

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предлагается аналитико-оптимизационная процедура моделирования реализации технологических процессов на вычислительных сетях автоматизированных систем управления.

Ключевые слова: технологический процесс, вычислительная сеть, моделирование, направленный граф.

Сложная взаимосвязь операций технологических процессов (ТП) и процессов их реализации на вычислительных средствах при их автоматизации требует как автоматизации этапа формирования последовательностей операций, так и оптимальной программной реализации автоматизированного управления их выполнением. В общем случае при автоматизации управления достаточно сложными технологическими процессами АСУ ТП является многокомпонентной, т. е. имеет много процессоров.

Каждой операции соответствует последовательно-параллельный процесс срабатывания компонентов аппаратуры управления ТП. Время выполнения этого процесса зависит как от характеристик надежности компонентов АСУ, так и от надежности программного обеспечения (ПО).

Сформулируем задачу, в которой определена основная взаимосвязь операций ТП и процессов их реализации на вычислительной сети (ВС) АСУ, т. е. задачу отображения ТП на многокомпонентную ВС.

ТП описывается ориентированным графом. Со всеми вершинами графа сопоставим задачи управления выполнением операций ТП и задачи обработки информации. Каждая задача имеет спецификацию. Другой ориентированный граф соответствует структуре ВС. Отождествляемые с компонентами структуры, все вершины этого графа также имеют спецификации.

Необходимо определить возможность реализации ТП на изначально заданной структуре ВС и, если это возможно, указать программу или множество программ работы структурных компонентов, обеспечивающих реализацию заданного (либо множества заданных) ТП. Минимальное время реализации этого ТП должно быть удовлетворительным с учетом надежности аппаратных и программных средств ВС, так как качество реализации ТП зависит от этих характеристик.

Очевидно, что один и тот же аппаратно-программный комплекс может реализовать как различные ТП, так и один и тот же, но с различными временными характеристиками. Поэтому можно определить программу работы при следующих условиях:

- для всех срабатываний структурного компонента должны быть определены компоненты, предоставляющие входную информацию и потребляющие выходную;
- для этих компонентов указаны моменты инициализации, т. е. в эти моменты операции ТП начинают

выполняться, что соответствует планированию средств системы;

- тип и длительность операции (задачи) указаны для всех моментов.

Отметим, что последнее из условий необходимо, если некоторый компонент ВС может выполнять как различные задачи, так и однотипные, но с различными временными характеристиками.

Как видно из вышесказанного, решение поставленной задачи заключается в установлении взаимно однозначного соответствия между вершинами графа ТП и некоторым множеством последовательностей операций, реализуемых компонентами ВС АСУ. Это соответствие полностью определяет весь обмен информацией в сети.

После выбора моментов инициализации возможны два варианта: либо компоненты сети срабатывают и реализуют ТП, либо не срабатывают и останавливаются. Но даже в том случае, если все компоненты сети срабатывают, процесс реализации ТП может быть неудовлетворительным по многим причинам. Например, время реализации будет слишком большим.

Должны быть определены следующие данные:

- функция, которая устанавливает взаимно однозначное соответствие между вершинами графа ТП и каждым моментом инициализации компонентов ВС;
- потоки информации между компонентами;
- моменты инициализации компонентов.

Также в качестве исходных данных используется вектор реализации, компоненты которого представляют собой длительности выполнения задачи, находящейся в начале дуги графа ТП. Можно с уверенностью сказать, что ВР задается структурой ВС.

В процессе решения необходимо многократно повторять последовательные этапы оптимизации целевого функционала (при выборе оптимального времени реализации ТП, согласно составу мультиверсий ПО, анализа реализуемости ТП (корректности заданных временных ограничений) и коррекции ТП. Перечислим шаги аналитико-оптимизационной процедуры этого этапа:

- для заданного ТП (либо совокупности ТП) выбирается состав мультиверсионного ПО с применением приближенных методов;
- проводится анализ и коррекция ТП;
- для получения субоптимальной по времени реализации ТП определяется критический путь на графовой модели;

– оптимизируется критический путь графа ТП точными методами;

– в том случае, если значение целевого функционала улучшилось, повторяется этап анализа и коррекции ТП, затем последующие шаги данной процедуры повторяются до тех пор, пока значение целевого функционала либо останется неизменным, либо ухудшится.

Рассмотрим подробно модели и методы [1–3] анализа и оптимизации ТП, которые используются в рамках приведенной выше аналитико-оптимизационной процедуры и позволяют получать как аналитические, так и вероятностные характеристики процессов управления.

Поскольку описание технологических процессов не зависит от типа АСУ, мы имеем начальное значение вектора временной развертки (ВВР) для графа ТП $G: t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$, где t_i соответствует времени задерживания компонента структуры ВС, для решения задачи находящейся в i -й вершине графа G . ВВР полностью определяет информационное взаимодействие между структурными компонентами сети.

Граф управления реализацией технологического процесса G , построенный на этой структуре, описывается матрицей инцидентности $A \equiv [a_{ij}]$. Это правая матрица размерности $n \times m$, где

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я дуга выходит из вершины } i, \\ -1, & \text{если } j\text{-я дуга входит в вершину } i, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Также мы используем вектор реализации $h = (h_1, h_2, \dots, h_m)$, где h_j является временем выполнения задачи обработки информации и управления ТП, находящейся в начале j -й дуги, и задается структурой ВС.

Для реализации ТП на заданной структуре ВС с заданным ВВР необходимо и достаточно выполнение следующего условия: если из i -й вершины графа ТП выходит j -я дуга, входящая в v -ю вершину, то разница $t_v - t_i$ должна быть не меньше, чем время выполнения задачи в i -й вершине:

$$t_v - t_i \geq h_j a_{ij}. \quad (1)$$

Время реализации ТП определим по формуле

$$T = \max_i (t_i + z_i) - \min_i t_i,$$

где z_i является временем выполнения задачи, реализация которой начинается в момент t_i .

Для случая, когда неравенство (1) не выполняется, предлагается следующий алгоритм коррекции ТП, который позволяет производить замену компонентов ВВР на удовлетворительные. Для того чтобы этот корректирующий алгоритм имел смысл, необходимо выполнение следующих условий.

1. Условие неотрицательности:

$$t_i \geq 0 \quad (i \in I), \quad (2)$$

где $I = \{i\}$ – совокупность операций ТП.

2. Условие завершения предыдущих операций ТП:

$$\sum_{t_j \leq t_i} z_i \leq t_i \quad (i, j \in I). \quad (3)$$

3. Условие логической последовательности:

$$t_i \geq a_{ij} t_j \quad (i, j \in I), \quad (4)$$

где a_{ij} – коэффициент связности задачи; t_i и h_i – компоненты векторов ВВР и ВР соответственно.

Для каждой задачи ТП введем параметры: t_i^f – момент времени, до истечения которого ценность i -й задачи остается максимальной; t_i^s – момент времени, до истечения которого выполнение i -й задачи невозможно:

$$t_i^s \leq t_i \leq t_i^f.$$

Очевидно, что

$$0 \leq t_i^s < t_i^f < T, \quad t_i^f - t_i^s \geq z_i,$$

где T – длительность реализации ТП.

Если условия (2)–(4) выполняются, то выполняются и условия $t_i^s < t_j^s$, $t_i^f < t_j^f$ для связанных операций i и j (i предшествует j). С другой стороны, если ТП существует, то $i < j \Rightarrow t_i^f \geq t_j^s$; $t_j^b \geq t_i^s + z_i$, где t_j^b и t_i^e – моменты начала j -й и завершения i -й задач.

Поэтому для каждой связанной пары i и j замена при коррекции ВВР «старых» значений t_i^{cr} на «новые» $\max(t_i^s, t_j - z_i)$ и соответственно, t_j^{cr} на $\min(t_j^f, t_i + z_i)$ не влияет на допустимость существования ТП. В результате «старые» координаты ВВР меняются на новые, удовлетворяющие следующим условиям:

$$1) i < j \Rightarrow t_i^{cr} \geq t_i^s; t_j^{cr} \geq t_j^f;$$

$$2) i < j \Rightarrow t_j^{cr} \geq t_i + z_i;$$

$$3) i < j \Rightarrow t_i^{cr} \leq t_j - z_i.$$

Итак, нами подробно рассмотрен второй шаг аналитико-оптимизационной процедуры.

Далее мы рассмотрим формальное представление этапов аналитико-оптимизационной процедуры. Эта формализация базируется на совокупности приведенных выше моделей и позволяет объединить их в рамках общей схемы.

Введем обозначения.

K – количество типов программных модулей на нижнем уровне иерархии;

k – конкретный экземпляр модуля r -го типа на нижнем уровне иерархии (на уровне мультиверсий); $k = 1, \dots, K_r$; $r = 1, \dots, K$;

h_j^{kr} – длительность выполнения операции ТП в начале j -й дуги с использованием k -го модуля r -го типа;

z_i^{kr} – время выполнения операции ТП с использованием k -го модуля r -го типа, с началом выполнения в момент t_i .

В общем случае можно показать, что для оптимального выполнения ТП приходится решать следующую задачу оптимизации:

$$\min_i (\max_i (t_i + z_i^{kr}) - \min_i t_i),$$

при

$$t_v - t_i \geq h_j^{cr} a_{ij}; \quad (5)$$

$$t_i^s \geq t_i \leq t_i^f,$$

причем (2)–(4) должны выполняться.

Неравенства (5) представляют ограничения, которым должен удовлетворять ВВР. Кроме того, вектор реализации h может иметь вероятностные характеристики выполнения задач, так как с каждым его компонентом можно связать функцию вероятности, используя GERT-анализ, что будет рассмотрено далее.

Задача оптимизации ПО АСУ может решаться с помощью статической стратегии и критерия стоимости. Для приведенной здесь постановки рассматривается критерий времени (в общем случае вероятностный).

Введем переменную y_i^{kr} , равную 1, если в момент t_i операция ТП начинает выполняться k -м модулем r -го типа, и 0 – в противном случае.

Тогда мы имеем

$$\min([\max_i(t_i + z_i^{kr}) - \min_i t_i] y_i^{kr})$$

при

$$t_v - t_i \geq y_i^{kr} h_j^{cr} a_{ij}$$

и неравенства (2)–(4) и (5) должны быть выполнены.

Согласно этапам аналитико-оптимизационной процедуры, мы применяем метод случайного поиска с адаптацией (МСПА) [4] в качестве эффективного метода решения.

Используя МСПА при решении, введем следующий метод коррекции результата. Получив критический путь графа ТП, мы можем связать с каждой задачей пути различные временные характеристики, соответствующие разным типам модулей ПО.

Итак, необходимо найти кратчайший путь для графа N ($p = |V(N)|$ – множество вершин; $q = |E(N)|$ – множество дуг), и в этом случае имеем следующую задачу сетевого анализа:

$$\min \left(\sum_j \sum_i c_{ji} f_{ji} \right)$$

при условиях

$$\begin{aligned} \sum_i f_{si} - \sum_i f_{is} &= 1, \\ \sum_i f_{ji} - \sum_i f_{ij} &= 0, j \neq s, j \neq t, \\ \sum_i f_{ti} - \sum_i f_{it} &= -1, f_{ji} \geq 0, \end{aligned}$$

где $c_{ij} = h_j^{kr}$; f_{ji} – емкость потока в сети N ; s – исток и t – сток сети N .

Для решения необходимо минимизировать функцию

$$\min \left(\sum_{e \in E(N)} h_j^{kr} f_{ji} \right).$$

Считаем, что имеет место сохранение потока в каждом узле сети; это означает, что поток, втекающий в узел, равен потоку, выходящему из него; ограничения по потоку не распространяются на исток и сток.

Введем обозначения: $f(e_i) = f_i$ и $c(e_i) = c_i(q = |E(N)|)$.

Имеем следующую задачу линейного программирования:

$$\min \left(\sum_{i=1}^q c_i f_i \right).$$

Далее, согласно аналитико-оптимизационной процедуре, если мы получаем лучшее решение $T_{\min}^*$, то мы должны повторить выполнение алгоритмов анализа и коррекции для ТП и шаг по оптимизации времени выполнения ТП с соблюдением граничных условий, поскольку есть вероятность изменения как ВВР, так и ВР. Повторяя этот шаг, мы можем получить новый критический путь графа ТП и улучшить решение. Если мы получим тот же результат, то работа алгоритма останавливается и процесс оптимизации последовательности выполнения ТП прекращается.

Для реализации же полной схемы необходимо остановиться на одном из важных этапов анализа ТП, который позволяет получить вероятностные характеристики времени реализации как отдельных операций, так и ТП в целом.

Введем обозначение веса $c_{ij} \in R_+$ для каждой дуги $\langle i, j \rangle$ решающей сети N . Вес дуги в N представляет собой затраты, возникающие при выполнении задачи ТП, соответствующей $\langle i, j \rangle$. Тогда на этапе проектирования выбирается некоторая успешная реализация ТП $w \in e^*$, причем термин «успешная» подразумевает то, что эта реализация приводит к задействию s , который соответствует успешному завершению процесса.

Сформулируем оптимизационную задачу: минимизировать C_w при условии, что $w \in e^*$ и w активирует s , где

$$C_w = \sum_{\langle i, j \rangle \in E} c_{ij} w_{ji}, \quad (6)$$

где C_w – затраты на некоторую реализацию ТП. Очевидно, что оптимизационная задача (6) позволяет рассматривать w -ую реализацию ТП как результат акции, предпринятой ЛПР.

Используя дуговые и узловые переменные, перепишем задачу (6) в более детальной форме:

$$\sum_{\langle i, j \rangle \in E} c_{ij} w_{ji} \rightarrow \min \quad (7)$$

при условиях, что

$$\begin{aligned} \sum_{k \in P(i)} w_{ki} &\geq X_i^- u_i (i \in V \setminus \{r\}), \\ \sum_{j \in S(i)} w_{ij} &\geq X_i^+ u_i (i \in V \setminus \{s\}), \\ w_{ij} &\in \{0, 1\}, \langle i, j \rangle \in E, u_i \in \{0, 1\}, u_s = 1. \end{aligned}$$

Первые два ограничения задачи (7) представляют собой условия узловой логики, тогда как оставшиеся ограничения говорят о том, что дуговые и узловые переменные – это бинарные переменные, и что сток s должен быть активирован. При некоторых допущениях поставленную задачу можно решить, используя известные схемы метода ветвей и границ.

В заключение нужно отметить, что предлагаемые модели позволяют решить задачи трех типов на этапе

конструирования ТП. Первая модель – это детерминированная модель, которая позволяет задачам ТП выполняться или один раз, или вообще не выполняться в течение любой реализации процесса. Допустимыми решениями этой задачи являются «успешные» допустимые w -е реализации ТП.

Вторая из рассмотренных моделей соответствует вероятностному выполнению задач. В этом случае допустимые решения для соответствующей задачи оптимизации – это допустимые случайные акции π . И, наконец, последняя модель, рассмотренная здесь, имеет дело с последовательностями случайных акций, что соответствует многочисленным исполнениям ТП, вплоть до успешного завершения процесса. Результат решения задачи – направления ψ , которые соответствуют последовательности случайных акций и могут быть получены за конечное число шагов итеративного алгоритма.

Е. А. Antamoshkina

TECHNOLOGICAL PROCESSES REALIZATION MODELING

The author suggests analytical optimization procedure for modeling of technical processes realization on computer nets of automation control systems.

Keywords: technological process, computer net, modeling, oriented graph.

© Антамошкина Е. А., 2012

УДК 519.688

К. В. Богданов, А. Н. Ловчиков

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ С СУЩЕСТВЕННЫМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ С ПОМОЩЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Предлагается новый подход к созданию EDA-систем, предназначенных для моделирования схем, содержащих элементы, функционирование которых связано с резким изменением параметров и при математическом описании приводит к существенному возрастанию производных фазовых переменных, что при традиционном моделировании ведет к срыву вычислительного процесса.

Ключевые слова: электронные устройства, вычислительные алгоритмы, САПР, EDA-системы.

Современное программное обеспечение, применяющееся для моделирования различных процессов, начиная от нагрузочных испытаний и заканчивая переходными процессами в электронных схемах, основывается на архитектуре, заложенной еще на заре развития вычислительной техники, в 60–70-х гг. прошлого века.

Развитие данного класса программного обеспечения идет, как правило, по пути улучшения пользовательских интерфейсов, расширения базы данных электронных компонентов и т. п., в то время как основные вычислительные алгоритмы остаются прежними. Чаще всего все сводится к решению получившейся системы линеаризованных дифференциальных

Библиографические ссылки

1. Капулин Д. В., Ковалев И. В., Царев Р. Ю. Архитектурная надежность программного обеспечения информационно-управляющих систем : монография / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2011.
2. Антамошкин А. Н., Ковалев И. В., Царев Р. Ю. Математическое и программное обеспечение отказоустойчивых систем управления и обработки информации : монография / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2011.
3. Ковалев И. В., Зеленков П. В., Брезицкая В. В. Инструментальные средства формирования мультиверсионной архитектуры отказоустойчивых программных систем : монография / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2011.
4. Antamoshkin A. N., Saraev V. N., Semenko E. S. Optimization of unimodal monotone pseudoboolean functions // Kibernetika. 1990. Vol. 26, № 5. P. 432–442.

уравнений, являющейся математической моделью устройства. Численные методы решения при этом позволяют получать весьма точные результаты, но проблемы возникают при моделировании систем с большим количеством компонентов, что приводит к усложнению математической модели, и при моделировании систем, в которых имеются существенные нелинейности, значительно огрубляющие результаты моделирования либо приводящие к тому, что вычислительный процесс расходится [1; 2].

В работах [3] и [4] авторами был предложен иной подход к решению этой задачи: рассмотрение моделируемой схемы как совокупности конкурирующих независимых параллельных процессов.