

Л.Б.ПОШЕХОНОВ, доцент, *plb2312@mail.ru*
М.Ю.ШЕСТОПАЛОВ, проректор по научной работе, *shestopalov 08@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

L.B.POSHEKHONOV, associate professor, *plb2312@mail.ru*
M.U.SHESTOPALOV, Vice Rector, *shestopalov 08@mail.ru*
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Разрабатывается подход к задаче диагностирования сложного объекта на основе структурного анализа особенностей его внутренней организации. Симптомы неисправностей функциональных блоков и связей выявляются контролем изменения качества передач системы. Задача локализации источника неисправности решается по диагностической модели топологического ранга, инвариантной к классам операторов блоков и значениям их параметров. Приводится пример решения задач обнаружения неисправностей и локализации источника неисправности системы технологического процесса производства никелевого порошка.

Ключевые слова: структурно-сложные системы, технологические процессы, системные свойства, структурные схемы, передачи, диагностирование, симптомы неисправностей.

STRUCTURAL APPROACH TO COMPLEX DYNAMIC OBJECT FAULT DETECTION AND LOCALIZATION.

Is designed the approach to the task of complex dynamic object diagnostics on the basis of internal structures features structural analysis. Operational units and links fault symptoms are detected by means of the system transfer quality change control. The task of fault source localization is solved by mean of diagnostic model of topological rank, invariant to the operators classes of blocks and values of their parameters. Is given an example of solving the problem of fault detection and localization of nickel powder technological production process system error source.

Key words: structurally complex systems, technological processes, system attributes, structural schemes, transfer, diagnostic, fault symptoms.

Введение. Один из подходов к процессу диагностирования динамических систем (технологических процессов) основан на положении, при котором функциональный блок или подсистема при возникновении неисправности обнаруживает себя появлением на своем выходе некоторого сигнала, который и является диагностическим признаком [1]. К таким ситуациям приводит образование вибраций и автоколебаний в механических, пневмо- и гидравлических объ-

ектах, появление режима генерирования в электрических блоках, и т. д. Симптомы подобных неисправностей обнаруживают на контролируемых выходах системы; по этим симптомам и решается задача локализации источника неисправности. Такой подход, дополненный анализом структурных свойств диагностируемой системы, разрабатывается в [3] и применим, когда неисправный объект активно проявляет себя сигналом, несущим диагностический признак.

Возможны также неисправности, которые не проявляются активно. Речь идет о выходе характеристик функционального блока за допустимые пределы. Например, имеет место увеличение или уменьшение коэффициента передачи или иного параметра звена. Своевременное обнаружение такой ситуации позволяет выявить возникновение неисправности на ранних этапах ее зарождения. Также может иметь место и полный отказ блока или отключение связи, что тем более не проявляется возникновением некоторого диагностического сигнала на выходе неисправного элемента системы.

Для подобных случаев предлагается задачу обнаружения неисправности решать выявлением симптомов в виде отклонения качества передач диагностируемой системы от эталона, присущего режиму нормального (исправного) функционирования.

Задача локализации источника неисправности по моделям топологического ранга неопределенности [2] решается нахождением подмножества элементов модели, влияющих на конкретную передачу, и определением качественного характера влияния.

Классификация структурных свойств системы и характера неисправностей по сформированным признакам позволяет априори формировать отношения «Симптом – Неисправность» для возможных вариантов диагностируемых ситуаций.

Процедура диагностирования по предложенному подходу проиллюстрирована на примере системы подготовки паров тетракарбонила никеля, являющейся частью технологического процесса производства никеля [3, 6].

При решении задачи использовано программное средство CLASSiC-3, имеющее режим анализа структурных свойств сложных динамических систем [3, 5].

Характер неисправностей и структурные свойства объекта при решении задачи диагностики по моделям топологического ранга неопределенности. Для формирования состава диагностируемых передач могут быть использованы передачи «Вход-Выход» системы, организованные для процесса управления объектом. С учетом воз-

можностей измерения сигналов на объекте для обнаружения факта неисправности составляется список диагностируемых передач $\Phi_i, i = 1, \dots, N$, связывающих конкретные входы и выходы. При этом должны выполняться следующие требования:

- формируются «эталонные» показатели качества передач, соответствующие номинальному поведению объекта,
- на функционирующем объекте предоставляется возможность контролировать качество каждой передачи и фиксировать отклонение качества от эталона,
- факт «обнуления» оператора диагностируемой передачи (будем обозначать $\Phi_i \equiv 0$), наступившего в результате топологической вариации в модели системы из-за неисправности, при которой на соответствующем выходе системы прекращается изменение сигналов, также обнаруживается и фиксируется.

Таким образом, симптомы неисправности проявляются в виде появления одной или подмножества «дефектных» передач с зафиксированным отклонением качества.

Локализация неисправности, т.е. указание места расположения в системе функционального блока или связи, ответственных за неисправность, предполагает наличие информации о внутренней организации системы. Эту информацию будем описывать причинно-следственными моделями, адекватной формой представления которых являются сигнальные графы.

Под элементом модели в форме *C*-графа [2] будем понимать блок (звено) или связь. В исходной системе в качестве звена может выступать функциональный блок или некоторая подсистема.

В данной работе рассматривается случай одиночной неисправности, т.е. неисправности одного блока или одной связи.

Будем рассматривать следующие возможные неисправности:

- Варьирование параметров блока – отклонение параметров блока за допустимые пределы изменения.
- Отключение (отказ) блока – прекращение реакции блока на входные воздействия. Например, поломка, удаление блока т.д.

При этом оператор блока можно положить тождественно равным нулю и в модели диагностируемой системы ситуацию следует рассматривать как топологическую вариацию с удалением блока.

- Отключение связи между блоками системы, что также можно трактовать как топологическую вариацию модели, сопровождающуюся удалением связи.

Перечисленные выше неисправности классифицируем по двум типам (табл. 1).

Таблица 1

Тип неисправности	Характер неисправности
1	Вариация параметров блока
2	Отключение (отказ) блока или отключение связи

Указанные неисправности могут вызывать проявляющиеся в операторах диагностируемых передач симптомы, которые сведем в табл. 2.

Таблица 2

Характер симптома при неисправности	Обозначение симптома
Изменение (вариация) оператора передачи	Φ^{var}
Обнуление оператора передачи	Φ^0
Независимость оператора от неисправности	Φ^{inv}

Применение свойств, связанных с понятиями достижимости и связности в сигнальных графах, позволяет выявить качественный характер влияния элементов на передачи модели и сформировать необходимые для решаемой задачи зависимости. При этом использованы понятия маршрут [7] и путь, под которым далее будем подразумевать элементарный путь [2, 4].

Существование назначенной для контроля передачи системы должно означать ненулевой оператор $\Phi \neq 0$; на графе это означает достижимость выхода сигналом, поданным на вход системы. Это, в свою очередь, подразумевает наличие в графе маршрута (маршрутов) и, соответственно, путей от входа к выходу. Оператор передачи является функцией каждого элемента маршрута и инвариантен к элементам, не принадле-

жащим ни одному маршруту. Объединение элементов всех маршрутов передачи составляет подмножество всех элементов, определяющих передачу. Это подмножество составляет избыточную модель для расчета назначенной передачи.

Введем три позиции элемента графа (блока или связи) по отношению к назначенной передаче (табл. 3).

Таблица 3

Номер позиции	Топологическая особенность позиции
1	Блок или связь входит во все пути передачи
2	Блок или связь принадлежит подмножеству путей передачи или не входит ни в один путь (но принадлежит маршрутам передачи)
3	Блок или связь не принадлежит маршрутам передачи

В результате можем сформировать таблицу, связывающую тип неисправности, номер позиции элемента и проявляющийся симптом неисправности (табл. 4).

Таблица 4

Тип неисправности	Номер позиции		
	1	2	3
1	Φ^{var}	Φ^{var}	Φ^{inv}
2	Φ^0	Φ^{var}	Φ^{inv}

Реализация предложенного подхода может быть проведена в три основных этапа.

Этап 1. Заполняется матрица позиций. Столбцам соответствуют диагностируемые передачи; по строкам располагаются элементы модели. В ячейках – номера позиций. Добавление к такой таблице информации о типах неисправности дает, по существу, прямое отображение «Неисправность – Симптом».

Этап 2. Так как неисправность разных элементов может повлиять на одну и ту же передачу (или группу передач), проводится объединение подмножеств «затронутых» неисправностью передач в классы эквивалентных групп.

Этап 3. Формируется обратное отображение «Симптом – Неисправность».

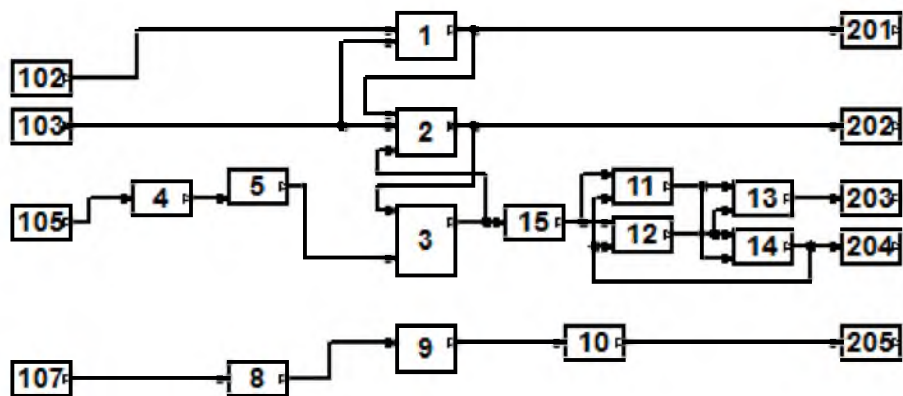


Рис.1. Структурная схема системы в графическом редакторе программы CLASSiC-3

Таблица 5

$\Phi_{\text{№}}$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7	Φ_8	Φ_9	Φ_{10}	Φ_{11}	Φ_{12}
Вход	102	102	102	102	103	103	103	103	105	105	105	107
Выход	201	202	203	204	201	202	203	204	202	203	204	205

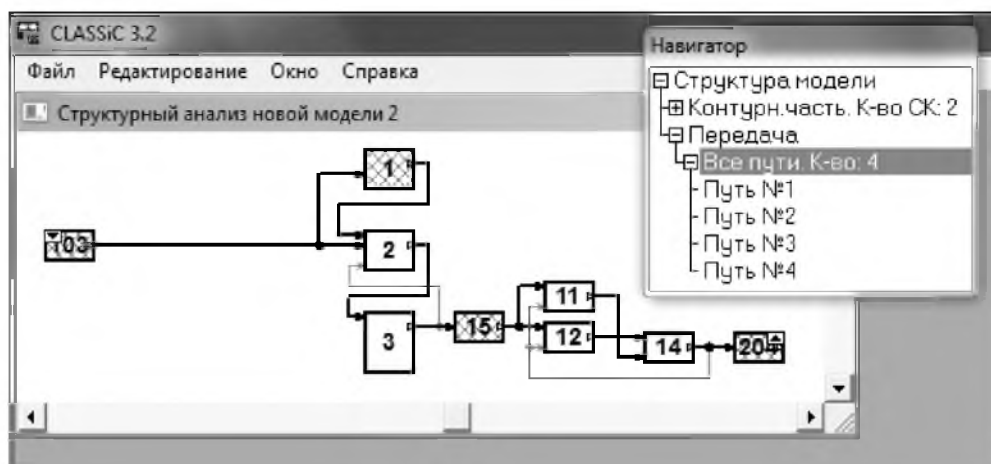


Рис.2. Окно структурного анализа программы CLASSiC-3 для исследуемой системы

Таблица 6

Характеристика графа модели	Результат структурного анализа
Количество блоков	9
Количество связей	13
Блоки, определяющие передачу	{1 2 3 11 12 14 15 103 204}
Связи, определяющие передачу	{(1→2) (2→3) (3→2) (3→15) (11→14) (12→14) (14→11) (14→12) (14→204)}
Путь #1	{103 2 3 15 11 14 204}
Путь #2	{103 1 2 3 15 11 14 204}
Путь #3	{103 2 3 15 12 14 204}
Путь #4	{103 1 2 3 15 12 14 204}
Блоки, к которым передача инвариантна	{9 8 4 5 10 13 102 107 105 201 202 203 205}

Таблица 7

Номера блоков, связи		Φ_1	Φ_2	...	Φ_8	...	Φ_{12}
MS блоки	1	1	1	...	2	...	3
	2	3	1	...	1	...	3
	3	3	2	...	1	...	3
	...	...	...	...	...	...	...
	15	3	3	...	1	...	3
MS связи	2→3	3	2	...	1	...	3
	3→2	3	2	...	2	...	3
	...	...	...	...	...	...	...
	15→12	3	3	...	2	...	3
MFS связи	102→1	1	1	...	3	...	3
	...	...	...	...	...	...	...
MSY связи	1→201	1	3	...	3	...	3
	...	...	...	...	...	...	...

Таблица 8

Симптом			Неисправность
Характер симптома	Номер симптома	Комбинации номеров дефектных передач	Номер блока или связь
Φ^{var}	1	$1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 6 \wedge 7 \wedge 8$	1
	2	$2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 6 \wedge 7 \wedge 8 \wedge 9 \wedge 10 \wedge 11$	$2 \vee 3$
	3	$9 \wedge 10 \wedge 11$	$4 \vee 5$
	4	12	$8 \vee 9 \vee 10$
	5	$3 \wedge 4 \wedge 7 \wedge 8 \wedge 10 \wedge 11$	$11 \vee 12 \vee 14 \vee 15 \vee 11^0 \vee 12^0 \vee (11 \rightarrow 14) \vee (12 \rightarrow 14) \vee (14 \rightarrow 11) \vee (14 \rightarrow 12) \vee (15 \rightarrow 11) \vee (15 \rightarrow 12)$
Φ^{var}, Φ^0	6	$3 \wedge 7 \wedge 10$	$13 \vee (11 \rightarrow 13) \vee (12 \rightarrow 13)$
	7	$6 \wedge 7 \wedge 8$	$(103 \rightarrow 2)$
	8	$1^0 \wedge 2^0 \wedge 3^0 \wedge 4^0 \wedge 5^0 \wedge 6 \wedge 7 \wedge 8$	1^0
	9	$2^0 \wedge 3^0 \wedge 4^0 \wedge 6^0 \wedge 7^0 \wedge 8^0 \wedge 9^0 \wedge 10 \wedge 11$	2^0
	10	$2 \wedge 3^0 \wedge 4^0 \wedge 6 \wedge 7^0 \wedge 8^0 \wedge 9^0 \wedge 10^0 \wedge 11^0$	3^0
	11	$9^0 \wedge 10^0 \wedge 11^0$	$4^0 \vee 5^0 \vee (4 \rightarrow 5) \vee (5 \rightarrow 3)$
	12	$2^0 \wedge 3^0 \wedge 4^0 \wedge 6 \wedge 7 \wedge 8$	$(1 \rightarrow 2)$
	13	$2 \wedge 3^0 \wedge 4^0 \wedge 6 \wedge 7^0 \wedge 8^0 \wedge 9 \wedge 10 \wedge 11$	$(2 \rightarrow 3)$
	14	$2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 6 \wedge 7 \wedge 8 \wedge 9^0 \wedge 10 \wedge 11$	$(3 \rightarrow 2)$
	15	$3^0 \wedge 4^0 \wedge 7^0 \wedge 8^0 \wedge 10^0 \wedge 11^0$	$(3 \rightarrow 15)$
	16	$9^0 \wedge 10^0 \wedge 11^0$	$(4 \rightarrow 5) \vee (5 \rightarrow 3) \vee (105 \rightarrow 4)$
	17	12 ⁰	$8^0 \vee 9^0 \vee 10^0 \vee (8 \rightarrow 9) \vee (9 \rightarrow 10) \vee (107 \rightarrow 8) \vee (10 \rightarrow 205)$
	18	$3^0 \wedge 7^0 \wedge 10^0$	$130 \vee (13 \rightarrow 203)$
	19	$3 \wedge 4^0 \wedge 7 \wedge 8^0 \wedge 10 \wedge 11^0$	14 ⁰
	20	$3^0 \wedge 4^0 \wedge 7^0 \wedge 8^0 \wedge 10^0 \wedge 11^0$	15 ⁰
	21	$1^0 \wedge 2^0 \wedge 3^0 \wedge 4^0$	$(102 \rightarrow 1)$
	22	$5^0 \wedge 6 \wedge 7 \wedge 8$	$(103 \rightarrow 1)$
	23	$1^0 \wedge 5^0$	$(1 \rightarrow 201)$
	24	$2^0 \wedge 6^0 \wedge 9^0$	$(2 \rightarrow 202)$
	25	$3^0 \wedge 7^0 \wedge 10^0$	$(13 \rightarrow 203)$
	26	$4^0 \wedge 8^0 \wedge 11^0$	$(14 \rightarrow 204)$

Пример проведения процедуры диагностирования. Проиллюстрируем процедуру диагностирования по предложенному подходу на примере системы подготовки паров тетракарбонила никеля [3, 6]. На основе приведенных в указанных источниках данных формируем диагностическую модель со связями со средой одного из режимов работы технологического процесса [3].

Вид модели в графическом редакторе программы CLASSiC-3 приведен на рис.1.

Нумерация блоков сохранена по отношению к приведенной в [3] модели.

Программа CLASSiC-3 содержит функцию удаления элементов модели по результатам структурного анализа, что позволяет формировать частные избыточные модели при решении конкретной задачи.

Пронумеруем выбранные для диагностирования передачи (табл.5).

В качестве примера проведем анализ передачи Φ_8 . Процедурой удаления элементов, к которым передача инвариантна, получаем избыточную модель (рис.2).

Окно «Навигатор» программы CLASSiC-3 предназначено для управления процессом анализа структурных свойств. Результаты анализа отображаются выделением линиями двойной толщины подмножества соответствующих блоков и связей.

На данной частной модели выделены все блоки и связи, принадлежащие путям передачи (активизирована соответствующая строка окна Навигатора).

Структурный анализ, выполненный программой CLASSiC-3, дает следующую информацию (табл.6).

Такой анализ может быть проведен в автоматизированном режиме для всех диагностируемых передач.

Обработав полученную информацию, составляем матрицу позиций элементов модели по отношению к передачам системы (табл.7).

В таблице упорядочены блоки и связи собственно системы MS , связи со средой на входе MFS и на выходе MSY .

Для получения обратного отношения «Симптом – Неисправность» выделяются классы эквивалентности по комбинациям передач. В итоге получаем табл.8.

В табл.8 символ «0» при номере передачи означает образование нулевого оператора передачи $\Phi \equiv 0$ из-за разрушения путей передачи; символ «0» при номере блока означает отключение (отказ) блока. Очевидно, что отказ связи – это ее отключение.

Заключение

Наличие сформированной таблицы обратного отображения «Симптом – Неисправность», где зафиксированы возможные комбинации дефектных передач, позволяет существенно повысить определенность в процессе обнаружения на объекте симптомов неисправностей и делает тривиальной задачу локализации подмножества объектов системы, ответственных за неисправность.

Для приведенного примера одиночные неисправности блоков и связей системы порождают 26 симптомов, различающихся комбинациями дефектных передач. 17 симптомов из 26 дают окончательное решение задачи локализации по модели топологического ранга, так как каждая из этих 17 комбинаций указывает на один свой элемент (блок или связь), являющийся источником неисправности.

Для остальных девяти симптомов необходимо выполнение последующего этапа расчета с доопределением модели системы до операторов и параметров блоков.

Предлагаемый подход к решению задачи обнаружения и локализации неисправности позволяет априори проанализировать варианты и условия возникновения неисправностей и их диагностируемости и может быть применен на этапе проектирования, что позволяет предусмотреть меры по повышению толерантности системы к возможным неисправностям [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем: Учебник. М., 2009. 352 с.

2. Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. Л., 1981.

3. Имаев Д.Х., Пошехонов Л.Б., Шевцов И.В., Шестопалов М.Ю. Структурный анализ в задачах диагностики сложных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Информатика, управление и компьютерные технологии. 2011. Вып.9.

4. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. М., 1963.

5. Программа для анализа структурных свойств и расчета характеристик сложных систем управления «Complex Linear Analysis and Structure Synthesis in Control, ver 3» (CLASSiC-3) / Д.А.Озеров, Л.Б.Пошехонов. ФГУ ФИПС. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012610177 от 10.01. 2012.

6. Разработка и исследование моделей ТП генерации паров ТНК как объектов управления / Д.Х.Имаев, И.В.Шевцов, М.Ю.Шестопалов // Сб. докл. 12-й междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, SCM'2009. СПб, 2009. Т.2.

7. Харари Ф. Теория графов. М., 1973.

8. Blanke M., Kinnaert M., Staroswiecki M., Schröder J. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. NY, NJ, 2004.

9. Isermann R. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY, 2006.

REFERENCES

1. Alekseev A., Korablev J., Shestopalov M. Systems identification and technical diagnostics. Moscow, 2009.

2. Vavilov A., Imaev D. Machinery methods of control systems calculation. Leningrad, 1981.

3. Structural analysis in complex systems diagnostics /D.Imaev, L.Poshekhonov, I.Shevtsov, M.Shestopalov // Per. Izvestia LETI. Edition 9. Serie «Informatics, control and computer science». Saint Petersburg, 2011.

4. Maisson S., Cimmermann G. Electronic circuits, signals and systems. Moscow, 1963.

5. Program for properties structural analysis and complex control systems calculation characteristics CLASSiC-3 / D.Ozerov, L.Poshekhonov. Registration № 2012610177 from 10.01. 2012.

6. Imaev D., Shevtsov I., Shestopalov M. Research and design of TP generation of steam TNK as control objects // Reports edition of 12th international conference on soft computing and measurement, Saint Petersburg, 2009.

7. Harry F. Graph theory. Moscow, 1973.

8. Blanke M., Kinnaert M., Staroswiecki M., Schröder J. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. NY, NJ, 2004.

9. Isermann R. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY, 2006.