

- скорее удовлетворен, чем не удовлетворен (60–80);
- удовлетворен (80–100).

С учетом данного набора критериев после проведения нормирования с учетом веса каждого критерия общая интегральная оценка качества оказания государственной услуги имеет вид

$$q_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} k_j, \quad (6)$$

где r_{ij} – нормированный критерий оценки i -ой услуги; k_j – вес данного критерия в общей оценке.

Следует отметить, что для повышения качества оценок для субъективных критериев (например, степень удовлетворенности) необходимо ввести механизмы дополнительного ранжирования самих потребителей услуг на основе оценки всего массива оценок данного потребителя (эксперта) с учетом временных изменений.

Библиографический список

1. *Стырин Е. М.* Электронное правительство: стратегии формирования и развития: дис. ... канд. соц. наук / Е. М. Стырин. – М., 2006.
2. *Чугунов А. В.* Российская концепция «электронного государства»: формирование государственной политики и организационно-правовые проблемы / А. В. Чугунов // Вестник Московского университета. – 2010. – № 3. – С. 78–89. – (Сер. 12. Политические науки).
3. *Электронный регион: организация работ по подготовке и реализации планов мероприятий по развитию информационного общества и формированию электронного правительства: материалы методического семинара (Москва, 16 апреля 2010 г.)* // Информационное общество. – 2010. – № 4. – С. 6–29.
4. *Юртаев А. Н.* Основные подходы к созданию «электронного правительства» на региональном уровне / А. Н. Юртаев // Государство и право. – 2010. – № 2. – С. 90–94.

УДК 621.38

АНАЛИЗ МОДЕЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

М.А. Ахмедов, Х.М. Магомедли

Проведен анализ моделирующих аппаратов функционирования мехатронных устройств гибкой производственной системы (ГПС) и на примерах показаны преимущества и недостатки, а также области их применения. Для исследования ГПС в качестве основного моделирующего аппарата используется расширение сетей Петри.

Ключевые слова: *гибкая производственная система, моделирование, моделирующие аппараты, логико-лингвистическая модель (ЛЛМ), производственная система, сетевые модели.*

Key words: *flexible manufacture system, simulation, simulated apparatus, logical-linguistic model (LLM), production systems, network models.*

Гибкая производственная система (ГПС) состоит из множества гибких производственных модулей (ГПМ), каждый из которых сам по себе является динамической системой и находится во множестве внутренних состояний при функционировании ГПС. Элементами

ГПМ являются различные мехатронные устройства (промышленные и интеллектуальные роботы, автоматические специальные и специализированные манипуляторы, управляемые транспортные системы и т.п.), основные и вспомогательные виды оборудования (обрабатывающие центры, станки с программным управлением и т.п.), которые функционируют во взаимодействии с общими рабочими зонами.

Как известно, функционирование мехатронных устройств в составе ГПМ, координацию и синхронизацию их работ во времени можно описывать в непрерывном (дифференциальными уравнениями), дискретном (уравнениями в конечных разностях) и нерегулярном (событийном) времени [1, с. 150–250]. В последнем случае время отчитывается лишь в моменты, когда в системе происходят события, изменяющие ее состояние. Описание взаимодействия мехатронных устройств в нерегулярном (событийном) времени считается эффективным способом и широко используется при моделировании и исследовании ГПМ с помощью компьютерных экспериментов.

В зависимости от сложности структуры и функционального назначения ГПМ на практике проектирования применяются различные моделирующие аппараты, в частности: конечные автоматы; модели параллельно-функционирующих асинхронных процессов; логиколингвистические модели – ЛЛМ (фреймовые, логические, продукционные, семантические сети); сетевые модели.

В статье исследуются некоторые способы моделирования мехатронных устройств ГПМ, рассматриваются примеры их применения и оценивается целесообразность их использования при автоматизированном моделировании и исследовании ГПМ на этапе системотехнического проектирования посредством компьютерных экспериментов.

1. При функционировании ГПМ для достижения конечной цели его мехатронные устройства находятся в конечном числе состояний, что позволяет каждое мехатронное устройство рассматривать как конечный автомат. Известно, что конечный автомат представляется в виде:

$$K = \{U, X, Y, \varphi, \psi\},$$

где U – конечное множество состояний входа; X – конечное множество состояний мехатронного устройства; Y – конечное множество состояний выхода; $\varphi: (X, Y) \rightarrow X$ – функция перехода; $\psi: (X, U) \rightarrow Y$ – функция выхода для автомата Мили. Следовательно, поведение каждого мехатронного устройства как автомат Мили можно описать уравнениями:

$$\begin{aligned} X(t) &= \varphi(X(t-1), U(t-1)); \\ Y(t) &= \psi(X(t), U(t-1)), \end{aligned}$$

где t – дискретные моменты времени; $X(t-1)$ и $X(t)$ – внутренние состояния конечного автомата, соответственно, во время $(t-1)$ и t ; $U(t-1)$ и $Y(t)$ – соответственно, состояния входа и выхода конечного автомата в моменты дискретных времен $(t-1)$ и t .

На примере управляемой транспортной системы (ТС) рассмотрим описание ее функционирования в виде конечных автоматов. ТС может находиться в одном из двух состояний: X_{11} – ТС отключена; X_{12} – ТС включена ($X_1 = (X_{11}, X_{12})$). Переход от одного состояния к другому осуществляется управляющими воздействиями $U_1 = (U_{11}, U_{12})$, где U_{11} – отключение, U_{12} – включение ТС.

Следовательно, функции перехода и выхода могут задаваться следующими преобразованиями:

$$\begin{aligned} \varphi: (X_{12}, U_{11}) &\rightarrow X_{11} & \psi: (X_{12}, U_{11}) &\rightarrow Y_{11} \\ (X_{11}, U_{12}) &\rightarrow X_{12} & (X_{11}, U_{12}) &\rightarrow Y_{12} \end{aligned}$$

где $Y_1 = (Y_{11}, Y_{12})$ – выходной алфавит конечного автомата для определения внутреннего состояния ТС в результате анализа информации с соответствующих датчиков, установлен-

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

ных в различных позициях ТС; Y_{11} – ТС находится в отключенном состоянии; Y_{12} – ТС находится во включенном состоянии.

Для описания алгоритма функционирования конечных автоматов используются таблицы и матрицы переходов, граф – схемы алгоритмов, формулы переходов и др. Однако в ряде случаев из-за большого разнообразия входных и выходных параметров применение перечисленных средств языка весьма затруднительно, так как при этом описание поведения тех или иных моделей требует большой размерности конечных автоматов.

При большом количестве мехатронных устройств в составе ГПМ рассматривать их модели как конечные автоматы нецелесообразно, так как модель конечного автомата не учитывает понятия физического времени. Поэтому при групповом управлении множеством конечных автоматов необходимо использовать централизованную систему внешней синхронизации, что затрудняет решение задач управления в реальном масштабе времени. Другой недостаток использования внешней синхронизации заключается в том, что если длительность перехода из одного состояния в другое ($\tau_{пер}$) превысит максимально ожидаемую величину, $\tau_{пер} > T$, где T – период синхронизирующих импульсов, то работа всей системы становится неуправляемой (в системах без обратной связи) или выполняется с меньшим быстродействием (в системах с обратной связью).

2. Перечисленные недостатки не присущи асинхронным процессам, которые инварианты к изменениям длительностей переходов и представляют собой согласованные параллельные системы с самосинхронизацией. При этом каждое мехатронное устройство ГПМ рассматривается как управляемый асинхронный процесс [1, с. 70–120].

Как известно, асинхронный процесс задается четверкой в виде: $P = \langle S, F, I, R \rangle$, где S – непустое множество ситуаций; F – отношение непосредственного следования ситуаций ($F \subset S \times S$); I – множество инициаторов ($I \subset S$), активизирующих процессы; R – множество результатов ($R \subset S$), которыми определяется достижение конечной цели всего асинхронного процесса.

Таким образом, мехатронное устройство, представленное в виде асинхронного процесса для достижения конечной цели, может находиться в конечном числе ситуаций, количество которых определяется в виде: $n = \prod_{i=1}^k m_i$, где k – число степеней подвижности мехатронного устройства; m_i – количество фиксированных точек в каждой степени подвижности ($i=1, 2, \dots, k$).

Для описания функционирования мехатронных устройств в отдельности и во взаимодействии ситуации разобьем на события и поставим в соответствии каждому событию некоторый предикат P_{jk} ($P_{jk} = 1$ – если значение соответствующего логического условия «истинно» и $P_{jk} = 0$ – «ложно»). Следовательно, ситуации определяются конъюнкцией всевозможных событий в виде:

$$S_i^a : \bigwedge_{j=1, k=1}^{i, r} P_{j,k}^a \rightarrow 1, \quad (1)$$

где a – номер мехатронного устройства; j – номер активного действия; k – номер предиката; i – номер ситуации.

Исследование показало, что функционирование мехатронного устройства представляет собой линейное упорядочение множества событий, смена которых осуществляется циклически. Поэтому модели мехатронных устройств в виде асинхронных процессов могут быть представлены следующим образом:

$$N^a : S^a = \{S_i^a\}, \quad F^a = \left\{ (P_{jk}^a \xrightarrow{t_{jk}^a} P_{jk}^a) \right\},$$

$$I^a = \{(S_i^a \subset S^a)\}, \quad R^a = \{(S_i^a \subset S^a)\}, \quad (2)$$

где t_{jk}^a – количество переходов a -го мехатронного устройства; N^a – модель a -го мехатронного устройства.

На примере управляемой ТС с подъемно-позиционирующим устройством (ППУ) рассмотрим описание ее функционирования в виде асинхронных процессов. Допустим, ТС доставляет детали к позициям ППУ. При наличии детали на ППУ ТС отключается. После освобождения ППУ ТС включается, и процесс циклически продолжается.

Ситуациям ТС с ППУ соответствуют следующие истинные значения предикатов: $P_1^1 = 1$ – ТС в движении, отсутствует деталь на столе ППУ; $P_2^1 = 1$ – ТС остановлена, имеется деталь на столе ППУ; $P_3^1 = 1$ – наличие детали на столе ППУ; $P_4^1 = 1$ – отсутствие детали на столе ППУ; $P_5^1 = 1$ – ТС остановлена, отсутствуют детали на ППУ и на ТС; $P_6^1 = 1$ – ТС включена, имеются детали на ТС, отсутствуют на ППУ.

Из всевозможных ситуаций выделим те, которыми в результате целенаправленного поведения ТС с ППУ обеспечивается достижение конечной цели в реальном масштабе времени и, используя (1), опишем ситуации в виде:

$$S_1^1 = P_1^1 \& P_4^1; S_2^1 = P_2^1 \& P_3^1; S_3^1 = P_5^1 \& P_4^1; S_4^1 = P_6^1 \& P_4^1. \quad (3)$$

Используя (2), модель ТС с ППУ в виде асинхронного процесса может быть представлена следующим образом:

$$N^1 : S^1 = \{S_1^1, S_2^1, S_3^1, S_4^1\}, \\ F^1 = \left\{ \begin{array}{l} (P_5^1 \xrightarrow{t_1^1} P_6^1), (P_6^1 \xrightarrow{t_2^1} P_1^1), \\ (P_1^1 \xrightarrow{t_3^1} P_2^1), (P_2^1 \xrightarrow{t_4^1} P_6^1) \end{array} \right\}, I^1 = \{S_1^1\}, R^1 = \{S_2^1\}. \quad (4)$$

Отметим, что в качестве асинхронного процесса рассматриваются мехатронные устройства, функционирующие в циклическом режиме, следовательно, модель каждого из них представляет собой безопасную сеть, в которой все переходы живые и последовательно срабатывают в процессе его функционирования.

Анализ показал, что при более сложных взаимодействиях мехатронных устройств по сравнению с рассмотренными циклическими процессами применение данного подхода не дает желаемого эффекта. Перспективным направлением для решения таких задач является использование моделей, ориентированных на обработку знаний при принятии решений и сетевых моделей.

3. Для представления знаний широкое применение нашли так называемые ЛЛМ в виде семантических сетей, фреймовые и логические модели и продукционные системы [3, с. 7–64]. Среди ЛЛМ, с точки зрения практичности применения, перспективным является метод в виде продукционной системы, которая в прямой форме представляет информацию о процедурах и условиях их применения, адекватных к текущей ситуации.

В практическом смысле продукция есть правило-продукция, представляющая собой пару: ситуация \rightarrow действие, посылки \rightarrow заключение, которые встречаются в различных областях знаний и широко применяются в повседневной жизни. Как видно, продукция по смыслу близка импликации «ЕСЛИ..., ТО...»

Как известно, продукционная система состоит из трех основных компонентов: глобальной базы данных; множества правило-продукции (база знаний) и системы управления. Продукционная система как динамическая система функционирует следующим образом: из базы знаний система управления по определенной стратегии выбирает нужные продукции

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

для перевода глобальной базы данных из состояния $X(t)$ в состояние $X(t+1)$ до тех пор, пока не достигается конечная цель. Формально функционирование производственной системы можно записать следующим образом:

$$X(t+1) = f(x(t), u_i(x)), \quad (5)$$

где $u_i \in U$; U – множество правил-продукций.

В ГПМ глобальная база данных состоит из множества ситуативных знаний, которые распознаются сенсорами, установленными в различных позициях мехатронных устройств, в процессе функционирования ГПМ.

База знаний представляет собой априорные знания о предметной области и формируются экспертом на основе его опыта и интуиции с использованием логических связей типа И, ИЛИ, НЕ и импликации «ЕСЛИ..., ТО...».

Следовательно, в ГПМ производственная система функционирует следующим образом: в результате распознавания текущей ситуации в глобальной базе данных по определенной стратегии последовательно выбираются нужные продукты из базы знаний, которые переводят ГПМ в новое желаемое состояние для достижения конечной цели в реальном масштабе времени.

На примере ГПМ, который состоит из ТС с ППУ, промышленного робота (ПР) и обрабатывающего центра (ОЦ), рассмотрим этапы создания базы данных и знаний. ГПМ функционирует следующим образом: детали по ТС поступают к позиции ППУ; ППУ поднимается и готовит детали для захвата ПР; ПР берет и перемещает детали к рабочей зоне ОЦ и процесс в циклическом режиме повторяется.

Для создания глобальной базы данных (ГБД) производственной системы определим позиции, где устанавливаются сенсоры и двигатели управления мехатронными устройствами (см. табл.).

Таблица

Глобальная база данных элементов системы управления мехатронными устройствами

Сигналы от сенсоров	Назначение
X_{11}^1	Наличие детали на столе ППУ и ППУ в нижнем положении
X_{12}^1	Наличие детали на столе ППУ и ППУ в верхнем положении
X_{13}^1	ППУ в верхнем положении и отсутствует деталь на столе
X_{14}^1	ППУ в нижнем положении и отсутствует деталь на столе
X_{15}^1	Наличие детали в исходной позиции ППУ
X_{16}^1	ТС в движении
X_{17}^1	ТС отключена
X_{11}^2	Рука ПР в исходном положении, рука втянута и захват отключен
X_{12}^2	Рука ПР в исходном положении, рука вытянута и захват отключен
X_{13}^2	Рука ПР в исходном положении, рука втянута и захват включен
X_{14}^2	Рука ПР в исходном положении, рука вытянута и захват включен
X_{15}^2	Рука ПР в конечном положении, рука втянута и захват включен
X_{16}^2	Рука ПР в конечном положении, рука вытянута и захват включен
X_{17}^2	Рука ПР в конечном положении, рука вытянута и захват отключен
X_{18}^2	Рука ПР в конечном положении, рука втянута и захват отключен

X_{19}^2	Отсутствие детали в рабочей зоне ОЦ
Сигналы на исполнительные механизмы	Назначение
U_{11}^1	Включение ТС
U_{12}^1	Включение ППУ
U_{11}^2	Включение руки ПР вперед
U_{12}^2	Включение захвата ПР
U_{13}^2	Включение поворотного устройства ПР

На основе (3) экспертом на естественном языке формируются продукции с использованием логических связок типа И, ИЛИ, НЕ (\neg) и импликации «ЕСЛИ..., ТО», левая часть которой содержит факты о состояниях ГПМ, а правая – сигналы для изменения состояний ГБД в целях достижения конечной цели в виде:

ЕСЛИ имеется деталь на столе ППУ и ППУ в верхнем положении,

И рука ПР в исходном положении,

И рука вытянута и захват отключен,

ТО выполняется условие для включения руки ПР вперед.

На языке внутреннего представления эта запись примет вид:

$$(P^2)(X_{12}^1 \& X_{11}^2 \& X_{17}^1) \Rightarrow U_{11}^2;$$

где P_1^2 – номер продукции. Аналогичным образом формулируются остальные продукции.

$$(P_2^2)(X_{12}^2 \& X_{12}^1 \& X_{17}^1) \Rightarrow U_{12}^2;$$

$$(P_3^2)(X_{13}^2 \& X_{12}^1) \Rightarrow U_{11}^2;$$

$$(P_4^2)(X_{14}^2) \Rightarrow U_{13}^2;$$

$$(P_5^2)(X_{15}^2 \& X_{19}^2) \Rightarrow U_{11}^2;$$

$$(P_6^2)(X_{16}^2 \& X_{19}^2) \Rightarrow \neg U_{12}^2;$$

$$(P_7^2)(X_{17}^2 \& \neg X_{19}^2) \Rightarrow \neg U_{11}^2;$$

$$(P_8^2)(X_{18}^2) \Rightarrow \neg U_{13}^2;$$

$$(P_1^1)(X_{11}^1 \& X_{15}^1 \& X_{16}^1) \Rightarrow \neg U_{11}^1;$$

$$(P_2^1)(X_{11}^1 \& X_{15}^1 \& \neg X_{16}^1) \Rightarrow U_{12}^1;$$

$$(P_3^1)(X_{13}^1 \& X_{17}^1) \Rightarrow \neg U_{12}^1;$$

$$(P_4^1)(X_{14}^1 \& X_{17}^1) \Rightarrow \neg U_{11}^1;$$

$$(P_5^1)(X_{14}^1 \& \neg X_{15}^1 \& X_{17}^1) \Rightarrow U_{11}^1.$$

В ГПМ промышленный робот с ТС и ОЦ функционирует во взаимодействии с общими рабочими зонами (соответственно, ППУ и рабочая зона ОЦ). Следовательно, координация их работы в общих рабочих зонах учитывается при формировании продукции, так как при входе руки ПР в рабочие зоны останавливаются работы ТС или ОЦ соответственно.

Основной недостаток продукционной системы заключается в том, что ошибки экспертов при формировании продукции обнаруживаются во время внедрения ГПМ на конкретных объектах.

4. Сетевые модели, в частности, сети Петри, являются эффективным моделирующим инструментом при проектировании технических систем, которые содержат множество параллельно-функционирующих асинхронных процессов [2, с. 144]. Формально сеть Петри определяется как набор вида $N = (P, T, I, O, M_0)$, где $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, $n > 0$ – конечное непустое множество условий; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m > 0$ – конечное непустое множество переходов (P и T не пересекаются $P \cap T = \emptyset$); $I: P \times T \rightarrow \{0, 1, \dots\}$, $O: T \times P \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ – соответственно, функции входных и выходных инцидентов; $M_0: P \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ – начальная маркировка. Условие P_i является входной или выходной позицией перехода $P_i \in I(t_j)$ или $P_i \in O(t_j)$ соответственно.

Графическая сеть Петри изображается в виде двудольного ориентированного графа с двумя типами вершин: кружками обозначаются условия, черточками – переходы. Дуги, соединяющие вершины вида «кружок-черточка» и «черточка-кружок», соответствуют входным и выходным функциям инцидентности.

Основное преимущество сетей Петри заключается в том, что исследуемый объект моделируется с применением сети Петри и в результате анализа ее основных свойств (ограниченность, безопасность, достижимость, живость, сохраняемость, покрываемость и повторяемость) оценивается поведение моделируемой системы.

В настоящее время разработаны различные программы для анализа и имитации сетей Петри [2, с. 140–144], с использованием которых системы моделируются и исследуются на этапе системотехнического проектирования.

1. Показаны преимущества и недостатки, а также области применения моделирующих аппаратов ГПС.

2. Отмечено, что использование в качестве основного моделирующего аппарата расширения сетей Петри, а в качестве представления первичной информации о функционировании ГПС знания в виде конечных автоматов, параллельно-функционирующих асинхронных процессов и ЛЛМ позволит автоматизировать моделирование и исследование ГПС на этапе системотехнического проектирования [4, с. 371–378].

3. Для реализации предложенного подхода требуется преобразование первичной информации в сеть Петри и организация исследования модели ГПС в результате анализа основных свойств сетей Петри.

Библиографический список

1. *Автоматное* управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / под ред. В. И. Варшавского. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. – 400 с.
2. *Ахмедов М. А.* Автоматизация моделирования с применением сетей Петри / М. А. Ахмедов, В. А. Мустафаев. – Баку : Элм, 2007. – 144 с.
3. *Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии* / Г. С. Поспелов. – М. : Наука, 1988. – 280 с.
4. *Кязимов Н. М.* Архитектура инструмента автоматизированного проектирования гибких производственных систем / Н. М. Кязимов, Х. М. Магомедли // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – № 3 (62). – С. 371–378.