

А. И. Нефедьев, В. С. Поляков, С. В. Поляков

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Ключевые слова: подвижная часть, растяжка, балка, граф, матрица, матрица инцидентора, математическая модель, моделирование, уравнение.

Рассмотрена конструкция подвижной части электроизмерительного прибора и проведён анализ её функционирования. Заложены основы построения математической модели подвески, описывающей поведение системы.

Keywords: moving part, taut band, beam, graph, matrix, incidence matrix, mathematical simulation, simulation, equation.

The construction of moving part of electrical-type measuring device was examined as well as analyses of its functioning were implemented. The theoretical foundation of mathematical model construction of suspension which describes the behavior of system was set.

При проектировании измерительного прибора решаются задачи анализа и оптимизации работы его по различным критериям. Для электромеханических электроизмерительных приборов высокой точности одним из наиболее важных критериев является устойчивость к механическим помехам. Улучшение метрологических характеристик электромеханических приборов чаще всего происходит за счёт увеличения размеров их подвижной части, однако при этом возрастает влияние механических помех на работу приборов. Также традиционные способы крепления подвижной части при помощи растяжек не могут обеспечить высокую устойчивость к механическим помехам. Эта проблема была решена при разработке конструкции подвески подвижной части [1,2], предназначенной для применения в электростатическом компараторе постоянного и переменного напряжения (ЭКН). Для обеспечения повышенной помехоустойчивости положение балки компаратора определяется с помощью двух фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе фоторезисторов ФСК-76.

Для анализа работы подвижной части ЭКН было применено математическое моделирование, которое в настоящее время является необходимым этапом создания любого достаточно сложного прибора или устройства [3,4]. Это особенно актуально для электромеханических приборов, где использование математической модели в процессе проектирования наиболее эффективно при анализе поведения подвижной части прибора.

На рис.1 представлена конструктивная схема ЭКН [5,6], который содержит горизонтальную балку b , закрепленную на оси подвижной системы, ФЭП (на рис. 1 показаны флажки ФЭП), электростатические преобразователи c^n и $c^{\bar{n}}$, растяжки $r_1^n - r_4^n$ и $r_1^{\bar{n}} - r_4^{\bar{n}}$ с амортизационными пружинами.

Функционирование подвески рассматриваемого прибора представляет собой параллельную работу всех её частей, что значительно усложняет построение описания и построение математической модели прибора. Для анализа функционирования подобных устройств был разработан метод формального описания объекта в виде композиции графов, каждый из которых задаёт один из компонен-

тов, составляющих рассматриваемый объект [7,8].

Проведём анализ функционирования подвески рассматриваемого прибора, для чего выделим в рассматриваемой системе следующие компоненты: b – балка; s – ФЭП; r_1^n – левая 1-я растяжка; r_2^n – левая 2-я растяжка; r_3^n – левая 3-я растяжка; r_4^n – левая 4-я растяжка; $r_1^{\bar{n}}$ – правая 1-я растяжка; $r_2^{\bar{n}}$ – правая 2-я растяжка; $r_3^{\bar{n}}$ – правая 3-я растяжка; $r_4^{\bar{n}}$ – правая 4-я растяжка; c^n – правый электростатический преобразователь; $c^{\bar{n}}$ – левый электростатический преобразователь.

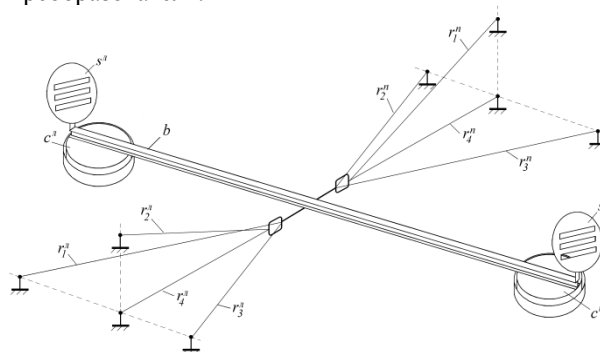


Рис. 1 – Конструктивная схема ЭКН

Функционирование каждого из компонентов можно описать с помощью графов. Отметим, что граф задается двумя множествами, первое из которых обязательно непустое – множество вершин, второе – множество рёбер и предикатом, указывающим, какую пару элементов первого множества соединяет тот или иной элемент второго множества. В качестве примера представим в виде графов два компонента рассматриваемой нами сложной системы.

Ниже подробно представлены два из двенадцати компонентов системы в виде графов Бержа. Графы и матрицы остальных компонентов оставляем за рамками данной статьи, поскольку целью является представление основ построения математической модели прибора. На рис. 2 представлен граф компонента 1 (балка подвижной части), и использованы следующие обозначения: b_0 – балка подвижной части находится в равновесии, β_0 – равновесие, b_1 – балка не находится в равновесии, β_1 – балка не сбалансирована, b_2 – проводится балансировка балки, β_2 – балка приводится в состояние равновесия, β_{01} –

балка выходит из состояния равновесия, β_{12} - начинается процесс балансировки балки, β_{20} - процесс балансировки балки закончен.

Компонент 1 (балка подвижной части):

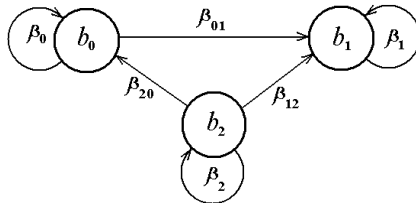


Рис. 2 - Граф компонента 1

$$M_b = \begin{pmatrix} b_0 \beta_0 b_0 & b_0 \beta_{01} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \beta_1 b_1 & b_1 \beta_{12} b_2 \\ b_2 \beta_{20} b_0 & 0 & b_2 \beta_2 b_2 \end{pmatrix}$$

Компонент 2 (ФЭП):

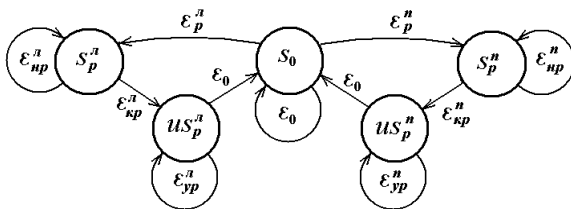


Рис. 3 - Граф компонента 2

$$M_s = \begin{pmatrix} s_0 \epsilon_0 s_0 & s_0 \epsilon_p^a s_p^a & s_0 \epsilon_p^n s_p^n & 0 & 0 \\ 0 & s_p^a \epsilon_{kp}^a us_p^a & 0 & s_p^a \epsilon_{kp}^a us_p^a & 0 \\ 0 & 0 & s_p^n \epsilon_{kp}^n us_p^n & 0 & s_p^n \epsilon_{kp}^n us_p^n \\ us_p^a \epsilon_0 s_0 & 0 & 0 & us_p^a \epsilon_{kp}^a us_p^a & 0 \\ us_p^n \epsilon_0 s_0 & 0 & 0 & 0 & us_p^n \epsilon_{kp}^n us_p^n \end{pmatrix}$$

где s_0 – подвижная часть находится в равновесии; ϵ_0 – наклон балки отсутствует; ϵ_p^a – система выходит из равновесия в сторону левого электростатического преобразователя; ϵ_p^n – система выходит из равновесия в сторону правого электростатического преобразователя; s_p^a – система наклонена в сторону левого электростатического преобразователя; ϵ_{kp}^a – система вышла из равновесия; ϵ_{kp}^n – начать компенсацию рассогласования; s_p^n – система наклонена в сторону правого электростатического преобразователя; ϵ_{kp}^n – система вышла из равновесия; ϵ_{kp}^n – начать компенсацию рассогласования; us_p^a – устранение наклона в сторону левого электростатического преобразователя; ϵ_{kp}^a – устранение рассогласования; ϵ_0 – рассогласование устранено; us_p^n – устранение наклона в сторону правого электростатического преобразователя; ϵ_{kp}^n – устранение рассогласования.

Описание функционирования конструкции подвески подвижной части электроизмерительных приборов определяется последовательно-параллельной работой компонентов системы. То есть, функционирование каждого компонента определяется последовательностью смены его состояний, а параллелизм достигается одновременным

рассмотрением работы всех компонентов. Первое достигается представлением компонента матрицей инцидентора графа компонента, а второе – композицией матриц, в основе которой лежит декартово произведение, задающее параллелизм функционирования.

Таким образом, граф $G(Y;X;H)$, который описывает функционирование конструкции подвески подвижной части электроизмерительных приборов, является не декартовым произведением исходных графов, а некоторой композицией исходных графов, в результате которой и получаем результирующий граф.

$$G = G_1 \Xi G_2 \Xi \dots \Xi G_p \Xi \dots \Xi G_r = \bigoplus_{p=1}^r G_p$$

В общем случае операция композиции представляет собой r -местное отношение, задающее порядок смены ситуаций на объекте. Любое r -мерное отношение может быть задано r -мерной таблицей. Оперировать такой таблицей сложно, поэтому необходимо перейти к более простому способу задания [9]. Сделаем следующее допущение, если в r -строке имеется хотя бы одна пара, которая на объекте, осуществляющем технологический процесс, недопустима или несовместима, то это будет означать, что не может быть в реальном процессе команды, соответствующей вершине Y_φ , и положения объекта, соответствующего переходу или петле X_v .

Такое допущение позволит вместо r -мерной таблицы использовать обычную двухмерную таблицу, задаваемую отношением совместимости ω . Следовательно, формальное описание объекта может быть представлено композицией графов, каждый из которых соответствует функционированию одного из компонентов, причем композиция может быть задана обычной двухмерной таблицей совместимости.

Если граф G_1 имеет $\square_1$ параметров, характеризующих его, а граф G_2 – $\square_2$ параметров, то таблица, задающая композицию графов, будет представлять собой $\square_1 \times \square_2$ матрицу.

Сделаем следующее допущение. Если r -строка обобщенных команд или состояний объекта будет тождественно равна нулю, то это означает, что имеется хотя бы одна пара $y_j; y_{j1}$, для этой обобщенной команды, или $x_i; x_{i1}$ для этого обобщенного состояния объекта, также тождественно равная нулю.

Условимся считать существование пары признаков фактом, когда в прямоугольной таблице (табл. 1), стороны которой являются признаками компонентов, на пересечении этих признаков не стоит ноль.

Допустимые состояния, определяющие процесс измерения, будут определяться композицией тех же компонентов.

Проведя операцию композиции на графах, описывающих функционирование каждого из компонентов, получим граф модели рассматриваемой нами подвески в виде композиции графов его компонентов, то есть подграфа графа декартова произведения исходных графов. Операция композиции

задаётся таблицами совместимости, которые представляют собой попарно рассматриваемые 66 признаков компонентов.

Таблица 1 – Фрагмент таблицы совместимости

		x_{μ}^p		y_v^p	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$x_{\mu 1}^{p1}$	...	1	...	1	...
$y_{v 1}^{p1}$	...	1	...	1	...
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

В таблице 2 приведена таблица совместимости на основе подробно рассмотренных двух компонентов сложной системы.

Таблица 2 – Таблица совместимости

	b_0	β_0	b_1	β_1	b_2	β_2	β_{01}	β_{12}	β_{20}
s_0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
ε_0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
ε_p^{λ}	1	1	1	1	0	0	1	0	0
ε_p^n	1	1	1	1	0	0	1	0	0
s_p^{λ}	0	0	1	1	0	0	1	1	1
$\varepsilon_{np}^{\lambda}$	0	0	1	1	0	0	1	1	1
$\varepsilon_{kp}^{\lambda}$	0	0	1	1	1	1	0	1	1
s_p^n	0	0	1	1	0	0	1	0	0
ε_{np}^n	0	0	1	1	0	0	1	0	0
ε_{kp}^n	0	0	1	1	1	1	0	0	0
us_p^{λ}	0	0	0	0	1	1	0	1	0
$\varepsilon_{yp}^{\lambda}$	0	0	0	0	1	1	0	1	0
ε_0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
us_p^n	0	0	0	0	1	1	0	0	1
ε_{yp}^n	0	0	0	0	1	1	0	0	1
ε_0	0	0	0	0	1	1	0	0	1

Построение данных таблиц и работа с ними позволяет отбросить из всех возможных пар троек

признаков недопустимые, и получить из декартова произведения результирующий граф. Применительно к рассматриваемой задаче получаем все допустимые состояния процесса уравнивания подвижной части ЭКН, каждое из которых представляет двенадцать троек компонентов:

$$M_{\Xi} = M_{r1}^a \Xi M_{r2}^a \Xi M_{r3}^a \Xi M_{r4}^a \Xi M_{r5}^n \Xi M_{r6}^n \Xi M_{r7}^n \Xi M_{r8}^n \Xi M_{ca}^a \Xi M_{ca}^n \Xi M_b \Xi M_s$$

Дальнейшая развертка приведенной выше формулы даст возможность разделения рассматриваемого нами процесса на некоторое множество входящих в него подпроцессов.

Разделение процесса работы прибора на подпроцессы необходимо, если при построении модели требуется детализировать изучение самой сути исследуемого процесса. Требуемое количество подпроцессов определяется исходя из реальной структуры прибора. Чем она сложнее, тем большее количество подпроцессов может потребоваться для детального и максимально формализованного описания модели проектируемого прибора.

Таким образом, предложенный метод математического моделирования блоками параллельно функционирующих компонентов позволяет подробно рассмотреть работу, как всего прибора (системы), так и работу любой его части или узла.

Литература

1. Нефедьев А.И. *Новые промышленные технологии* 4, 33-34 (2011).
2. А.с. №1668997 СССР, МПК G12B 13/00. Устройство для крепления подвижной части электроизмерительных приборов / И.А. Нефедьев, А.И. Нефедьев. - №4481079/21; заявлено 06.06.88; опубл. 07.08.91; Бюл. № 29.
3. Хайруллин Ф.С., Абрагим Х.А., Алхалили О.И. *Вестник Казанского технологического университета*, 8, 133-136 (2013).
4. Миляшов А.Н., Матюшин В.А. *Вестник Казанского технологического университета*, 2, 203-207 (2013).
5. Нефедьев, А.И., Кравченко С.А. *Измерительная техника*, 4, 63-67 (2000).
6. Патент РФ на изобретение №2307362, МПК G01R 17/08. Электростатический компаратор напряжения / А.И. Нефедьев. - №2006104420/28, 4481079/21; заявлено 15.02.2006; опубл. 27.09.2007; Бюл. № 27.
7. Поляков, В.С., Поляков С.В. *Контроль. Диагностика*, 2, 61-67 (2013).
8. Поляков, В.С., Поляков С.В. *Контроль. Диагностика*, 9, 48-53 (2009).
9. Поляков, В.С., Поляков С.В. *Контроль. Диагностика*, 4, 53-58 (2012).

© А. И. Нефедьев – к.т.н., доцент кафедры электротехники Волгоградского ГТУ, nefediev@rambler.ru; В. С. Поляков – к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» того же вуза, app@vstu.ru; С. В. Поляков – к.т.н., доцент кафедры электротехники того же вуза, psv1751@rambler.ru.