

УДК 622.817: 621.311

В.Н. Матвеев

НАБЛЮДАЕМОСТЬ И УПОРЯДОЧЕННОСТЬ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ

Проведенный анализ травматизма и аварийности при эксплуатации шахтных систем электроснабжения показал, что одними из системных характеристик, определяющих безопасность функционирования, являются наблюдаемость и упорядоченность структуры систем [1]. Принято считать, что система безопасна, если каждое возможное ее состояние прогнозируемо, а неисправные состояния системы приводят к немедленному прекращению ее функционирования [2].

Понятие «наблюдаемости системы» (введенное Р. Калманом) является внутренним структурным свойством системы и применяется по отношению к ней, если по измерениям выходных сигналов можно определить состояние данной системы [3].

Рассмотрим математическую модель системы с управляющими воздействиями, которая может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} x(k) &= A x(k-1) + B u \\ y(k) &= C x(k) \end{aligned} \quad (1)$$

где $y(k)$ – вектор-столбец сигналов наблюдения i -х элементов системы ($i = 1, 2, \dots, n$); $x(k)$ – вектор-столбец внутренних параметров системы; u – вектор-столбец управляющих воздействий; A - матрица системы; B - распределительная матрица; C - матрица наблюдений; $k, k-1 \dots$ - шаги интегрирования.

Коэффициенты матрицы системы описывают изменения параметров элементов системы во времени, коэффициенты распределительной матрицы описывают изменение возмущающих воздействий на систему.

Согласно теореме Р. Калмана [3], система является полностью наблюдаемой, когда ранг матрицы

$$\text{rank } K = \text{rank}[C^T, A^T C^T, (A^T)^2, \dots, (A^T)^{n-1} C^T] \quad (2)$$

равен порядку системы n , в условиях неполной наблюдаемости $\text{rank } K < n$.

Сигнал наблюдения y_i в системе образуется при оценке внутренних параметров x_j системы в различные моменты времени, как это показано на рис. 1, а. Наблюдаемый сигнал y_i в общем случае определяется через выходные (входные) сигналы элементов системы по формуле:

$$y_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j,$$

где n – общее количество учитываемых параметров; c_{ij} - частичные передаточные коэффициенты от j -го параметра системы x_j к i -му регистрирующему устройству наблюдателя.

Для оценки степени наблюдаемости системы используются не величины внутренних параметров, а лишь сама возможность их потенциального наблюдения, определяемая соединением входов (выходов) элементов системы с регистрирующими устройствами.

Наиболее полно структура системы может быть отражена с помощью ориентированного графа, вершины которого соответствуют элементам системы, ребра – ориентированным связям. Каждое ребро графа соединяет выход одной вершины с входом другой. Число всех подходящих к вершине ребер назовем входной связностью вершины, а всех отходящих – выходной связностью вершины.

Под понятием «наблюдаемость элемента» будем понимать входную связность соответствующей ему вершины графа системы. Общая наблюдаемость структуры системы со-

стоит из совокупности наблюдаемостей ее отдельных элементов, т.е. под понятием «наблюдаемость структуры» понимается насыщенность соответствующего ей графа путями - конечными чередующимися последовательностями вершин и ребер вдоль их направлений. Чем больше путей в графе системы, тем выше потенциальная возможность определения технического состояния каждого из элементов и системы в целом.

Таким образом, структурный сигнал наблюдения за элементом совмещен с соответствующей вершиной графа структуры при абстрагировании от существа внутренних сигналов (как и при определении наблюдаемости системы).

Знание структурного сигнала наблюдения позволяет контролировать прохождение информационных сигналов по структуре. В частности, для обеспечения безопасности функционирования системы необходима реализация функции самоидентификации ее элементов. Обладать данной функцией элемент может, например, при его охватывании обратной связью. В то же время центральный элемент сложной системы (человек, блок управления технической системы) с помощью обратных связей (информационных каналов) должен контролировать состояние периферийных элементов и при необходимости блокировать работу неисправных элементов системы. Для описания неизменной во времени структуры стационарной системы при отсутствии внешних воздействий (возмущающих и управляющих) достаточно матричного уравнения

$$y(k) = M x(k), \quad (3)$$

где $y(k)$ – вектор-столбец сигналов наблюдения за структурой; $x(k)$ - вектор-столбец единич-

ных внутренних параметров элементов; $M=[m_{ij}]$ - матрица, характеризующая постоянную во времени входную связность элементов структуры системы.

Понятие «наблюдаемость структуры» системы пояснено с помощью схемы, приведенной на рис. 1, б. Система уравнений наблюдения следующая:

$$\begin{cases} y_1 = m_{11}x_1 + m_{12}x_2 + m_{13}x_3 \\ y_2 = m_{21}x_1 \\ y_3 = 0. \end{cases}$$

Коэффициенты передачи наблюдения m_{ij} принимают значения «0» (при отсутствии связи от j -го элемента к i -му) или «1» (при наличии такой связи). Параметры x_j представляют в данном случае элементы единичной матрицы.

Структурный i -й сигнал наблюдения в общем случае определяется по формуле:

$$y_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{S_M} m_{ij}x_j + m_{ii}x_i,$$

где S_M - количество вершин графа; m_{ij} - коэффициент передачи наблюдения за j -м входом i -го элемента; m_{ii} - коэффициент передачи наблюдения за i -м входом i -го элемента.

Учитывая уравнения (1) и (3), выражение (2) для неизменной структуры упрощается: за показатель наблюдаемости структуры принимается ранг матрицы M , которая является транспонированной матрицей смежности вершин после замены ненулевых элементов матрицы M на единицу.

Чем разветвленнее структура системы, чем больше в ней циклов (замкнутых путей по прямым и обратным связям), тем выше наблюдаемость структуры системы. С другой стороны, перенасыщенность связями может привести к излишнему дублированию, сбоям и ненадежной работе системы, а следовательно, к снижению наблюдаемости структуры.

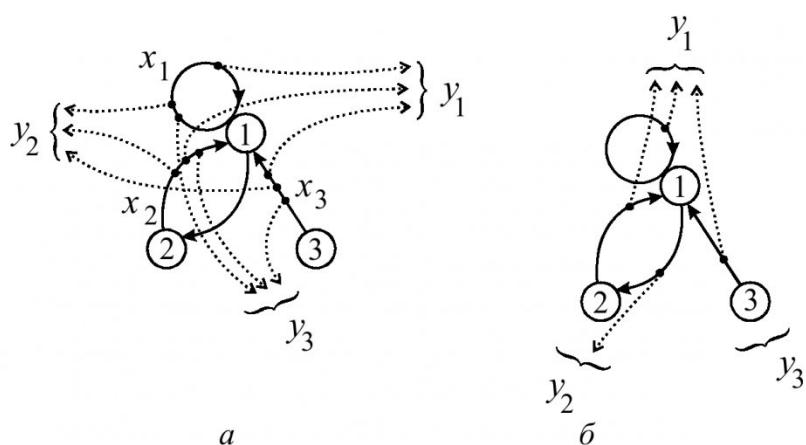


Рис. 1. Пояснение понятия наблюдаемости: а – системы, б – структуры системы

Для полностью наблюдаемой структуры системы ранг матрицы M равен числу элементов. С точки зрения безопасности полную наблюдаемость структуры системы можно определить как возможность центрального элемента системы контролировать с помощью имеющихся информационных обратных связей состояние периферийных элементов, обладающих, в свою очередь, функцией самоуправления. При полной наблюдаемости центральный элемент может получить информационный сигнал о состоянии каждого элемента системы (этому в полной мере соответствует иерархическая структура).

Повышение уровня наблюдаемости структуры за счет увеличения количества циклов способствует возрастанию упорядоченности структуры, при этом возникает граф, насыщенный

циклами с равномерным распределением ребер между вершинами, что подразумевает возникновение симметричных сотовых ячеек графа.

Упорядоченность структуры системы можно рассчитать по формуле:

$$G = \frac{\text{rank } M}{S_M} H(p),$$

где $H(p)$ - энтропия графа системы, увеличивающаяся при равномерном распределении ребер между его вершинами [4].

Максимальная упорядоченность возникает при полной наблюдаемости графа системы с большим количеством вершин:

$G_M = \log_2 S_M$, обеспечивая полную децентрализацию структуры.

Безопасность упорядоченных структур объясняется снижением количества связей человека-оператора с остальными элементами, а также взаимоза-

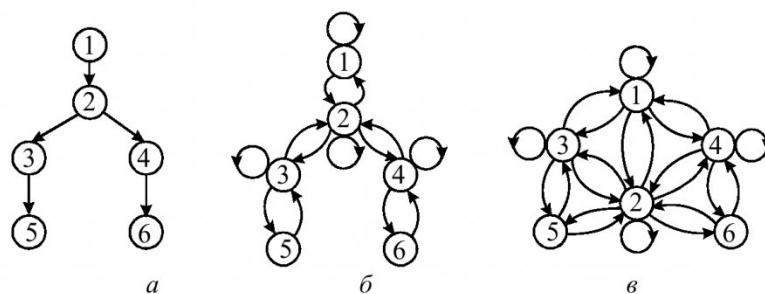


Рис. 2. Примеры усложняющихся графов системы электроснабжения: а – граф без обратных связей ($\text{rank } M=4$, $H(p)=1.96$, $G=1.307$), б – граф с контролем одного уровня иерархии ($\text{rank } M=5$, $H(p)=2.4$, $G=2$), в – граф с контролем двух уровней иерархии ($\text{rank } M=6$, $H(p)=2.483$, $G=2.483$)

меняемостью, а следовательно, повышенной живучестью сотовых ячеек структуры.

Для иллюстрации изменения наблюдаемости и упорядоченности структур на рис. 2 показаны примеры графов структуры упрощенной схемы электроснабжения, состоящей из шести элементов, где 1 – трансформаторная подстанция, 2 – автоматический фидерный выключатель, 3 и 4 – пускатели,

5 и 6 – электродвигатели.

На рис. 2, а показан односторонний график системы без защиты токоприемников от аварийных режимов работы. На рис. 2, б приведен вариант графа системы, в которой осуществляется контроль непосредственно отходящих цепей, например, по максимальному току, сопротивлению изоляции при использовании самоконтролируемых электрических аппаратов

таких и трансформаторной подстанции.

Граф на рис. 2, в соответствует системе электроснабжения с дифференцированными (более чувствительными) защитами, наблюдаемость структуры которой повышена. Преимущества схем, представленных на рис. 2, б и 2, в, очевидны. Реализация данных схем возможна при использовании самоконтролируемых компонентов схем [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.Н. Шахтные коммутационные аппараты нового уровня безопасности / Под общ. ред. Г.И. Разгильдеева. Кемерово: КузГТУ, 2001. 148 с.
2. Разгильдеев Г.И. Серов В.И. Безопасность и надежность взрывозащищенного электрооборудования. М.: Недра, 1992. 207 с.
3. Калман Р., Фалб П., Арбид М. Очерки по математической теории систем / Пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Мир, 1971. 400 с.
4. Матвеев В.Н. Информационная оценка системы // Вестн. КузГТУ. 2001. № 2. С.63-68.
5. Матвеев В.Н. Анализ информационных моделей шахтных коммутационных аппаратов // Вестн. КузГТУ. 2001. № 3. С.53-56.

□ Автор статьи:

Матвеев

Виктор Николаевич

- канд. техн. наук, доцент, зав. каф. общей
электротехники