma)$, упорядоченных по степеням комплексной переменной p . Для каждого коэффициента a_k суммируем слагаемые и находим выражение характеристического полинома в буквенно-числовом виде

$$D(p) = a_0(U) + a_1(U)p^1 + \dots + a_k(U)p^k + \dots + a_{2N}(U)p^{2N}. \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), характеристический полином представлен как функция варьируемых параметров U .

В рассматриваемой постановке задачи второй важной характеристикой является передаточная функция системы. Входным узлом системы в этом случае является ведущий дрон, а выходным – анализируемый дрон «роя», кроме ведущего. Для этого в граф системы вводятся дополнительные (структурные) дуги, указывающие входные и выходные узлы системы. Тогда передаточная функция системы находится в виде

$$K(p, U) = A(p, U) / B(p, U). \quad (6)$$

Взятие алгебраических производных по структурным дугам позволяет получить числитель и знаменатель передаточной функции $K(p, U)$.



Рис. 4. Укрупненный алгоритм получения характеристического полинома системы

Вывод

Представление весов ребер и в виде параметрической функции ребра позволяет расширить возможности методов топологического анализа при автоматизированном проектировании динамических систем с изменяющимися во времени параметрами.

Алгоритм дает возможность получать ХП системы как явную функцию различных параметров, а не только тех, которые непосредственно являются коэффициентами дифференциальных уравнений системы. Это намного расширяет простор проектировщику в выборе параметров варьирования.

Полученная модель учитывает изменчивость состава, структуры и уровня взаимодействия

«роя». При изменении «роя» нет необходимости пересчитывать весь граф, а только изменившуюся часть.

Полученную топологическую модель планируется использовать при проектировании поведения «роя» с использованием известных методов, например [8–10]. Особенно эффективно использовать разработанную топологическую модель в технологии построения «роя» с ведущим дроном.

Алгоритм отличается от существующих применением более оптимального механизма построения деревьев и прадеревьев частей графа, позволившего сократить затраты времени и памяти, что позволяет моделировать «рои» с большим количеством дронов.

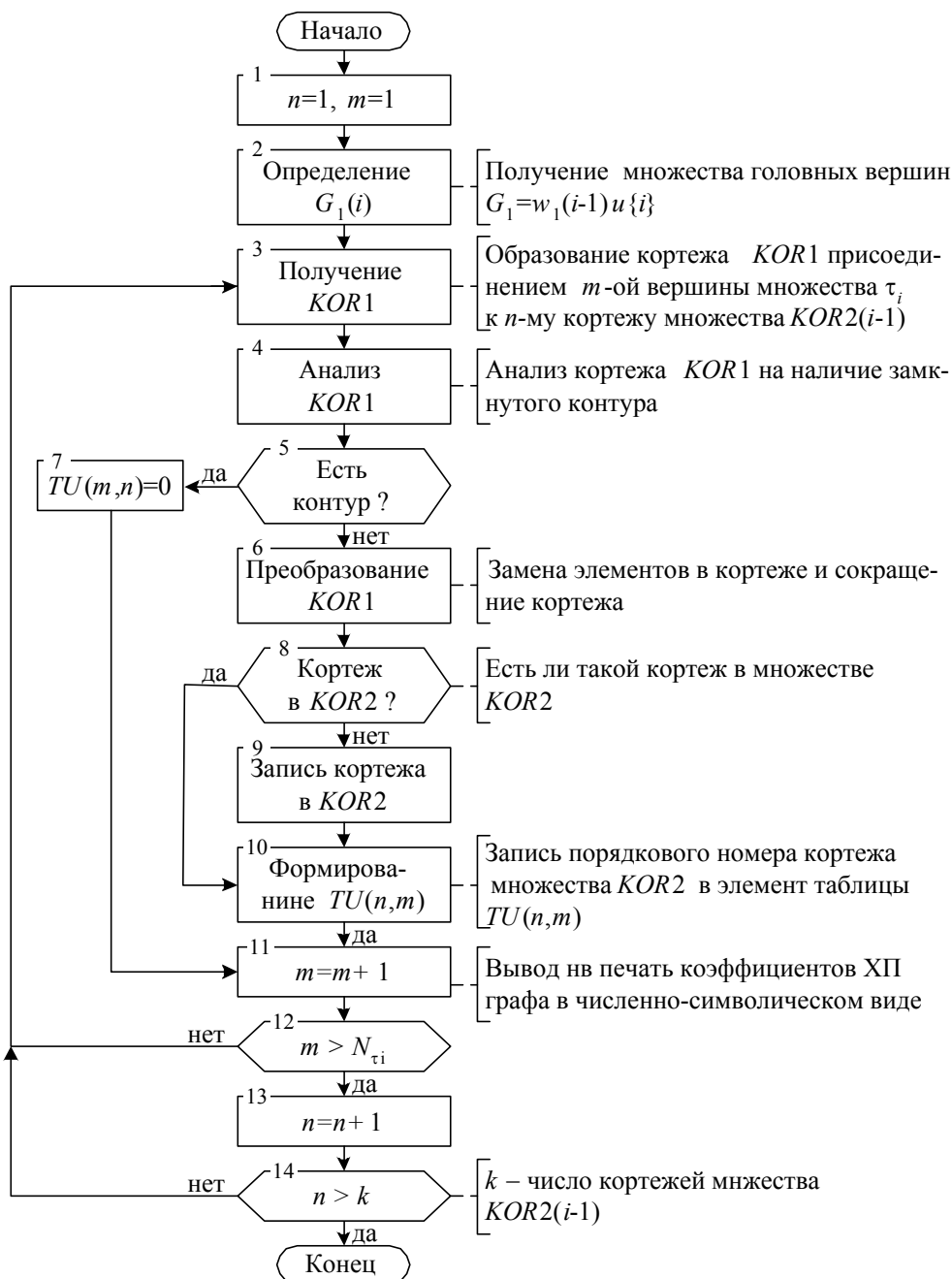


Рис. 5. Алгоритм определения таблицы умножения TU для части $\gamma_{1,2,\dots,i}$ и множества кортежей $KOR_2(i)$

Библиографические ссылки

1. Новости беспилотной авиации. URL: <https://rusky.ru/2017/08/29/фонд-перспективных-исследований-раз> (дата обращения: 20.07.2018).

2. Долгирев В. Д. Разработка командного взаимодействия военных БПЛА: Математическое моделирование. URL: http://genius.pstu.ru/file.php/1/pupils_works_2017/DolgirevVladislav.pdf (дата обращения: 06.07.2018).

3. Nistyuk A.I. Tactile Screens Of Telecommunication Devices // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции / под ред. А. Г. Самойлова. Т. 2. Владимир : ВлГУ, 2017. 206–208 с.

4. Stephen Lazzaro. Flying Multiple Drones From 1 Remote Controller // University of Wisconsin-Madison, WI. URL: <https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/72188> (дата обращения: 06.07.2018).

5. «Рой» дронов Пентагона. URL: www.cezarium.com/swarm-of-drones (дата обращения: 20.07.2018).

6. Собственный рой беспилотников – возможно ли? URL: <http://robotrends.ru/pubs/1603/sobstvennyy-roj-bespilotnikov---vozmozhno-li> (дата обращения: 20.07.2018).

7. Nistyuk A.I., Lyalin V.E., Danilov M.V., Mikhailov Y.O. Diacoptical Analysis Algorithms Of Topological Site Models Of Information Backup And Storage Carrier. Vibroengineering PROCEDIA. 2016. Vol. 8. Pp. 470-477.

8. Kulev M.K., Lyalin V.E., Nistyuk A.I. Synthesis of Tape Drives on the Basis of Frequency Spectra for a Threecomponent Rheological Tape Model (1990) *Vibration Engineering*. No. 4 (61). Pp. 61-71.

9. Nistyuk A. I. Optimizaciya parametrov lentoprotyazhnyh mekhanizmov pri sinteze po chastotnym spektram. [Vibrotekhnika] *Vil'nyus*, 1987, vol. 2, no. 55, pp. 47-55.

10. Nistyuk A.I., Danilov M.V., Sivtsev N.S., Kugultinov S.D. (2016) Method For Direct Identification Of Optimum Modal Values Of Dynamical Systems. *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 8. Pp. 256-263.

References

1. *Novosti bespilotnoj aviacii* [Unmanned Aviation News]. Available at <https://rusky.ru/2017/08/29/фонд-перспективных-исследований-раз/> (accessed July 20, 2018) (in Russ.).

2. Dolgirev V.D. *Razrabotka komandnogo vzaimodejstviya voennyh BPLA: Matematicheskoe modelirovanie* [Development of command interaction of military UAVs: Mathematical modeling]. Available at http://genius.pstu.ru/file.php/1/pupils_works_2017/DolgirevVladislav.pdf (accessed July 06, 2018) (in Russ.).

3. Nistyuk A.I. [Tactile Screens of Telecommunication Devices]. *Proceedings of the Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informacii. Materialy 12-oy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, 2017, vol 2, Russ, Vladimir, 2017, pp. 206-208.

4. Stephen Lazzaro. *Flying Multiple Drones From 1 Remote Controller* [University of Wisconsin-Madison, WI], available at <https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/72188> (accessed July 06, 2018) (in Russ.).

5. "Roj" dronov *Pentagona* [Pentagon's "Swarm" of drones]. Available at www.cezarium.com/swarm-of-drones (accessed July 20, 2018) (in Russ.).

6. *Sobstvennyj roj bespilotnikov - vozmozhno li?* [Own swarm of UAVs - is it possible?]. Available at URL: <http://robotrends.ru/pubs/1603/sobstvennyy-roj-bespilotnikov---vozmozhno-li> (accessed July 20, 2018) (in Russ.).

7. Nistyuk A.I., Lyalin V.E., Danilov M.V., Mikhailov Y. O. (2016). Diacoptical Analysis Algorithms of Topological Site Models of Information Backup and Storage Carrier. *Vibroengineering Procedia*, vol. 8, pp. 470-477.

8. Kulev M.K., Lyalin V.E., Nistyuk A.I. Synthesis of Tape Drives on the Basis of Frequency Spectra for a Threecomponent Rheological Tape Model (1990) *Vibration Engineering*. No. 4 (61). Pp. 61-71.

9. Nistyuk A.I. Optimizaciya parametrov lentoprotyazhnyh mekhanizmov pri sinteze po chastotnym spektram. [Vibrotekhnika], *Vil'nyus*, 1987, vol. 2, no. 55, pp. 47-55.

10. Nistyuk A.I., Danilov M.V., Sivtsev N.S., Kugultinov S.D. Method For Direct Identification of Optimum Modal Values of Dynamical Systems. *Vibroengineering Procedia*, 2016. Vol. 8. Pp. 256-263.

Algorithm for Obtaining a Characteristic Polynomial and Transfer Function of Dynamic Model of Drone "Swarm"

A. I. Nistyuk, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. V. Abilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

In this paper receiving a characteristic polynomial of dynamic model of "swarm" of drones is considered. The developed analysis algorithm of topological models allows to receive a characteristic polynomial and a transfer function of the system in an alphabetic and numerical form by an accession method on one top. The algorithm differs from the existing ones by the use of more optimum mechanism of construction of trees and great trees of parts of the graph that allowed to reduce expenses of time and memory. The formalized information on the column including a set of the varied parameters also serves as the initial information at creation of a characteristic polynomial and transfer function of the system.

Basic elements of this information are internal and external tops. We lead up the description of parts of the graph for the purpose of identification of the closed contours by means of specially developed set of trains of a part which elements are the zero top and tops of a set. The process of formation of a set of trains made by the developed rules is described.

Algorithms of receiving a characteristic polynomial of a part of the count and characteristic polynomial of the system are presented. Receiving the transfer function of the system is based on application of the considered algorithm of creation of a characteristic polynomial for the graph of systems into which the additional (structural) arches specifying couples of input and output knots of the system are entered.

Representation of scales of edges also in the form of the parametrical function of an edge allows to expand possibilities of methods of the topological analysis at the automated design of dynamic systems with the parameters changing in time.

The algorithm gives the chance to receive a characteristic polynomial of the system as the obvious function of various parameters, and not just those which directly are coefficients of the differential equations of the system. It greatly expands a scope for the designer in the choice of parameters of variation. The received model considers variability of the composition, structure and level of interaction of the "swarm". At the change of the "swarm" there is no need to recalculate all the graph but only its changed part.

Keywords: drone, dynamic model, topological model, algorithm.

Получено: 22.08.18