

УДК 62.519

# ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

**В. А. Комаров,**

канд. техн. наук, доцент

**А. В. Сарафанов,**

доктор техн. наук, профессор

Сибирский федеральный университет

Рассмотрен метод, обеспечивающий улучшение эксплуатационных характеристик многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований объектов с большим временем реконfigurирования. Метод основан на минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки за счет определения оптимальной последовательности обработки заданий в соответствии с критерием минимума суммарного времени реконfigurирования. Приведены результаты оценки его эффективности средствами имитационного моделирования.

**Ключевые слова** — многопользовательский режим, распределенные измерительно-управляющие системы, дистанционный эксперимент, удаленный доступ, Интернет.

## Введение

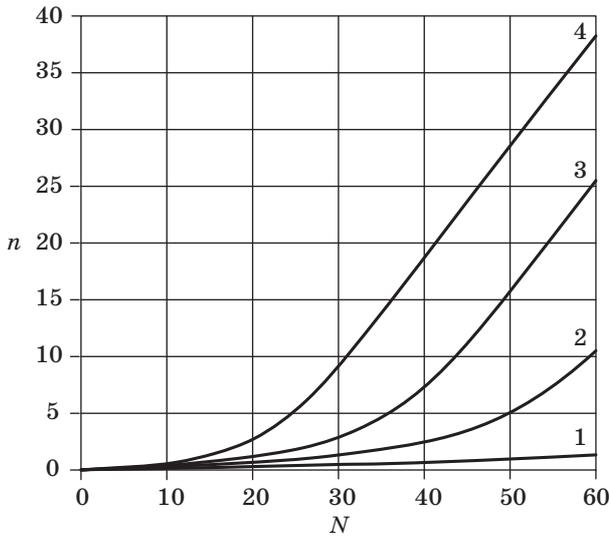
В связи с активным внедрением в научно-исследовательскую и учебную деятельность многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (РИУС) вопросы повышения их пропускной способности и динамики функционирования становятся все более актуальными. При этом перспективным направлением развития РИУС в области автоматизации экспериментальных исследований радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются системы, обеспечивающие экспериментальные исследования протекающих в РЭА комплексных процессов, таких, например, как тепловых и электрических, электрических, тепловых и механических и т. п. [1]. Подобные уникальные исследования в режиме удаленного доступа по сети Интернет представляют особый интерес в научно-исследовательской деятельности (решение вопросов идентификации параметров комплексных математических моделей) и в учебном процессе (изучение комплексных эффектов в РЭА).

## Постановка задачи

Инерционность нагрева и охлаждения отдельных узлов и элементов РЭА как объекта исследо-

вания (ОИ), время изменения номиналов электро-радиоэлементов (ЭРЭ), а также время коммутации вариантов исполнения функциональных узлов и/или типонаминалов ЭРЭ служат причиной довольно длительного времени изменения конфигурации ( $t_{\text{рек}}$ ) и состояния объекта исследования ( $t_{\text{рек}} \approx 5 - 10$  с). В свою очередь, длительность времени реконfigurирования ограничивает использование многопользовательского режима функционирования данных РИУС в связи с их малой пропускной способностью и низкой динамикой функционирования. Последние обусловлены недостаточной скоростью обслуживания заданий на измерения и, как следствие, возникающим накоплением заданий в очереди.

В целях оценки объема очереди проведено математическое моделирование функционирования многопользовательской РИУС при различных значениях отношения  $\lambda/\mu$  ( $\lambda$  — интенсивность поступления требований от каждого пользователя,  $\mu$  — интенсивность обслуживания требований) на примере показательного закона распределения времени обслуживания [2, 3]. По результатам получены графики зависимостей среднего числа заданий в очереди  $n$  от числа пользователей  $N$  в произвольный момент времени (рис. 1).



■ Рис. 1. Зависимость среднего числа заданий в очереди для различных отношений  $\lambda/\mu$ : 1 — 0,01; 2 — 0,02; 3 — 0,03; 4 — 0,05

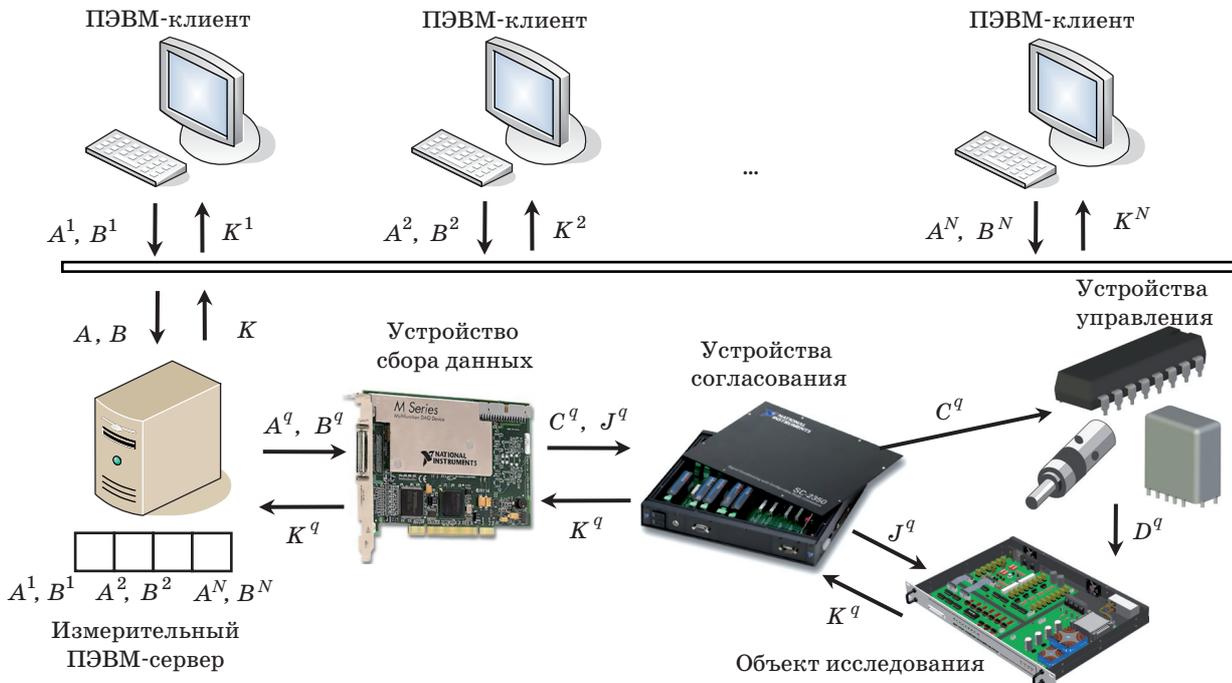
Время обслуживания одного задания  $t_{обсл}$  определяется суммой величин времени реконфигурации  $t_{рек}$  и времени измерения требуемых параметров и характеристик  $t_{изм}$ . Время ожидания результатов измерения пользователями  $t_{ож}$  в общем виде определяется следующим выражением [2, 3]:

$$t_{ож} = t_{оч} + t_{обсл} = n \cdot t_{обсл} + t_{обсл} = t_{рек} \cdot (n + 1) + t_{изм} \cdot (n + 1).$$

Современный уровень развития компьютерных измерительных технологий, унификация аппаратных и программных решений в области автоматизации измерений и обработки измерительной информации [4] позволяют сократить время измерения  $t_{изм}$  вольтамперных, передаточных, частотных, нагрузочных и других характеристик РЭА до 1,5–2 с [5]. Таким образом, для физических процессов, которые можно условно отнести к медленно изменяющимся (инерционным), основной вклад в динамику функционирования вносит величина  $t_{рек}$ . В связи с этим для рассматриваемого класса систем являются актуальными вопросы разработки и исследования методов повышения показателей их функционирования, основанных на сокращении времени изменения конфигурации и состояния объектов исследования.

**Метод минимизации операций управления**

Обобщенная структурная схема многопользовательской РИУС автоматизации научного и учебного экспериментов представлена на рис. 2. Многопользовательское функционирование РИУС, обеспечивающее *одновременную работу* группе



■ Рис. 2. Обобщенная структурная схема многопользовательской РИУС:  $A^1, A^2, \dots, A^N$  — массивы параметров управления ОИ;  $B^1, B^2, \dots, B^N$  — массивы параметров тестирующих сигналов и сигналов управления;  $C^q$  — массив (вектор) сигналов управления;  $J^q$  — массив измерительных и тестирующих сигналов;  $D^q$  — вектор воздействий на ОИ;  $K^q$  — массив сигналов, характеризующих состояние ОИ;  $N$  — число пользователей;  $q$  — порядковый номер извлечения заданий из очереди

пользователей, достигается реализацией специализированного алгоритма программного обеспечения (ПО) серверного уровня, которое осуществляет буферизацию и очередность доступа к объекту исследования в порядке поступления заданий на измерение (*first in — first out*) [3, 6, 7]. Подготовка эксперимента — выбор структуры объекта исследования, настройка параметров конфигурации, задание параметров тестирующих сигналов ( $A^N, B^N$ ) — производится на уровне клиентского ПО. Подготовленное задание передается на измерительный ПЭВМ-сервер, сопряженный с объектом исследования, и в случае занятости ОИ измерением ставится в очередь. После освобождения измерителя происходит формирование тестовых сигналов и сигналов управления —  $C^q, J^q$ , реконфигурирование объекта исследования —  $D^q$ , измерение исследуемых сигналов в соответствии с новым заданием —  $K^q$ , передача их обратно пользователю на ПЭВМ-клиент, затем начинается обработка следующего задания.

Рассмотрим очередь заданий на измерительном ПЭВМ-сервере в процессе функционирования многопользовательской РИУС. В соответствии с результатами моделирования (см. рис. 1) среднее число заданий в очереди при  $\lambda/\mu \geq 0,02$  и  $N \geq 50$  превышает 5. Каждое из заданий содержит массивы тестирующих и управляющих сигналов, а также массив параметров управления.

Предположим, что на ОИ подается одно управляемое воздействие  $\bar{X}$  (например, тепловое), описываемое значением  $x_m$ , где  $m = 1 \dots s$ ;  $s$  — максимально возможное число значений  $\bar{X}$ . Введем обозначения:

$S_i$  — состояние ОИ, определяемое  $i$ -м заданием в очереди и соответствующее значению  $x_m$  параметра управления  $\bar{X}$ ,  $i$  — порядковый номер поступления задания в очередь от пользователей,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  — число заданий в очереди;

$S_0$  — состояние ОИ на начало обработки заданий из очереди;

$t_{ij}$  — длительность операции управления, необходимой для перестройки (перевода) объекта исследования из конфигурации  $S_i$  в конфигурацию  $S_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Рассмотрим матрицу длительностей переходов объекта исследования по состояниям  $S_n$  размером  $(n + 1)(n + 1)$ , в ячейках которой расположим соответствующие времена  $t_{ij}$ . В общем случае данная матрица несимметрична, т. е. времена перехода объекта из состояния  $S_i$  в  $S_j$  и из  $S_j$  в  $S_i$  при  $i \neq j$  могут не совпадать, например, в связи с аппаратными особенностями реализации процесса нагрева и охлаждения ЭРЭ, установленного на радиаторе, и т. п. На рис. 3 представлена последовательность «перехода» объекта исследования по состояниям при обслуживании заданий

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	...	$S_{n-1}$	$S_n$
$S_0$	0	$t_{01}$	$t_{02}$	$t_{03}$	$t_{04}$	...	$t_{0(n-1)}$	$t_{0n}$
$S_1$	$t_{10}$	0	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	...	$t_{1(n-1)}$	$t_{1n}$
$S_2$	$t_{20}$	$t_{21}$	0	$t_{23}$	$t_{24}$	...	$t_{2(n-1)}$	$t_{2n}$
$S_3$	$t_{30}$	$t_{31}$	$t_{32}$	0	$t_{34}$	...	$t_{3(n-1)}$	$t_{3n}$
$S_4$	$t_{40}$	$t_{41}$	$t_{42}$	$t_{43}$	0	...	$t_{4(n-1)}$	$t_{4n}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_{n-1}$	$t_{(n-1)0}$	$t_{(n-1)1}$	$t_{(n-1)2}$	$t_{(n-1)3}$	$t_{(n-1)4}$	...	0	$t_{(n-1)n}$
$S_n$	$t_{n0}$	$t_{n1}$	$t_{n2}$	$t_{n3}$	$t_{n4}$	...	$t_{n(n-1)}$	0

■ Рис. 3. Матрица длительностей «переходов» объекта исследования по состояниям  $S_n$

на измерение в порядке их поступления —  $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_{n-1}, S_n$ .

Общее время, затраченное на выполнение операций управления, определяемых заданиями в очереди, вычисляется в соответствии с выражением

$$T_{\Sigma \text{упр}} = \sum_{k=0}^n t_{k, k+1}.$$

Следует отметить, что последовательностей перехода по конфигурациям, обязательным условием для которых является начало перехода из состояния  $S_0$ , может быть несколько. На рис. 4 представлены примеры некоторых последовательностей перехода по состояниям, отличных от дисциплины обслуживания *FIFO*, для  $n = 5$ .

Общее число возможных маршрутов  $K_w$  определяется как число перестановок порядка  $n$  [8]:

$$K_w = P_n = n!.$$

В общем виде суммарное время управления определяется в соответствии с выражением [8]

$$T_{\Sigma \text{упр}} = \sum_{\substack{i, j=1 \\ i \neq j}}^n t_{i, j} \cdot x_{i, j},$$

где  $x_{i, j}$  — переменные, ассоциированные с переводом объекта исследования из состояния  $S_i$  в  $S_j$ , т. е.  $x_{i, j} = 1$ , если данный переход входит в маршрут.

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
$S_0$	0	$t_{01}$	$t_{02}$	$t_{03}$	$t_{04}$	$t_{05}$
$S_1$	$t_{10}$	0	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$
$S_2$	$t_{20}$	$t_{21}$	0	$t_{23}$	$t_{24}$	$t_{25}$
$S_3$	$t_{30}$	$t_{31}$	$t_{32}$	0	$t_{34}$	$t_{35}$
$S_4$	$t_{40}$	$t_{41}$	$t_{42}$	$t_{43}$	0	$t_{45}$
$S_5$	$t_{50}$	$t_{51}$	$t_{52}$	$t_{53}$	$t_{54}$	0

■ Рис. 4. Возможные последовательности перехода по состояниям: — — —  $S_0, S_1, S_5, S_4, S_3, S_2$ ; - - - -  $S_0, S_3, S_2, S_4, S_5, S_1$

рут, и  $x_{i,j} = 0$ , если не входит, при ограничениях, подробно описанных в работе [9].

Основной идеей предлагаемого в статье метода является определение такой последовательности извлечения запросов из очереди (маршрута перехода по состояниям, определяемым значениями управляемого воздействия заданий в очереди), чтобы общее время, затрачиваемое на реконфигурацию, было минимальным:

$$T_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min.$$

Этим достигается уменьшение времени обслуживания запросов за счет минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки объекта исследования (РЭА или ее отдельных функциональных узлов), повышение динамики функционирования и, как следствие, увеличение максимально допустимого числа одновременно работающих пользователей [3, 7].

Задачу минимизации  $T_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min$  необходимо решать каждый раз при поступлении нового задания в очередь, так как значения параметра управления  $x_m$  поступающих заданий, а также состояние  $S_0$  в произвольный момент времени случайны. Фактически сформулированная задача нахождения минимального значения  $T_{\Sigma \text{упр}} \min$  сходна с классической задачей комбинаторики — несимметричной задачей коммивояжера (бродячего торговца), когда необходимо обойти все города (состояния ОИ, определяемые заданиями в очереди) по наикратчайшему пути (за минимальное время  $T_{\Sigma \text{упр}} \min$ ), для решения которой существует множество известных алгоритмов [8, 9]. Предлагаемый метод может быть также использован для оптимизации управления объектами с несколькими управляемыми воздействиями. В этом случае необходимо будет решить многомерную задачу.

### Оценка эффективности метода

В процессе исследований эффективность рассмотренного метода была проанализирована на имитационной модели многопользовательской РИУС для «жадного» алгоритма [8] решения задачи минимизации при следующих исходных данных:

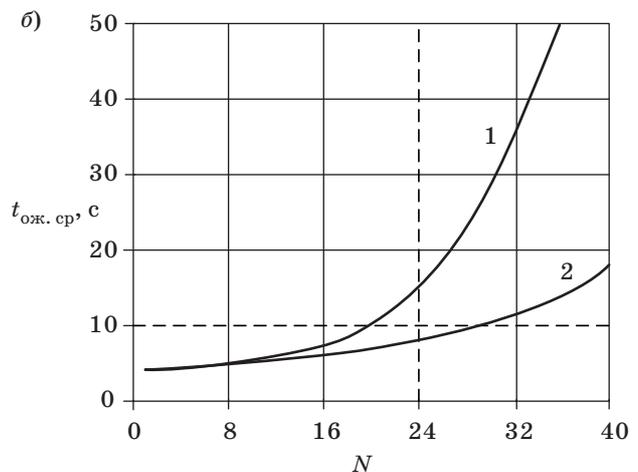
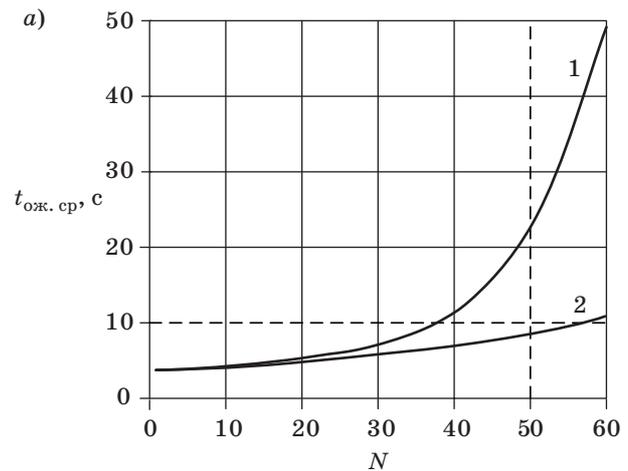
- число управляемых воздействий  $k = 1$ ;
- число значений параметра управления  $m = 10$ ;
- длительность операций перевода объекта исследования из конфигурации  $S_i$  в конфигурацию  $S_j$  принята одинаковой для всех направлений переходов,  $t_{i,j} = 1$  с;
- время измерения параметров и характеристик объекта исследования  $t_{\text{изм}} = 1$  с.

Значения параметра управления, отправляемые с очередными сообщениями от пользовате-

лей, формировались при помощи генератора случайных чисел, распределенных по равномерному закону.

Результаты имитационного моделирования демонстрируют эффективность применения разработанного метода, в частности, для двух значений интенсивностей поступления сообщений  $\lambda$  удалось достигнуть сокращения  $t_{\text{ож. ср}}$  с 24 до 9 с (рис. 5, а) и с 15 до 8 с (рис. 5, б), что при рассмотренных исходных данных равносильно увеличению максимально допустимого числа одновременно работающих пользователей  $N_{\text{max}}$  с 37 до 55 (см. рис. 5, а) и с 20 до 29 (см. рис. 5, б) пользователей соответственно при сохранении динамики функционирования ( $t_{\text{ож. ср}} \approx 8 - 10$  с) на прежнем уровне.

Обозначим через  $\xi$  относительное сокращение величины среднего времени ожидания. При использовании разработанного метода величина  $\xi$  характеризует его эффективность и определяется в соответствии с выражением



■ Рис. 5. Среднее время ожидания результатов измерения: а —  $\lambda_1 = 0,006$ ,  $N = 50$ ; б —  $\lambda_2 = 0,011$ ,  $N = 24$ : 1 — обслуживание запросов в порядке их поступления; 2 — перестановка сообщений в очереди

$$\xi = \frac{t_{\text{ож. ср}} - t_{\text{ож. ср}}^*}{t_{\text{ож. ср}}} \cdot 100\% \Big|_{N=\text{const}},$$

где  $t_{\text{ож. ср}}$ ,  $t_{\text{ож. ср}}^*$  — значение среднего времени ожидания в многопользовательской РИУС соответственно до и после применения разработанного метода.

Для рассмотренного выше примера  $\xi_{\lambda 1} \approx 63\%$ ,  $\xi_{\lambda 2} \approx 47\%$ . Следует отметить, что величина  $\xi$  зависит от вида матрицы длительностей переходов, числа управляемых воздействий  $k$ , числа значений параметра управления  $m$ , текущего числа пользователей системы  $N$ , интенсивности поступления сообщений от каждого пользователя  $\lambda$ .

В настоящее время авторы ведут дальнейшие исследования метода в следующих направлениях:

- выявление оптимальных соотношений величин  $t_{\text{изм}}$ ,  $t_{\text{рек}}$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $N$ ,  $\lambda$ , при которых применение метода:

- начинает быть эффективным ( $\xi \geq 10\%$ );

- является наиболее эффективным ( $\xi \rightarrow \max$ );
- оценка влияния алгоритма решения задачи минимизации  $T_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min$ .

### Заключение

В целом рассмотренный метод существенно расширяет перечень возможных ОИ физических процессов в образцах РЭА при построении многопользовательских РИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований. Применение метода в практике разработки РИУС позволило, в частности, при расширении видов проводимых исследований сократить время ожидания результатов измерения в среднем на 20–40 %, что дало возможность увеличить число одновременно работающих пользователей в среднем на 25 % [10].

В ряде случаев благодаря разработанному методу функционирование РИУС было переведено из монопольного режима в многопользовательский.

### Литература

1. Гольдин В. В., Журавский В. Г., Кофанов Ю. Н., Сарафанов А. В. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств. — М.: Радио и связь, 2002. — 386 с.
2. Takagi H. Queueing analysis. A foundation of performance evaluation. Vol. II. Finite Systems. — Amsterdam: North-Holland, 1993. — 560 p.
3. Комаров В. А., Сарафанов А. В. Разработка математической модели многопользовательского режима функционирования аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 67–74.
4. Официальный сайт корпорации National Instruments. 2010. www.ni.com (дата обращения: 12.11.2010).
5. Патент РФ № 2406140. Способ тестирования территориально-удаленных объектов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов.
6. Арбузов Ю. В. и др. Новый подход к инженерному образованию: теория и практика открытого доступа к распределенным информационным и техническим ресурсам / Под ред. А. А. Полякова. — М.: Центр-Пресс, 2000. — 238 с.
7. Глинченко А. С., Комаров В. А., Сарафанов А. В. Повышение эффективности эксплуатации многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем // Вестник Воронежского ГТУ. 2008. № 10. С. 186–189.
8. Таха Хемди А. Введение в исследование операций: пер с англ. 7-е изд. — М.: Вильямс, 2005. — 912 с.
9. Иглин С. П. Решение некоторых задач теории графов в MATLAB // EXPonenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 4. С. 28–33.
10. Сарафанов А. В. и др. Исследование полупроводниковых приборов на основе специализированного сетевого аппаратно-программного комплекса. Версия 1.0: электрон. учеб. пособие. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 1 электрон. опт. диск (CD).