УДК 681.2.084

Е. О. Грубо, П. Г. Королёв,
Н. В. Романцова, А. В. Утушкина

АЛГОРИТМ НЕПОЛНОГО ПЕРЕБОРА СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Описан алгоритм составления расписания работы измерительной системы, оптимизирующий величину погрешности датирования и сокращающий время подготовки измерительного эксперимента.

Измерительный эксперимент, измерительная система, расписание работы измерительной системы, функция штрафов, вычислительная сложность

Измерительный эксперимент. Целевая функция. Одним из вариантов задачи теории расписания является задача составления расписания работы измерительной системы (ИС), возникающая на стадии эксплуатации средств измерения в случае, когда аппаратная конфигурация определена и изменяется задание на измерительный эксперимент. Данная ситуация возникает там, где актуальна проблема быстропротекающих технологических процессов, таких как изучение процесса сгорания топлива, испытания судов, летательных аппаратов, или установлены системы мониторинга сложных систем, такие как системы мониторинга энергопотребления или системы мониторинга состояния железнодорожного полотна. Создание расписания работы ИС при помощи электронно-вычислительных систем на основе программных продуктов позволяет сокращать временные затраты на подготовку эксперимента и оптимизировать работу ИС по выбранному критерию.

Измерительный эксперимент выполняется согласно заранее составленному расписанию работы измерительной системы. Задание на измерительный эксперимент представляется в виде описания измерительных сигналов $S_j = \{U_{Sj}, U_{Fj}, D_j, \delta_j, t_j, R_j, ..., \tau_j, f_j, ..., \Delta_j, ...\}$, где U_{Sj} – физический носитель; U_{Fj} – измеряемый параметр; D_j – диапазон измерения; t_j – время измерения; δ_j, Δ_j – погрешности; R_j – сопротивление нагрузки; τ_j – параметр синхронизации; f_j – частота, и др. Ресурс измерительной системы представляется в виде описания измерительных модулей (ИМ) $M_i = \{U_{\text{вх } i}, U_{\text{вых } i}, D_{\min i}, \ldots, D_{\max i}, \delta_i, \gamma_i, t_i, R_{\text{вх } i}, k_i, ..., f_i, ..., IF_i, ...\}$,

где $U_{\text{вх } i}$ – входная физическая величина; $U_{\text{вых } i}$ – измеряемый параметр входной величины; $D_{\min i}$, $D_{\max i}$ – диапазон изменения входной величины; динамическая погрешность δ_i и статическая погрешность γ_i – характеристики точности; t_i – время получения результатов измерения; $R_{\text{вх } i}$ – входное сопротивление; k_i – число входов, если ИМ имеет коммутатор на входе; IF_i – тип интерфейса, и т. д. [1]. Цель составления расписания – обеспечение измерений всех сигналов из S_j за время измерительного эксперимента при минимизации (максимизации) величины выбранного критерия. Задача составления оптимального расписания по выбранному критерию эффективности является *NP* – полной задачей, т. е. решение гарантированно находится при помощи полного перебора и не существует полиномиального алгоритма её решения [2]. Таким образом, необходимо разработать алгоритм неполного перебора. Проверка работы алгоритма неполного перебора заключается в сравнении критерия эффективности для найденных им решений набора заданий и критериев эффективности вычисленных для решений, предоставленных алгоритмом полного перебора.

Целевая функция в задаче вычисляется на основе штрафов, которые возникают при появлении погрешности датирования в измерительном эксперименте. По условию рассматриваемой задачи необходимо распределить измеряемые сигналы с параметром синхронизации [1] $\tau = 0$ по входам измерительных модулей многоканальной ИС, состав которой изменению не подлежит, и определить расписание работы измерительных каналов (ИК) в соответствии с заданием на измерительный эксперимент. Цель составления расписания – минимизировать погрешность датирования при каждом измерении в течение времени измерительного эксперимента (T_{izm}) Минимальной погрешность датирования оказывается у результата, который был получен при запуске измерительного канала сразу после начала такта синхронизации и определяется тактовой частотой процессора и процедурой доступа к регистрам управления ИК. В работе [3] приведены формулы для расчета функции штрафов, в частности формула нормированной функции штрафов с коэффициентом уменьшения штрафа за задержку измерения сигнала с меньшим показателем жесткости [1]:

$$P = \frac{\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{J}\left(p_{j-1,\,l} + p_{j,\,l}\times\frac{f_j}{f_{\max}}\right)}{l_{\max}\sum_{j=1}^{J} j-1}, \quad p_{j,\,l} = \begin{cases}1, & \tau_{j,\,l} = \tau_{j-1,\,l};\\ 0, & \tau_{j,\,l} \neq \tau_{j-1,\,l},\end{cases} \; p_{1,l} = 0, \qquad (1)$$

где $f_{\max}$ – частота сигнала с наиболее жесткой привязкой ко времени; $l_{\max}$ – количество запусков самого высокочастотного сигнала.

Алгоритм составления расписания. Структура баз данных измерительного эксперимента. Рассмотрим этапы алгоритма составления расписания.

1. *Анализ характеристик сигналов S_j.* В первую очередь измерительные сигналы разделяют по физической природе носителя информации. Затем, анализируя векторы параметров сигналов в каждой группе, определяют: сигнал с минимальной требуемой частотой измерений ($f_{j\,\min}$), минимальное время, обеспечивающее требование синхронизации по точности ($\Delta t_{\text{и}}$) и период проведения измерительного эксперимента $T_{\text{izm}} = 1 / f_{j\,\min}$. Таблица изме-

рительных сигналов упорядочивается в соответствии с частотой опроса ИК и возможностями аппаратных средств. Упорядочивание производится по алгоритмам сортировки, имеющим логарифмическую вычислительную сложность и дающим хороший результат при большом объеме входных данных.

2. *Анализ характеристик ИС.* На данном этапе происходит определение шага дискретизации во времени (синхронизация работы системы) $\Delta\tau \le \Delta T \le \Delta t_{\text{и}}$, где $\Delta\tau$ – интервал времени, соответствующий частоте синхронизации системы; ΔT – интервал времени – шаг, принятый при составлении расписания. Шаг ΔT для ИС, имеющих в своем составе многоканальные ИМ, должен быть выбран исходя из условия

$$\Delta T \ge \max\ t_{Mij} + t_{i\,\text{у}}\ , \tag{2}$$

где t_{Mij} – время измерения i-го ИК, сигнала j; $t_{i\,\text{у}}$ – время управления i-го ИК, которое складывается из задания режима работы ИК, пуска, анализа готовности, чтения результата измерения и записи его в массив измерительных данных.

Выполняется проверка возможности измерения всех сигналов. Для каждого ИК должно выполняться условие

$$T \ge \sum_{j \in J_i} (t_{Mij\,\min} + t_{i\,\text{у}}), \tag{3}$$

где J_i – сигналы, которые могут быть измерены i-м ИК; $t_{Mij\,\min}$ – время измерения i-го ИК, сигнала j, для которого оно является минимальным; $t_{i\,\text{у}}$ – время управления i-го ИК.

Выполняется проверка возможностей контроллера – пропускной возможности информационного канала системы:

$$T \ge \sum_{j=1}^{J} t_{i\,\text{у}\max}, \tag{4}$$

где $t_{j\,\text{у}\max}$ – максимальное время управления ИК системы при измерении сигнала j. Время управления складывается из задания режима работы ИК, пуска, анализа готовности, чтения результата измерения и записи его в массив измерительных данных.

Если условия (2)–(4) выполняются и не выполняются условия отсутствия решения задачи [4], можно приступать к составлению расписания.

3. *Построение матрицы потенциальных возможностей* (МПВ). Матрица потенциальных возможностей строится следующим образом. Столбцы соответствуют перечню сигналов. Строки определяют ИМ, способные измерить хотя бы один из сигналов. Число строк определяется числом ИМ, способных участвовать в организации измерительной структуры системы.

Каждый элемент матрицы $P=\{p_{ij}\}$ находится на пересечении столбца, соответствующего j-му сигналу (IS_j), и строки, соответствующей i-му ИМ (IM_i). Если IM_i не может измерить сигнал IS_j, то $p_{ij} = 0$. Если же вектор параметров IM_i удовлетворяет требованиям вектора па-

раметров IS_j, элементу матрицы P присваивается значение $P_{ij} = \{M_i, NM, C_i, V_i\}$, где M_i – номер ИМ в базе измерительных данных; NM – число входов ИМ; C_i – код режима работы ИМ, в котором наилучшим образом удовлетворяются требования к измерению сигнала IS_j; V_i – характеристика ИМ, отображающая количество свободных тактов синхронизации [1].

4. *Распределение сигналов по ИМ, определение времени измерения и места размещения результата в массиве выходных данных*. Для выполнения этого этапа необходимо произвести назначение измерительного сигнала на вход измерительного канала; определить режим работы измерительного канала; задать время начала измерения и время выхода на связь с контроллером [1].

При этом формируются таблицы расписания работы контроллера R, каждого измерительного канала R_i. Таблица R содержит управляющую информацию для контроллера: какой ИК необходимо включить и в каком режиме или какой ИК необходимо опросить и куда записать результат измерения. Таблица R объединяет результаты составления расписания для контроллера. Распределение начинается с сигналов, имеющих наибольший вес или наименьшее число степеней свободы. Если сигнал распределяется на i-м ИК, необходимо определить время запуска ИК на измерение $l_{ij} = \tau_j / \Delta T$; определить время работы ИК в заданном режиме $\Delta l_{ij} = t_{ijp} / \Delta T$, где Δl_{ij} – число позиций таблицы R_i, которые соответствуют времени работы ИК и не должны быть заняты другими сигналами, т. е. позиции с l_{ij} по $(l_{ij} + \Delta l_{ij})$ распределяются на время измерения сигнала j. Если сигнал назначен на измерение на какой-либо ИК, корректируется матрица, отвечающая за занятость ИК, т. е. параметр числа входов ИК k_i во всех элементах, соответствующих этому ИК, уменьшается на единицу [1].

Назначение сигналов S_j на ИК происходит после переупорядочивания ИМ в соответствии с V_i. Такой порядок действий позволяет распределить запуски процедуры измерения системы на измерительных модулях системы равномерно.

Далее приводится словесное описание блок-схемы алгоритма распределения сигналов по ИК ИМ измерительной системы, изображенной на рисунке.

1. Инициализация переменных.

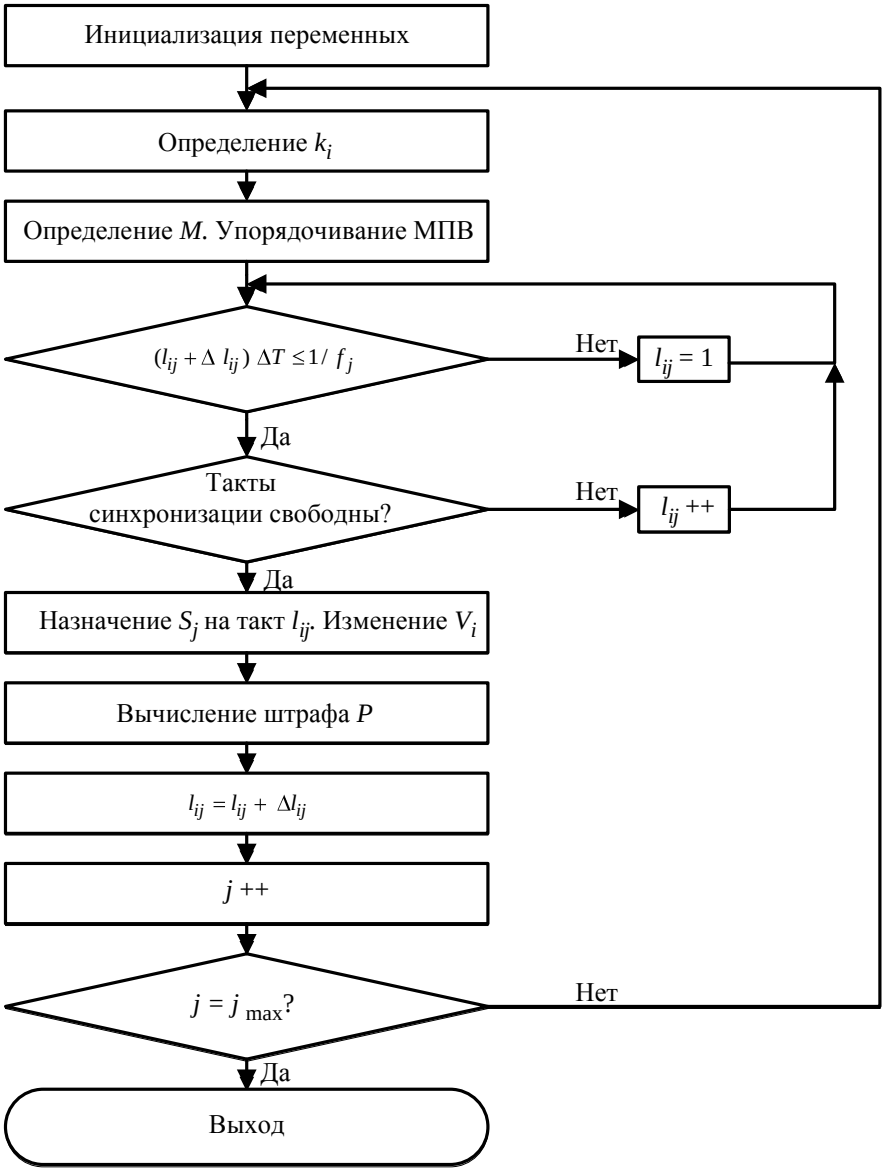
2. Производится переупорядочение МПВ в соответствии с убыванием $V_i = \dfrac{l_{i\,\text{св}}}{k_{i\,\text{св}}}$, где $l_{i\,\text{св}}$ – число свободных тактов; $k_{i\,\text{св}}$ – число свободных каналов. Выбирается ИМ с наибольшим значением V_i, значение номера ИК определяется номером первого свободного канала.

3. Выполняется проверка соответствия текущего значения l_{ij} требуемой частоте измерения сигнала S_j:

$$(l_{ij} + \Delta l_{ij})\,\Delta T \le 1/\,f_j. \qquad (5)$$

Если условие (5) не выполняется, l_{ij} первого запуска ИК присваивается значение 1 и выполнение алгоритма продолжается с п. 3. Здесь же определяется отсутствие возможности составления расписания (не удается найти такт синхронизации для назначения сигнала в течение всего периода его измерения $1/\,f_j$).

4. Выполняется проверка занятости тактов синхронизации ИМ, необходимых для проведения измерения. Если один из тактов занят, l_{ij} первого запуска увеличивается на единицу и выполняется п. 3.



5. S_j назначается на первый свободный ИК первого ИМ в МПВ на шаг l_{ij} дискретизации, принятый при составлении расписания ΔT (при инициализации $l_{ij} = 0$). Значение V_i изменяется в соответствии с количеством занятых сигналом S_j тактов.

6. Вычисляется величина функции штрафов P по формуле (1).

7. Значение l_{ij} изменяется на $(l_{ij} + \Delta l_{ij})$.

8. Изменяется номер измерительного сигнала S_j.

9. Условие выхода из блок-схемы.

Если решение задачи составления расписания не найдено, задание на измерительный эксперимент поставлено некорректно и должно быть изменено.

Вычислительная сложность – число шагов, выполняемых алгоритмом в худшем случае как функция размерности задачи, представленной входными данными [5]. Определенная таким образом сложность является временной сложностью. Можно считать размерностью задачи составления расписания измерительного эксперимента число измерительных каналов $|K|$ и число измерительных сигналов $|S|$, тогда вычислительной сложностью является функция двух переменных $f(n, m)$, равная наибольшему числу шагов, выполняемому алгоритмом для ИС с n измерительными каналами и заданием на измерительный эксперимент, включающий в себя m сигналов. Шагами алгоритма называют выполнение таких операций, как арифметические операции, условные переходы, операции косвенной переадресации и т. д. Таким образом, вычислительная сложность зависит от программной реализации алгоритма, поэтому в дальнейшем будем говорить об асимптотической вычислительной сложности.

Рассмотрим случай, при котором любой сигнал из S может быть назначен на любой ИК из K, в этом случае число всех однозначных функций $f: S \to K$ равно:

$$nN_1 \times (n-1)N_2 \times (n-2)N_3 \cdots (n-i+1)N_i \cdots (n-m+1)N_m = \\ = \frac{n!}{(n-m)!} \prod_{j=1}^{m} N_j,$$

где N_j – возможное увеличение фазового сдвига начального измерения для j-го измерительного сигнала.

Вычислительная сложность алгоритма, блок-схема которого изображена на рисунке, имеет вычислительную сложность, определенную выражением

$$m \log m + n \log n + mn + \sum_{j=1}^{m} N_j \,. \qquad (6)$$

Таким образом, алгоритм имеет полиномиальную вычислительную сложность (6) и позволяет сократить время подготовки измерительного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы структурного проектирования измерительно-вычислительных систем / В. В. Алексеев, П. Г. Королев, Н. С. Овчинников, Е. А. Чернявский. СПб.: Энергоатомиздат, 1999. 110 с.

2. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 466 с.

3. Задача составления расписания многоканальных средств измерений с автоматической коррекцией. Критерии эффективности / В. В. Алексеев, П. Г. Королёв, Н. В. Романцова и др. // Приборы. 2011. № 7. С. 45–49.

4. Романцова Н. В. Разработка алгоритмов перераспределения ресурсов в измерительно-вычислительных системах // Пробл. автоматизации и управления в технических системах: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 19–22 апр. 2011 / Пенз. гос. ун-т. Пенза, 2011. Т. 1. С. 132–135.

5. Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988. 213 с.

Grubo E. O., Korolev P. G., Romantsova N. V., Utushkina A. V.

INCOMPLETE ENUMERATION SCHEDULING ALGORITHM OF THE MEASURING SYSTEM

The scheduling algorithm of the measuring system, which optimizes the value of the error of dating and reduces the preparation time measuring experiment.

Measuring experiment, measuring system, schedule measuring system, penalty function, the computational complexity