

Benchmark-модель системы из трех резервуаров для исследования отказоустойчивых систем управления

Ю. А. Кораблев¹, Д. М. Лосева², Н. В. Федоров³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹juri.korablev@gmail.com, ²ldm169@yandex.ru, ³yaneochenboy@gmail.com

Аннотация. Отказоустойчивое управление совмещает методы обнаружения неисправностей и локализации неисправностей с супервизорным управлением, для того чтобы достигнуть обнаружения неисправностей до того, как они перерастут в отказы. В то время как методы обнаружения неисправностей и локализации известны достаточно давно распространение методов диагностики на обеспечение отказоустойчивого управления является довольно новой областью. В данном докладе представлена тестовая, benchmark-модель в качестве объекта исследования, что должно быть полезно в качестве платформы для разработки новых идей и сравнения методов отказоустойчивого управления. Benchmark-модель позволяет моделировать режим нормальной работы системы и возникновение различного рода неисправностей в реальном масштабе времени для практического апробирования разработанных исследователями алгоритмов диагностики и обеспечения отказоустойчивого управления.

Ключевые слова: *Fault-tolerant control; обнаружение, локализация и идентификация неисправностей; отказоустойчивое управление; SIMULINK-модель системы из трех резервуаров*

I. ВВЕДЕНИЕ

За последние четыре десятилетия обнаружение и диагностика неисправностей на основе моделей достигли значительного прогресса. Можно утверждать, что подход на основе моделей практически доминирует в области мониторинга и диагностики систем управления с момента своего появления.

Основанный на модели подход имеет следующие преимущества. Во-первых, по сравнению с методом предсказания на основе модели, влияние управляющего фактора можно не учитывать. Во-вторых, модель, предназначенная для управления, может использоваться и для обнаружения неисправностей. В-третьих, для диагностики не требуется никакого предшествующего опыта. Наконец, подход позволяет обнаруживать неисправности датчиков и иметь дело с изменяющимся во времени системами. Все это побуждает к исследованию новых эффективных диагностических методов.

В докладе предложена benchmark модель, иллюстрирующая основанный на модели диагностический подход. В среде Simulink разработана и практически реализована математическая модель типовой системы из трех резервуаров. В benchmark модели могут моделироваться различные типы неисправностей. Блок диагностики реализуется также в форме Simulink блоков. При работе с benchmark моделью исследователь может глубоко изучить процедуру диагностического подхода на основе модели, генерации ошибок и порогового способа обнаружения и диагностики неисправностей. Не требуется никакого специального оборудования, исследователь может объективно оценить процедуру обнаружения, локализации и идентификации неисправностей.

Как показано на рис. 1, диагностическая система обладает аналитической избыточностью [1].

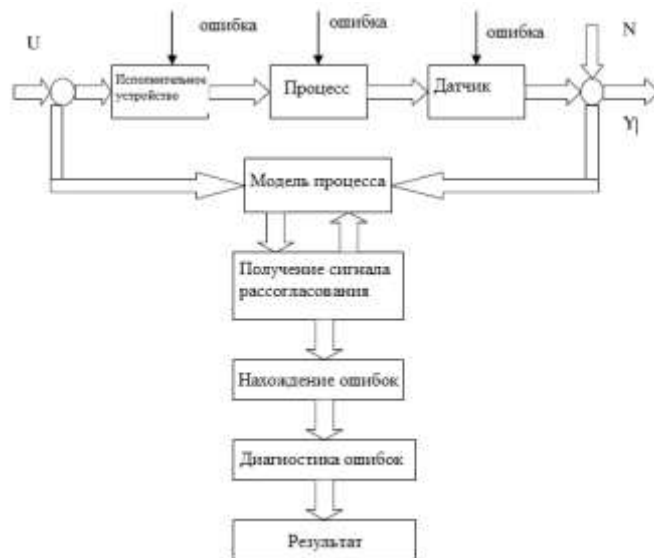


Рис. 1. Диагностика на основе модели

В большинстве случаев аналитическая избыточность можно рассматривать как модель, которая работает параллельно с реальной системой. В нормальных условиях выходные данные модели должны быть такими же, как и у

реальной системы, и в противном случае это может быть признаком возникновения неисправности. Разница между выходом модели и фактическим выходом системы представляет собой ошибку. Процесс расчета ошибки называется генерацией ошибки. Ошибка используется для обнаружения неисправности, если она возникает в системе. Если ошибка не превышает заранее заданного порогового значения, система считается исправной. Как только ошибка превысит порог, в системе может произойти сбой, и диагностическая схема отправит сигнал тревоги о неисправности. Этот шаг называется обнаружением неисправностей. После того как ошибка обнаружена, можно проводить локализацию и идентификацию неисправности.

II. BENCHMARK МОДЕЛЬ

Система из трех резервуаров, показанная на рис. 2, выбрана как benchmark модель по следующим причинам. Это реалистичное физическое представление многих механических и химических процессов [2] [3], и несмотря на ее сложность в плане разработки алгоритмов управления и основанных на модели алгоритмов диагностики может быть при желании воспроизведена как физическая модель в лаборатории. Кроме того, эта система является нелинейной системой, что позволяет продемонстрировать на линеаризованной модели изучаемые подходы и при необходимости расширить и усложнить нелинейную модель. Следовательно, benchmark модель удобна для тех, кто хочет разработать свои собственные алгоритмы в этой предметной области.

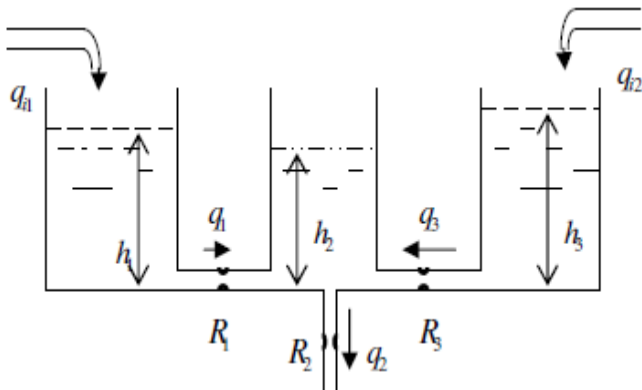


Рис. 2. Система из трех резервуаров

На рис. 2 показан также принцип работы системы с тремя резервуарами. Через два входа на баке 1 и баке 3 подаются два потока воды q_{i1} и q_{i2} отдельно. Три резервуара соединены с двумя трубами с сопротивлениями R_1 и R_3 для ограничения расхода Q_1 и Q_3 . Жидкость (q_2) может выходить только через выпускную трубу под резервуаром 2 с сопротивлением R_2 . Высоты h_1 , h_2 и h_3 резервуаров берутся как переменные состояния, так и наблюдаемые переменные.

Неисправности, которые моделируются в этой benchmark модели – это резкие импульсные помехи в резервуарах, засоры в соединительных трубах и утечки в

резервуарах, а также отказы датчиков. Benchmark модель позволяет исследователям моделировать и другие неисправности, если они этого хотят.

III. МОДЕЛЬ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

В соответствии с законами движения жидкости линеаризованная модель системы с тремя резервуарами может быть задана следующим образом [3].

$$q_{i1} - q_1 = S_1 \frac{d}{dt} h_1 = q_{i1} - \frac{h_1 - h_2}{R_1}$$

$$q_{i2} - q_3 = S_3 \frac{d}{dt} h_3 = q_{i2} - \frac{h_3 - h_2}{R_3}$$

$$q_1 + q_3 - q_2 = S_2 \frac{d}{dt} h_2 = \frac{h_1 - h_2}{R_1} + \frac{h_3 - h_2}{R_3} - \frac{h_2}{R_2};$$

где S_1 – площадь поперечного сечения первой емкости, S_2 – площадь поперечного сечения второй емкости, S_3 – площадь поперечного сечения третьей емкости.

Матрица входных переменных U :

$$U^T = [u_1 \quad u_2]^T = [q_{i1} \quad q_{i2}]^T$$

Как упоминалось ранее, переменными состояниями и наблюдаемыми переменными являются уровни воды во всех трех резервуарах:

$$X^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]^T$$

$$Y^T = [y_1 \quad y_2 \quad y_3]^T = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]^T$$

Модель может быть представлена в форме пространства состояний

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t)$$

$$Y(t) = CX(t)$$

с $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$. Это система управления с 2 входами и 3 выходами. Матрицы A , B , C равны

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{S_1 R_1} & \frac{1}{S_1 R_1} & 0 \\ \frac{1}{S_2 R_1} & -\frac{1}{S_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) & \frac{1}{S_2 R_3} \\ 0 & \frac{1}{S_3 R_3} & -\frac{1}{S_3 R_3} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_3} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

IV. SIMULINK МОДЕЛЬ

Simulink – это очень мощная платформа для моделирования и управления системой. Он имеет преимущества объектного представления и удобен в использовании. Таким образом, он широко применяется во многих системах управления моделирования и проектирования. На рис.3 показана Simulink модель системы с тремя резервуарами. Параметры модели приведены в табл. 1.

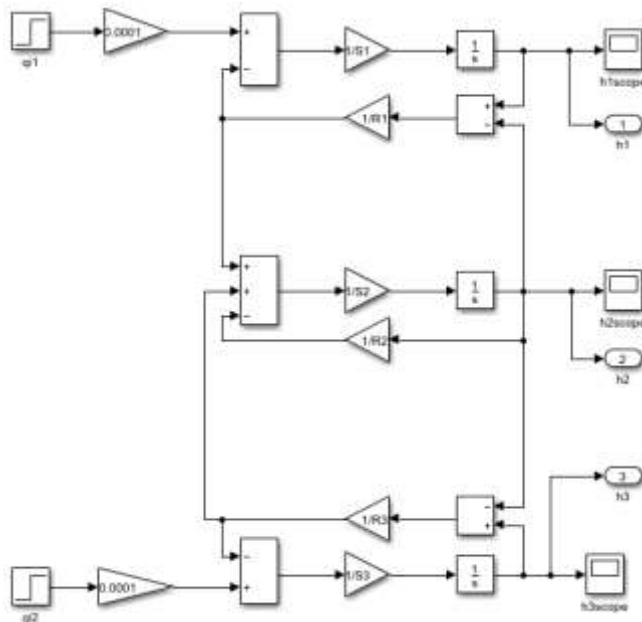


Рис. 3. SIMULINK модель системы из трех резервуаров

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Параметр	$S_1(m^2)$	$S_2(m^2)$	$S_3(m^2)$
Значение	7.07e-4	1.3e-3	4.91e-4
Параметр	$R_1(sec/m^2)$	$R_2(sec/m^2)$	$R_3(sec/m^2)$
Значение	1.724e4	1.e4	2.33e4

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМЫ

В Simulink модели моделируются четыре типа неисправностей, упомянутых ранее. Первый из них – это резкое нарушение типа возмущений (ADF). Этот тип неисправности может возникнуть в любом резервуаре и привести к изменениям уровня жидкости. Второй тип неисправности – это утечка (LF), которая также может возникнуть в любом из трех резервуаров и вызывать снижение уровня жидкости ниже контролируемого уровня. Третий тип неисправности – это закупорка или частичная закупорка в трубах, соединяющих резервуары, эта неисправность называется неисправностью блокировки труб (PBF). Четвертый тип неисправности, который может произойти, – это сбой датчика (SF), который приведет к ложному результату мониторинга. Все эти неисправности могут быть практически реализованы в Simulink с помощью различных переключателей, как показано на рис. 4.

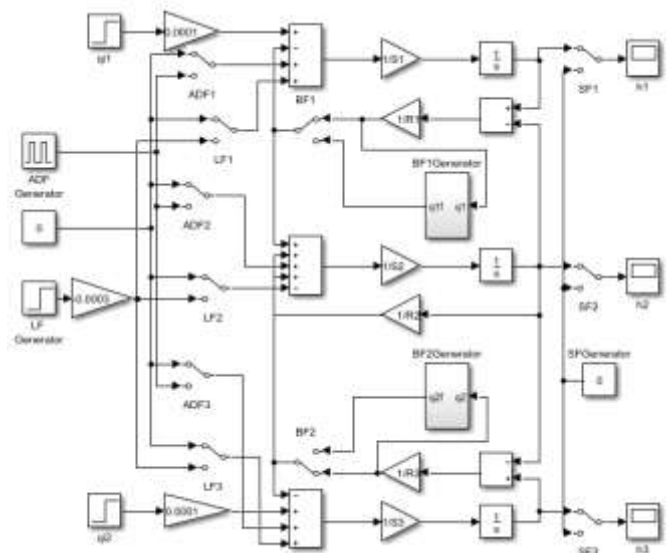


Рис. 4. SIMULINK модель системы из трех резервуаров с неисправностями

На рис. 4 представлено 11 переключателей: переключатели P1-P3 предназначены для резких возмущений, переключатели L1-L3 – для утечек, переключатели S1-S3 – для неисправностей датчиков, а переключатели B1 и B2 – для засорения труб. Каждый переключатель имеет два состояния, одно для нормального состояния (ВЫКЛ), а другой для неисправного состояния (ВКЛ). В табл. 2 показаны состояния этих 11 переключателей и соответствующие им неисправности, «+» и «-» в табл. 2 относятся к состояниям «ВКЛ» и «ВЫКЛ» соответственно. Все 11 переключателей обозначены на рис. 4. Они могут быть включены самостоятельно для реализации одной ошибки или в сочетании для имитации сложных ошибок. Кроме того, некоторые генераторы, такие как генератор импульсов, например, используются для моделирования сбоев. Изменение коэффициента усиления входного сигнала ошибки изменит степень серьезности этой ошибки.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ИМ НЕИСПРАВНОСТИ

Переключатели	Резервуар 1		Резервуар 2		Резервуар 3	
	Протечка	Возмущения	Протечка	Возмущения	Протечка	Возмущения
ADF1	-	+	-	-	-	-
ADF2	-	-	-	+	-	-
ADF3	-	-	-	-	-	+
LF1	+	-	-	-	-	-
LF2	-	-	+	-	-	-
LF3	-	-	-	-	+	-
Переключатели	Блокировка труб			Ошибка датчика		
	1	3	1	2	3	
BF1	+	-	-	-	-	
BF2	-	+	-	-	-	
SF1	-	-	+	-	-	
SF2	-	-	-	+	-	
SF3	-	-	-	-	+	

VI. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ДИАГНОСТИКА

Для тестирования benchmark модели используется метод, основанный на банке диагностических моделей. Особенностью этого подхода является то, на каждое состояние системы генерируется своя модель (модели неисправностей/нарушений), т.е. число моделей в банке равно числу возможных неисправностей в системе. В данной работе насчитывается 11 ошибок, возможных в системе. Это значит, что банк моделей насчитывает 11 моделей неисправностей. При отклонении сигнала рассогласования от 0 системе поступает сигнал о наличии нештатного состояния, после чего запускается механизм локализации ошибки. Выходной сигнал диагностической модели сравнивается с выходным сигналом каждой модели неисправностей из банка, находя максимально близкое соответствие (минимальные отклонения сигнала рассогласования) и тем самым получая точные сведения о типе неисправности в системе. Наглядно принцип действия метода показан на рис. 5.

Здесь y – выходные сигналы моделей, u – входной сигнал моделей, e – сигналы рассогласования моделей.

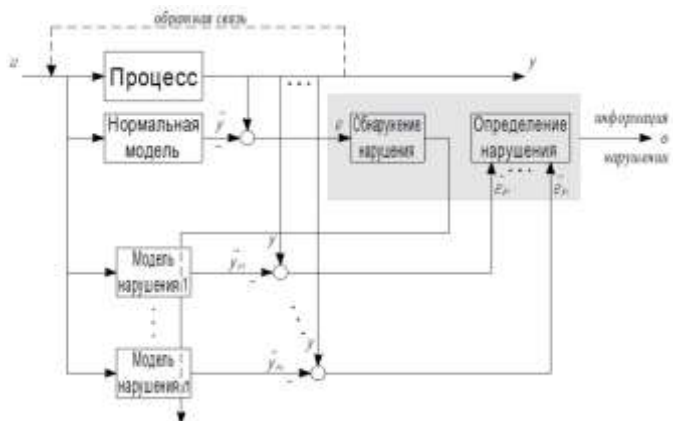


Рис. 5. Принцип действия метода, основанного на банке
диагностических моделей

В качестве примера можно привести устройство модуля локализации ошибок первого резервуара (рис. 6). 4 подсистемы, содержащие в названии приписку ModelTank1, это модели неисправностей, возникающих в первом резервуаре. Каждому состоянию системы присваивается уникальный номер: 0 – нормальный режим работы, 1 – внезапные возмущения в первом резервуаре, 2 – протечка в первом резервуаре, 3 – блокировка первой соединительной трубки, 4 – ошибка датчика в первом резервуаре. Ошибки выводятся на индикатор.

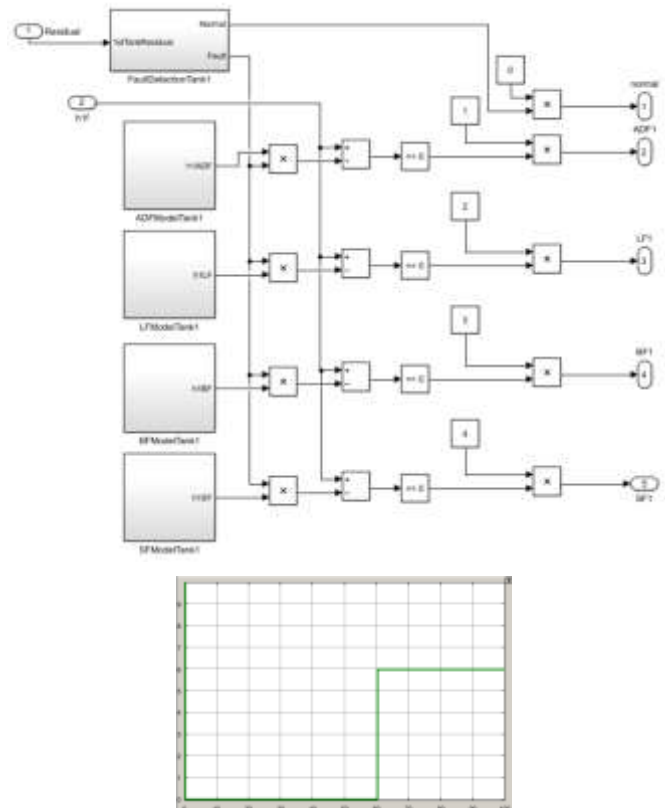


Рис. 6. Блок диагностики и индикатор ошибок первого резервуара

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Isermann R. (2005). Model-based fault detection and diagnosis – status and applications, Annual Review of Control, Vol. 29, pp. 71-85.
- [2] Dorf Richard C., Richard Carl (1998). Modern control systems, 7th edition, Addison-Wesley
- [3] J. Schwarzenbch, and K. F. Gill, (1986). System modelling and control, Edward Arnold.
- [4] Черных И. Simulink. Среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ, 2004. 491 с.
- [5] Ануфриев И., Смирнов А., Смирнова Е. MATLAB 7.0. В подлиннике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.