

Доминирующими возмущающими воздействиями для РК являются изменения состава, расхода и температуры насыщенного абсорбента, давления в колонне. Устранить или значительно снизить влияние некоторых из этих воздействий можно с использованием локальных САР. Однако эти САР лишь косвенно влияют на процессы, происходящие в РК. Более подробно локальные САР описаны в [4]–[6].

Заметим, что регулирование концентрации абсорбента является наиболее сложной задачей. Это обусловлено взаимозависимостью составов дистиллята и абсорбента, а также большой инерционностью РК. Как правило, регулирование концентрации абсорбента производится по косвенному параметру – температуре в испарителе (или в нижней части РК). Этот метод основан на однозначной зависимости температуры кипения абсорбента от его концентрации при постоянном давлении. Такая САР может быть реализована на основе ММ (2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция – Десорбция» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 29–33.
2. Абрамкин С. Е., Грудяева Е. К., Душин С. Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 6. С. 35–40.
3. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Поляшова К. А. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 32–36.
4. Тараненко Б. Ф., Герман В. Т. Автоматическое управление газопромышленными объектами. М.: Недра, 1976.
5. Анисимов И. В. Автоматическое регулирование процесса ректификации. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1961.
6. Казаков А. В., Кулаков М. В., Мелюшев Ю.К. Основы автоматики и автоматизации химических производств. М.: Машиностроение, 1970.

*S. E. Abramkin, S. E. Dushin*

*PECULIARITIES OF CONTROL OF COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEMS «ABSORPTION-DESORPTION»*

*The article is devoted to peculiarities of the control of the complex technological systems «ABSORPTION-DESORPTION». We present the mathematical model of the controlled mass and heat exchange processes of the complex.*

**Control, mathematical model, absorption column, rectifying column, evaporator, condenser, mass exchange, heat exchange**

УДК 681.518.5+681.5

*Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов*

### **КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Разработан компьютерный имитатор в среде MATLAB/Simulink системы диагностики сигналов неисправностей на фоне помех. Процедуры обнаружения, локализации и идентификации неисправностей иллюстрируются на примере системы управления судового турбоагрегата.*

**Вибродиагностика, модель неисправности, сигнальный граф, частотная характеристика, локализация неисправности, регуляризация некорректных задач**

Вибрационная диагностика технического состояния объектов и процессов в режиме нормального функционирования является одной из наиболее информативных и, вместе с тем, нетривиальных процедур, требующих детального изучения условий прохождения

сигналов от источников их зарождения до точек измерения [1], [2]. Проектирование соответствующих систем технической диагностики начинается с выбора точек съема текущей информации, а также методов и алгоритмов обработки данных по формированию диагностических признаков неисправностей. В последние десятилетия усилилось внимание к созданию систем управления, толерантных к неисправностям [3]–[6]. Это ставит перед проектировщиками новые задачи по выбору компонентов систем технической диагностики, подстройка и реконфигурация взаимосвязей которых обеспечивают временное сохранение работоспособности диагностируемых комплексов.

Структурные и матричные условия обнаружения, локализации и идентификации неисправностей сложных систем обсуждаются в [7], [8]. В работе [9] предложен метод коррекции топологии сложных систем, базирующийся на оценке функций чувствительности определителя графа. Методы теории чувствительности в технической диагностике процессов управления обсуждаются в [10]. Решение перечисленных задач упрощается, если на ранних этапах проектирования систем технической диагностики провести компьютерные эксперименты, результаты которых позволят обоснованно выбрать топологию информационной части и структуру алгоритмов систем технической диагностики.

Далее рассматривается пример компьютерного моделирования процесса диагностирования неисправностей в виде периодических сигналов. Математическая модель диагностируемой системы представлена в форме сигнального графа или структурной схемы. Заданы множества потенциальных входов и точек измерения. Предполагается, что система управления в режиме нормальной эксплуатации подвержена влиянию случайных воздействий среды, которые моделируются белым шумом. Пусть в заранее неизвестный момент на один из входов диагностируемой системы начинает воздействовать сигнал неисправности гармонической формы. В результате обработки данных измерений переменных системы требуется *обнаружить* факт и время начала воздействия неисправности. Далее необходимо оценить частоту воздействия, а также амплитуды реакций различных выходов системы на сигнал неисправности. Затем инициируются следующие фазы процесса диагностирования — *локализация* точки воздействия и *идентификация* его амплитуды.

**Компьютерный имитатор процесса вибродиагностики.** В качестве примера рассматривается система управления частотой вращения судового турбоагрегата [4]. На рис. 1 приведена компьютерная модель диагностируемой системы управления на языке графического редактора программы MATLAB/Simulink, а на рис. 2 раскрыта структура привода клапана регулирования давления пара KRD. Штатные стохастические изменения момента сопротивления на валу винта регулируемого шага в режиме нормальной эксплуатации имитируются как нормальный белый шум с ограниченной полосой частот от источника Band-Limited White Noise. Полоса частот шума определяется параметром Sample time, а его интенсивность — Noise power. Эти параметры подлежат настройке с учетом конкретного объекта диагностирования и условий его функционирования.

К выходам системы (рис. 1) подключен DETECTOR — устройство обнаружения сигнала неисправности. Для локализации точки приложения сигнала неисправности, а также идентификации его амплитуды служит блок LOCALIZATION.

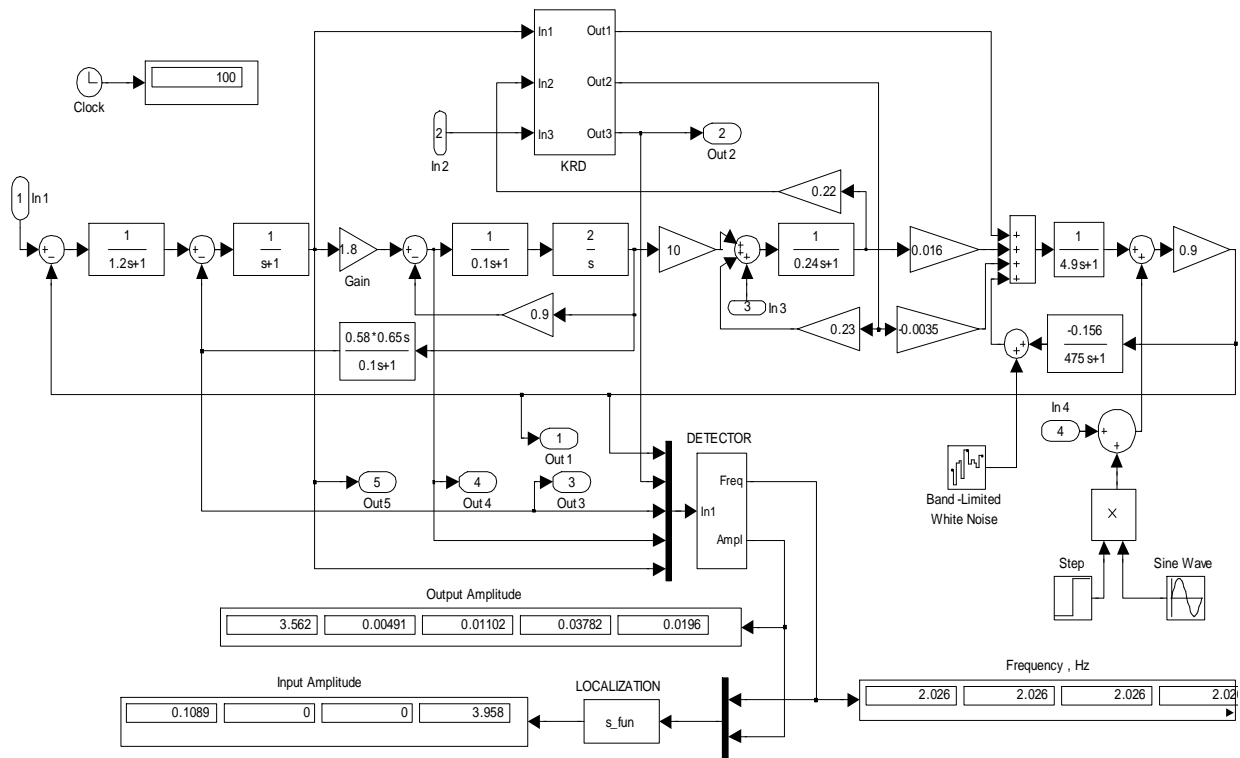


Рис. 1

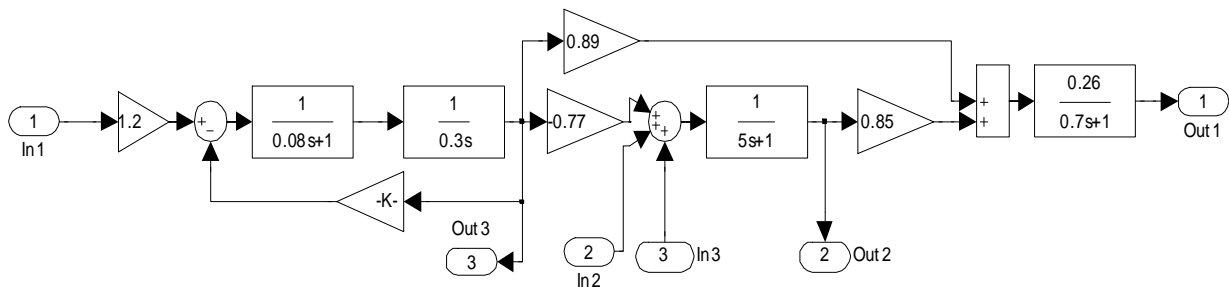


Рис. 2

Неисправность в виде гармонического сигнала, действующего на вал турбины, имитируется блоком Sine Wave. Время наступления неисправности задается блоками умножения и источником ступенчатых сигналов Step, в котором установлен параметр Step Time.

**Имитатор устройства обнаружения неисправности.** На рис. 3 раскрыта структура подсистемы DETECTOR, позволяющей обнаруживать сигнал неисправности, а также оценивать его частоту в герцах и амплитуды реакции системы. Устройство обнаружения сигнала неисправности состоит из квантователя сигнала Quantizer, буфера Buffer и блока Magnitude FFT, реализующего операцию быстрого преобразования Фурье. В квантователе уровня сигнала и дискретизации времени назначаются параметры: уровни квантования сигнала Quantization interval и Sample time =  $T_s \text{Quant}$ , причем параметры подбираются в процессе настройки системы к конкретному объекту диагностирования. В буфере задается длина отрезка последовательности данных, подвергаемых обработке. Размер выборки буфера (Output buffer size) также необходимо выбрать при настройке системы. Обозначим этот параметр lbuff.

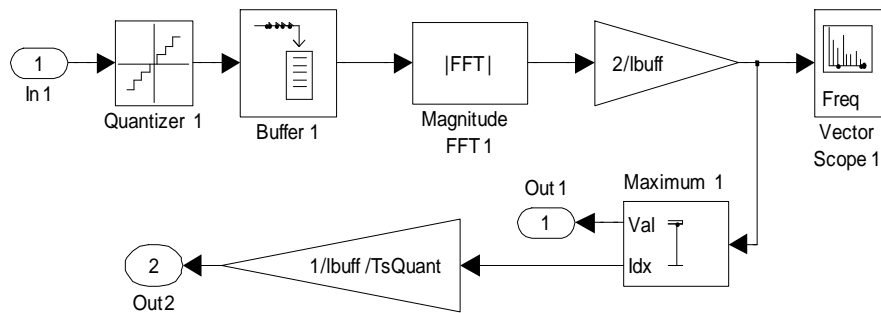


Рис. 3

В блоке Magnitude FFT выборки данных длиной  $l_{buff}$  подвергаются операции быстрого преобразования Фурье, в результате которой на выходе блока появляются значения амплитуд сигналов различной частоты. Максимальное значение амплитуды в спектре интерпретируется как реакция на сигнал неисправности и выделяется блоком Maximum, который на выходе 1 (Val) выдает значение амплитуды. На другом выходе блока Maximum появляется параметр Idx, по которому можно вычислить частоту составляющей (в герцах) с максимальной амплитудой по формуле

$$f = Idx / (L_{buff} \cdot T_{sQuant}).$$

Эту операцию выполняет блок-усилитель. Таким образом, на выходе 2 подсистемы должна появляться частота сигнала неисправности.

Блок Vektor Scope визуализирует амплитудный спектр сигнала. Результаты оценки амплитуд и частоты сигнала высвечиваются в блоках Display в цифровом виде (рис. 1), а также могут быть переданы в рабочее пространство программы для дальнейшей обработки с целью локализации и идентификации неисправности.

**Имитация процесса обнаружения неисправности.** Пусть на один из входов системы на десятой секунде (параметр Step Time = 10) действует сигнал неисправности единичной амплитуды с частотой 2 Гц (12.5664 рад/с). Для проверки работоспособности системы диагностирования и настройки параметров рассмотрим ситуацию при отсутствии шума. Выберем длительность имитации 100 с.

Факт обнаружения неисправности блоком DETECTOR проявляется на дисплеях, показывающих значение частоты и амплитуды реакций (рис. 1). Кроме того, в окне блока Vektor Scope, визуализирующего результаты обработки данных блоком Magnitude FFT (рис. 3), появляется явно выраженный пик амплитуды выхода 1 на соответствующей частоте (рис. 4, а). Значение частоты показано на дисплее Frequency и равно 2.026 Гц. Значения амплитуд гармонических составляющих измеряемых переменных (показания дисплеев Output Amplitude):

$$a_1 = 3.562; a_2 = 0.00491; a_3 = 0.01102; a_4 = 0.03782; a_5 = 0.0196.$$

Для сравнения приведем точные значения амплитуд реакций системы, вычисляемые по командам приведения модели к форме пространства состояний:

```
[A,B,C,D] = linmod2('gtza_noise');
```

```
sys_noise = ss(A,B,C,D);
```

вычисления матрицы усиления на частоте сигнала

$M = \text{abs}(\text{freqresp}(\text{sys\_noise}, 12.5664))$ .

Введем в рабочее пространство программы вектор амплитуд входа

$f = [0 \ 0 \ 0 \ 4]'$

и вычислим вектор амплитуд реакций

$a = M*f$

$a_1 = 3.600; a_2 = 0.0049; a_3 = 0.0112; a_4 = 0.0382; a_5 = 0.0198$ .

Введем в систему помехи, имитирующие штатные условия эксплуатации в виде нормального белого шума с ограниченной полосой частот от источника Band-Limited White Noise — выберем параметр Noise power = 0.1. На рис. 4, б приведено окно блока DETECTOR; видно, что спектр несколько «размазан». Частота сигнала неисправности определяется с прежней точностью, а значения амплитуд (показания дисплеев Output Amplitude): 3.562; 0.0785; 0.0128; 0.07369; 0.05075. Идентифицированные амплитуды сигнала неисправности: 1.941; 0; 0; 3.957 (вместо 0; 0; 0; 4).

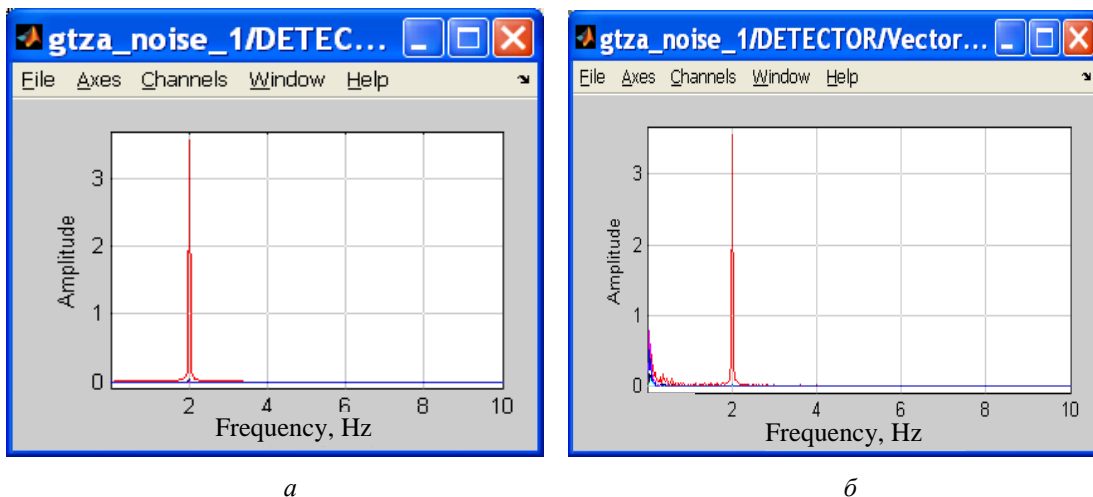


Рис. 4

При интенсивных помехах Noise power = 1 диагностируется то же значение частоты, а амплитуды реакций (показания дисплеев Output Amplitude) равны: 3.561; 0.2479; 0.004038; 0.05472; 0.1602. Большие ошибки оценивания амплитуд наблюдаются на тех выходах, где малы уровни полезного сигнала. Идентифицированные амплитуды сигнала входа, т. е. сигнала неисправности: 9.252; 0; 0; 0.1602.

***Имитация процедур локализации и идентификации сигнала неисправности.***

Устройство LOCALIZATION (см. рис. 1) реализовано в виде блока S-Function и решает систему линейных алгебраических уравнений относительно искомым амплитуд  $f$  сигналов неисправностей по команде

$$f = M \setminus a,$$

которая вызывает программу решения систем переопределенных уравнений методом псевдообращения матрицы. Дополнительно к данным об амплитудах реакций  $a$ , доставляемым блоком DETECTOR, необходимо привлечь информацию о диагностируемой системе в виде матрицы  $M$  значений амплитудно-частотной характеристики.

В результате процедуры компьютерной имитации на выходе блока LOCALIZATION отображаются значения амплитуд предполагаемых сигналов неисправности на различных входах. Если задача решена правильно, то дисплей одного из входов показывает амплитуду сигнала.

Ряд задач предварительного исследования систем технической диагностики может быть решен с помощью компьютерной имитации процедур обнаружения, локализации и идентификации неисправностей. Предложены имитаторы устройств обнаружения сигналов неисправностей и локализации их источников. Локализация и оценка значения амплитуды сводятся к решению систем линейных алгебраических уравнений с действительными или комплексными матрицами. Известно, что в большинстве случаев численных решений систем уравнений не существует, а если существуют, то неустойчивы в вычислительном смысле [8]. Некорректно поставленные задачи непосредственно не могут быть решены классическими методами вычислительной математики, так как малые вариации данных могут привести к сколь угодно сильно отличающимся результатам. Следует разработать имитатор локализации и идентификации неисправности, реализующий методы регуляризации некорректных задач [11].

Результаты исследований иллюстрируются на примере системы управления турбоагрегата, однако могут быть применены к задачам технической диагностики любых динамических систем, модели которых представлены в виде сигнальных графов и структурных схем.

Авторы благодарят канд. техн. наук И. В. Шевцова за помощь в компьютерной реализации блока локализации и идентификации сигнала неисправности LOCALIZATION и инж. Д. В. Миненкова за помощь в разработке блока обнаружения неисправности ДЕТЕКТОР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев В. А., Ройтман А. Б. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы. М.: Машиностроение, 1986.
2. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009.
3. Frank P., Marcu T. Diagnosis Strategies and System: Principle, Fuzzy and Neural Approaches. Intelligent Systems and Interfaces. Boston, MA: Kluwer, 2000.
4. Blanke M., Kinnaert M., Staroswiecki M., Schröder J. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. NY, NJ: Springer-Verlag, 2004.
5. Isermann R. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY: Springer-Verlag, 2006.
6. Isermann R. Fault Diagnosis Applications—Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant Systems. Springer, 2011.
7. Структурный анализ в задачах диагностики сложных систем / Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов, И. В. Шевцов, М. Ю. Шестопалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 65–72.
8. Имаев Д. Х., Шестопалов М. Ю. Топологические и матричные условия локализации неисправностей систем управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 5. С. 36–44.
9. Вавилов А. А., Имаев Д. Х., Пошехонов Л. Б. Метод коррекции контурной части сложных систем, базирующийся на оценке функций чувствительности определителя графа // Вопр. теории систем автоматического управления: Сб. ст. Ленингр. гос. ун-та. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. С. 75–84.
10. Имаев Д. Х., Шестопалов М. Ю. Методы теории чувствительности в технической диагностике процессов управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 5. С. 44–53.
11. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.

*Is designed the computer simulator of fault message diagnostic on the interference background in MATLAB/Simulink environment. The detection, localization and identification of faults are illustrated by marine turbine control system.*

**Vibrodiagnostics, fault model, signal graphs, frequency response, fault localization, the regularization of ill-posed problems**

УДК 681.518.54:572.983

*А. Ю. Дорогов, В. С. Абатуров*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ОБОБЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*Представлена системная модель процесса распознавания образов. Определено понятие невырожденной схемы распознавания. Предложен метод измерения обобщающей способности нейронных сетей, пригодный при малых объемах обучающих выборок. Приведена методика проведения эксперимента. Показаны результаты измерения обобщающей способности для нейронных сетей прямого распространения.*

**Нейронная сеть, обобщающая способность, разделяющая мощность, системная модель**

Определяющей оценкой качества нейронных сетей прямого распространения является их способность к распознаванию образов. Нередко приходится сталкиваться с тем обстоятельством, что нейронная сеть безошибочно распознает образы обучающей выборки, но ошибается на образах контрольной выборки. В этом случае говорят, что нейронная сеть имеет недостаточную обобщающую способность. Вопросы оценки обобщающей способности для задач распознавания образов исследовались в [1],\* где обобщающая способность оценивалась вероятностью правильного распознавания образа, не принадлежащего обучающей выборке. Полученные результаты оказались весьма приближенными и для экспериментального подтверждения требовали больших объемов обучающих выборок. В данной статье рассматриваются детерминистские методы экспериментальной оценки обобщающей способности нейронных сетей с использованием обучающих выборок малого объема.

**Системная модель процесса распознавания образов.** Обобщенная модель системы распознавания образов [2] представлена на рис. 1. Элементам модели сопоставляются следующие смысловые понятия:  $U$  – множество распознаваемых образов (генеральная совокупность);  $D$  – множество информативных признаков;  $C$  – множество классов образов. Тогда отображение  $\mu$  можно интерпретировать как систему измерения информативных признаков, отношение  $\rho$  – как решающее правило, а отношение  $\varepsilon$  – как экспертную классификацию образов.

В практических реализациях система распознавания обучается на конечном наборе образов  $t \subset U$ , который является некоторой выборкой из генеральной совокупности. В этом случае мнение экспертов определяется отношением  $\varepsilon_t \subset \varepsilon$ . Будем полагать, что

---

\* Воронцов К. В. Лекции по теории обобщающей способности. 21 декабря 2007 г. <http://www.ccas.ru/voron/download/Generalization.pdf>.