

УДК 62.519

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

Сравнение эффективности методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования с удаленным доступом

В. А. Комаров^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-9210-9908

А. В. Сарафанов^б, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-4264-9388

С. Р. Тумковский^в, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-1647-2171, STumkovskiy@hse.ru

^аАО «Информационные спутниковые системы им. академика М. Ф. Решетнёва», Ленина ул., 52, Железнодорожск, 662972, РФ

^бООО Витте Консалтинг (ГК «АЙ-ТЕКО»), Кедрова ул., 15, Москва, 117036, РФ

^вНациональный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Мясницкая ул., 20, Москва, 101000, РФ

Введение: бурное развитие информационного общества выражается в появлении новых моделей экономической деятельности, форм оказания образовательных и социальных услуг, научной деятельности и прочем на основе постоянно совершенствующихся цифровых технологий. Это в свою очередь приводит к возникновению новых требований к знаниям и навыкам современных инженерных кадров, подготовка которых базируется на различных лабораторных исследованиях. Современной формой их реализации является многопользовательский удаленный доступ из цифровой образовательной среды к специализированному экспериментальному оборудованию (лабораторным установкам/стендам/макетам), обеспечивающий эффективное использование данного оборудования. **Цель:** сравнительный анализ методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования, функционирующего с многопользовательским удаленным доступом. **Методы:** управление процедурой обслуживания запросов пользователей на основе алгоритмов диспетчеризации, которые учитывают функциональное и параметрическое содержание обрабатываемых запросов (настройки конфигурации объекта исследования, вид выполняемых измерений, параметры тестовых сигналов и пр.). **Результаты:** на базе предложенного подхода для многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем разработаны следующие методы. Метод минимизации операций управления, обеспечивающий определение последовательности извлечения заданий из очереди в соответствии с минимумом суммарного времени управления для всех запросов, имеющихся в очереди на текущий момент. Метод временного разделения многократных измерений, обеспечивающий распределение операций статистической обработки результатов измерения между программным обеспечением измерительно-управляющей ЭВМ и терминала пользователя. Метод распараллеливания функциональных операций, обеспечивающий сокращение времени обслуживания запросов за счет программного разделения и параллельного выполнения операций управления и измерения для имеющихся в очереди запросов, относящихся к разным объектам управления и контроля. Сравнительный анализ применяемых подходов показал, что наиболее эффективными с точки зрения затрат на оснащение одного рабочего места пользователя являются методы, основанные на управлении процедурой обслуживания запросов пользователей. **Практическая значимость:** разработанные методы позволили создать ряд образцов многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем автоматизации учебных и научных экспериментальных исследований со сниженной на 16–40 % себестоимостью оснащения рабочего места пользователя и пропускной способностью 30–50 одновременно работающих пользователей на основе одного комплекта специализированного экспериментального оборудования.

Ключевые слова – экспериментальное оборудование с удаленным доступом, многопользовательская распределенная измерительно-управляющая система, автоматизация учебных и научных экспериментальных исследований, пропускная способность, многопользовательский доступ, цифровая образовательная среда, система массового обслуживания.

Для цитирования: Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Сравнение эффективности методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования с удаленным доступом. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 68–76. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

For citation: Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 68–76 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

Введение

В настоящее время в системе высшего образования происходят глубокие изменения под влиянием новых глобальных тенденций, связанных, прежде всего, с бурным развитием цифровых технологий, активным формированием инфор-

мационного общества, а также переходом промышленности на новый технологический уклад, базисом которого является цифровая экономика. Интеграция и социальное взаимодействие в рамках информационного общества выражаются в появлении новых моделей экономической деятельности, оказания социальных услуг, образо-

вания, научной деятельности, производства и пр. на основе постоянно совершенствующихся цифровых технологий. Это в свою очередь приводит к возникновению новых требований к знаниям и навыкам, отвечающим условиям интеграции в глобальное цифровое пространство, которые необходимо учитывать в подготовке современных специалистов в области техники и технологий [1, 2].

В связи с тем, что процесс подготовки таких специалистов базируется на различных лабораторных исследованиях, одним из приоритетных направлений развития современной цифровой образовательной среды (ЦОС) является организация доступа в ней к специализированному экспериментальному оборудованию (лабораторным установкам/стендам/макетам) в удаленном режиме как можно большему числу пользователей [3–8].

Реализация данного подхода выполняется посредством применения в ЦОС многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС), реализующих подход эксплуатации единичных экземпляров экспериментального оборудования в удаленном режиме на основе концепции мультиарендности и обеспечивающих дистанционный доступ и возможность коллективной работы группе исследователей с индивидуальными параметрами и траекторией проводимых исследований [9–17].

В этой связи для МРИУС как составных компонентов современной ЦОС является актуальной разработка методов повышения числа одновременно обслуживаемых в ней терминалов пользователей.

Методы эксплуатации экспериментального оборудования с удаленным доступом

Проведенный анализ технических решений в части реализации методов эксплуатации экспериментального оборудования с удаленным доступом как в России, так и за рубежом [9–17] позволил выделить следующие, применяемые в настоящее время, подходы повышения их пропускной способности функционирующих на их основе монопольных и многопользовательских систем, которые в формализованном виде приведены в таблице. Под пропускной способностью систем, реализующих рассматриваемые в таблице методы, понимается число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей при заданном времени их реакции на запросы пользователей [9, 14].

При монопольном методе доступа (вариант 1) увеличение пропускной способности выполняется посредством развертывания дополнительных комплектов однотипного дублирующего экс-

периментального оборудования (лабораторных установок/стендов/макетов и соответствующих устройств). При этом крайне актуальными являются задачи его размещения в специализированных помещениях и дальнейшего сервисного обслуживания.

При многопользовательском методе эксплуатации экспериментального оборудования (вариант 2.1) одним из применяемых подходов повышения пропускной способности является дополнительное использование при обслуживании потока запросов пользователей математических моделей лабораторных установок/стендов/макетов [7, 13]. Данный подход имеет ограниченное применение в рамках исследовательского эксперимента, целью которого является идентификация или верификация разрабатываемых математических моделей исследуемых устройств, процессов или явлений.

Особенность функционирования МРИУС заключается в том, что характер обращения пользователей с терминалов к разделяемому ресурсу МРИУС является случайным, а время выполнения запросов зависит от заданных в них параметров функциональных операций управления и измерения, данные факты обуславливают вероятностный характер реакции МРИУС на формируемые пользователями запросы при их одновременной работе с разделяемым ресурсом. В качестве разделяемого ресурса МРИУС, который «кратковременно захватывается» для выполнения поступающих запросов пользователей, выступают автоматизированные лабораторные установки, стенды и макеты, а также устройства формирования тестовых и (или) управляющих сигналов, устройства сбора данных и т. п. для работы с ними.

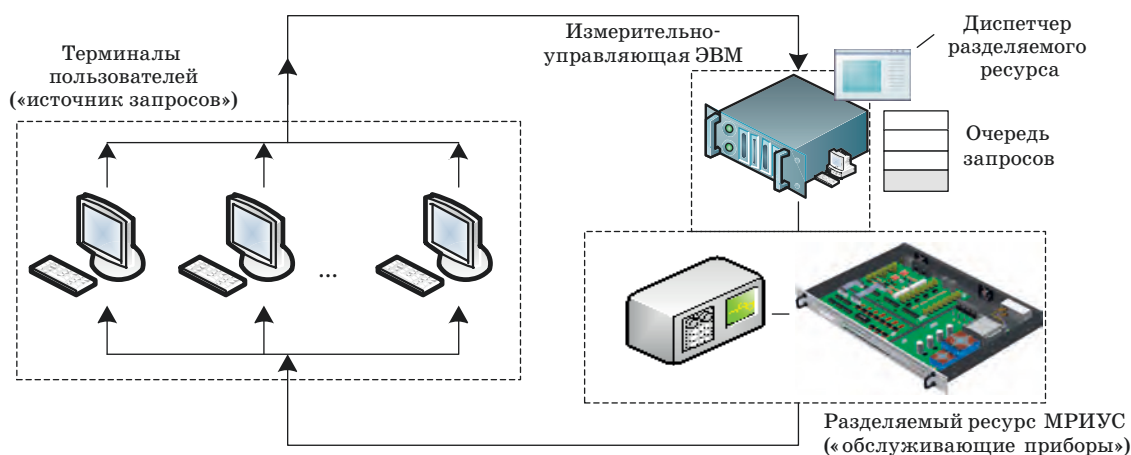
Необходимая оценка соответствующих вероятностно-временных характеристик работы пользователей с разделяемым ресурсом в МРИУС, как правило, выполняется средствами математического моделирования на основе ее представления в виде системы массового обслуживания (СМО). На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема МРИУС как замкнутой СМО (finite source queueing system).

В мировой практике, в том числе в России, в целях повышения пропускной способности МРИУС, реализующих метод эксплуатации экспериментального оборудования в режиме удаленного доступа на основе концепции мультиарендности, широкое распространение получил подход, основанный на распараллеливании обработки потока запросов пользователей посредством дублирования однотипных лабораторных установок/стендов/макетов и соответствующих устройств (вариант 2.2) [12, 15, 17]. Использование данного подхода приводит к увеличению пропускной спо-

- Методы эксплуатации экспериментального оборудования в ЦОС и подходы к повышению пропускной способности реализующих их систем
- Methods of operation of experimental equipment in digital educational environment and approaches to increasing the throughput for the systems implementing them

Вариант	Метод эксплуатации экспериментального оборудования	Подход к повышению пропускной способности	Достоинства	Недостатки	Эффективность подхода, $ \delta \cdot 100\%$
1	Монопольный	Прямое дублирование однотипного экспериментального оборудования [10]	Простота реализации	Избыточность и высокая стоимость развертывания, а также содержания соответствующего экспериментального оборудования	—
2.1	Многопользовательский (на основе МРИУС)	Распараллеливание обработки потока запросов пользователей посредством их обслуживания между экспериментальным оборудованием и математическими моделями установок/стендов/макетов [9, 14]	Возможность реализации комплексных экспериментальных исследований (натурный эксперимент и его аналог — вычислительный эксперимент)	Ограниченные возможности применения, например, в рамках исследовательского эксперимента в области идентификации или верификации математических моделей	Оценка не проводилась*
2.2		Распараллеливание обработки потока запросов пользователей посредством дублирования однотипных лабораторных установок/стендов/макетов и пр. [12, 15, 17]	Простота реализации	Высокие относительные материальные затраты на реализацию, кратные стоимости дополнительных комплектов дублирующего экспериментального оборудования	До пяти
2.3		Управление процедурой обслуживания запросов пользователей [18–20]	Реализуется посредством простой программной модификации диспетчера разделяемого ресурса	Необходимость информации о длительностях функциональных операций, выполняемых по запросам пользователей	До 40 и более

*Примечание. С методической точки зрения современная ЦОС должна предусматривать возможность проведения экспериментальных исследований совместно на физических объектах и их математических моделях (цифровых двойниках).



- **Рис. 1.** Представление процесса работы пользователей с разделяемым ресурсом МРИУС в виде СМО
- **Fig. 1.** Representation of the process of users' work process with shared resource of multi-user distributed measuring-control systems as a queuing system

способности системы, зависящему от соответствующего числа введенных дублирующих аппаратных средств. При этом в качестве его основного недостатка следует отметить увеличение затрат на создание МРИУС, в общем случае прямо пропорциональное числу организуемых дополнительных «обслуживающих приборов» [12, 15, 17].

Методы повышения пропускной способности МРИУС

Предложенный авторами данной статьи подход управления процедурой обслуживания запросов (вариант 2.3) воплощается посредством применения ряда разработанных специализированных методов и реализующих их алгоритмов диспетчеризации, которые учитывают функциональное и параметрическое содержание обрабатываемых запросов пользователей [18–20]. Под содержанием запроса понимаются установленные пользователем параметры выполняемых в МРИУС функциональных операций управления и измерения (настройки конфигурации объекта исследования, вид выполняемых измерений, параметры тестовых сигналов и пр.), а также особенности аппаратного построения МРИУС.

Для МРИУС, в которых доминирующей составляющей времени обслуживания запросов является время управления изменением состояния объекта исследования, предложен метод минимизации операций управления [18]. Суть данного метода заключается в определении последовательности извлечения заданий из очереди в соответствии с минимумом суммарного времени управления для всех запросов, имеющих на текущий момент в очереди. При указанном подходе обеспечивается сокращение времени обслуживания заданий за счет минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки объекта исследования. В результате достигается повышение оперативности функционирования МРИУС и, как следствие, ее пропускной способности.

Для МРИУС, в которых в процессе функционирования выполняются измерения с усреднением результатов многократных «точечных» измерений и (или) измеряемых зависимостей, применяется метод временного разделения многократных измерений [19]. Метод основан на распределении операций обработки результатов измерения между программным обеспечением измерительно-управляющей ЭВМ и терминала пользователя. При использовании данного метода вычисление средних арифметических значений осуществляется средствами графического интерфейса пользователя на основе рекуррентного алгоритма, что обеспечивает сокращение времени измерения за счет увеличения числа запросов каждого поль-

зователя к измерительно-управляющей ЭВМ и в ряде случаев позволяет повысить пропускную способность МРИУС.

Для многообъектовых МРИУС предложен метод распараллеливания выполняемых функциональных операций [20]. Суть данного метода заключается в программном разделении и параллельном выполнении операций управления и измерения для имеющихся в очереди запросов и относящихся к разным объектам управления и контроля, что обеспечивает сокращение времени обслуживания запросов и, как следствие, приводит к повышению пропускной способности МРИУС.

Эффективность применения предложенных методов повышения пропускной способности и реализующих их алгоритмов диспетчеризации в МРИУС зависит от соотношений длительностей выполняемых операций управления и измерения в соответствии с поступающими запросами. В связи с этим решение об использовании конкретного метода на этапе проектирования или эксплуатации МРИУС целесообразно принимать на основе анализа величины достигаемого относительного приращения пропускной способности, расчет которого может быть выполнен, например, средствами математического моделирования [18–20].

В целом же алгоритмы диспетчеризации, реализующие рассмотренные выше методы, позволяют повысить оперативность реакции МРИУС при выполнении запросов пользователей и, как следствие, обеспечивают возможность подключения дополнительных терминалов пользователей посредством внесения изменений только в соответствующее программное обеспечение МРИУС, исключая необходимость наращивания числа комплектов однотипного дублирующего экспериментального оборудования (аппаратных средств).

Оценка эффективности методов повышения пропускной способности МРИУС

Для оценки эффективности применяемых и предложенных методов повышения пропускной способности МРИУС рассмотрим представленные в таблице методы эксплуатации экспериментального оборудования с точки зрения обобщенного параметра, характеризующего приведенные затраты на оснащение одного рабочего места пользователя, — $S_{p.m}$.

При *монопольном* методе эксплуатации (вариант 1) затраты на оснащение дополнительных рабочих мест возрастают прямо пропорционально числу дополнительно вводимых комплектов лабораторных установок/стендов/макетов и соот-

ветствующих устройств. Таким образом, приведенные затраты остаются без изменения:

$$S_{p.m} = \frac{1}{N}(S_{a.o}N) = S_{a.o}, \quad (1)$$

где $S_{a.o}$ — стоимость одного экземпляра (комплекта) экспериментального оборудования; N — число одновременно работающих пользователей.

При *многопользовательском* методе эксплуатации (варианты 2.1–2.3) суммарные затраты на соответствующее аппаратно-программное обеспечение МРИУС «разделяются» между числом одновременно работающих пользователей. В итоге для многопользовательского метода эксплуатации экспериментального оборудования, реализуемого на основе МРИУС, себестоимость оснащения одного рабочего места обратно пропорциональна их общему количеству:

$$S_{p.m} = \frac{S_{\Sigma}}{N}, \quad (2)$$

где под S_{Σ} подразумеваются суммарные затраты на создание образца МРИУС, включающие в себя в том числе и $S_{a.o}$; N — число одновременно работающих терминалов пользователей.

Рассмотрим основные подходы повышения пропускной способности применительно к многопользовательскому методу эксплуатации экспериментального оборудования (лабораторных установок/стендов/макетов и соответствующих устройств). Обозначим переменной α относительное изменение числа одновременно работающих пользователей, обусловленное реализацией комплекса мероприятий, направленных на повышение пропускной способности МРИУС согласно одному из реализуемых подходов (см. таблицу):

$$\alpha = \frac{N^M - N}{N}, \quad (3)$$

где N и N^M — число одновременно работающих пользователей в исходной и модифицированной МРИУС соответственно.

Обозначим переменной β относительное изменение материальных затрат, связанное с реализацией соответствующего подхода:

$$\beta = \frac{S_{\Sigma}^M - S_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где S_{Σ} и S_{Σ}^M — затраты на реализацию исходной и модифицированной системы.

Относительное изменение затрат на оснащение одного рабочего места при реализации одного из подходов к повышению пропускной способно-

сти, характеризующее его эффективность, оценивается на основе следующего выражения:

$$\delta = \frac{S_{p.m}^M - S_{p.m}}{S_{p.m}} = \frac{S_{p.m}^M}{S_{p.m}} - 1, \quad (5)$$

где $S_{p.m}$, $S_{p.m}^M$ — себестоимость оснащения рабочего места в исходной и модифицированной МРИУС соответственно.

С учетом выражений (2)–(4) выражение (5) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{S_{p.m}^M}{S_{p.m}} - 1 = \frac{S_{\Sigma}^M}{N^M S_{\Sigma}} - 1 = \\ &= \frac{(\beta + 1)S_{\Sigma}}{(\alpha + 1)N S_{\Sigma}} - 1 = \frac{\beta + 1}{\alpha + 1} - 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим выражение (6). При реализации подхода распараллеливания потока запросов посредством дублирования комплектов экспериментального оборудования (вариант 2.2) $\alpha \approx 1 \dots 1,1$ [16]. Учитывая возрастающую стоимость используемого в качестве разделяемого ресурса экспериментального оборудования для данного подхода можно принять $\beta \approx 1$. Таким образом, относительное изменение себестоимости оснащения рабочего места для данного подхода составляет 0...–5 %.

При реализации предложенного авторами подхода, основанного на управлении процедурой обслуживания запросов (вариант 2.3), соответствующие затраты на модификацию диспетчера разделяемого ресурса МРИУС при повышении уникальности и стоимости используемых в качестве разделяемого ресурса МРИУС экспериментального оборудования, являются пренебрежительно малыми по сравнению с величиной S_{Σ} . То есть можно принять $\beta \approx 0$. Таким образом, для данного подхода выражение (6) можно записать следующим образом:

$$\delta \approx \frac{1}{(1 + \alpha)} - 1. \quad (7)$$

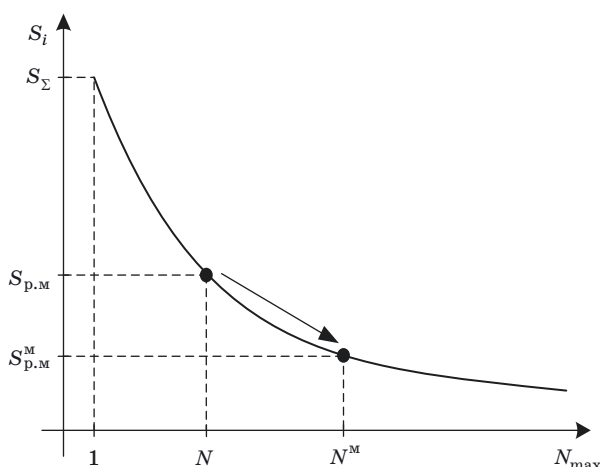
Относительное приращение числа терминалов пользователей характеризуется эффективностью применения соответствующего алгоритма диспетчеризации и, например, для ряда МРИУС α принимает значения 0,2...0,65 и более [18–20]. Таким образом, сокращение затрат на оснащение одного рабочего места, характеризующее эффективность применения предложенного авторами подхода повышения пропускной способности МРИУС, для приведенных значений α достигает 40 % и более (см. таблицу). Результаты оценки возможных значений величины δ для исследованных подходов приведены в соответстви-

ющем столбце таблицы. Учитывая тот факт, что современная ЦОС должна предусматривать возможность проведения экспериментальных исследований на физических объектах в комплексе с возможностью исследования математических моделей исследуемых объектов, устройств, процессов и явлений, оценка эффективности для соответствующего подхода повышения пропускной способности МРИУС (вариант 2.1) не проводилась.

Подход повышения пропускной способности МРИУС посредством дублирования комплектов однотипного экспериментального оборудования (вариант 2.2) также может быть использован совместно с предложенными и апробированными авторами методами и алгоритмами диспетчеризации (вариант 2.3). Это обеспечивает в ряде случаев исключение необходимости дальнейшего увеличения числа однотипных комплектов при возникающей потребности в увеличении числа обслуживаемых терминалов пользователей.

Предложенные методы реализуют направление повышения технического уровня МРИУС за счет снижения себестоимости оснащения одного рабочего места посредством увеличения общего числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей [см. выражение (2)]. Данный подход схематично представлен на рис. 2.

Выбор одного из предложенных методов повышения оперативности функционирования МРИУС в рамках управления процедурой обслуживания запросов (вариант 2.3) может быть выполнен как на этапе проектирования при наличии эмпирической информации о длительно-



■ **Рис. 2.** Направление снижения себестоимости рабочего места пользователя в МРИУС посредством повышения ее оперативности функционирования

■ **Fig. 2.** Cost reduction for the user workplace in multi-user distributed measuring-control systems by increasing its operational efficiency

стях выполняемых функциональных операций и их зависимостях от значений соответствующих параметров, так и в процессе функционирования МРИУС посредством реализации методики ее адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации, подробно рассмотренной в работе [5]. Так, в частности, применение предложенной методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации позволило посредством целевой модификации алгоритма диспетчеризации разделяемого ресурса в соответствии с разработанными авторами методами (см. вариант 2.3) увеличить на 35–50 % число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей для ряда образцов МРИУС при сохранении времени реакции на прежнем уровне [18–20], а также создать необходимые условия для их параллельного использования несколькими потоками обучаемых, в том числе в рамках смежных дисциплин, курсового проектирования, ФПК, НИРС.

Заключение

Разработанные и предложенные авторами методы повышения пропускной способности МРИУС, основанные на управлении процедурой обслуживания запросов, позволили посредством целевой модификации алгоритма диспетчеризации создать ряд образцов МРИУС автоматизации учебных и научных экспериментальных исследований со сниженной на 16–40 % себестоимостью оснащения рабочего места пользователя и пропускной способностью 30–50 одновременно работающих пользователей на основе одного комплекта специализированного экспериментального оборудования.

Дальнейшее развитие направления повышения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей в МРИУС авторами планируется в части разработки и исследования методов повышения оперативности функционирования с учетом технических особенностей их разделяемого ресурса и специфики прикладного назначения МРИУС.

Литература

1. Sanjie J., Oruklu E., Hanley R., Anand V., Anjali T. Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration. *International Journal of Engineering Education*, 2015, vol. 31, no. 1(A), pp. 106–120.
2. Grodotzki J., Ortelt T. R., Tekkaya A. E. Remote and virtual labs for engineering education 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1349–1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126

3. Gula M., Zakova K. Proposal of component based architecture for internet of things: online laboratory case study. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 337–342. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.153
4. Zapata Rivera L. F., Larrondo Petrie M. M. Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments. *iJOE*, 2016, vol. 12, no. 9, pp. 14–21. doi:10.3991/ijoe.v12i09.6129
5. Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как элемент современной цифровой образовательной среды. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 2, с. 83–94. doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94
6. Fomin S. S., Gudkov Y. I., Tumkovskiy S. R. Concept of a virtual workshop on ICT. *2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, 2018, pp. 787–790. doi:10.1109/itmqs.2018.8525034
7. Seiler S. Current trends in remote and virtual lab engineering. Where are we in 2013? *iJOE*, 2013, vol. 9, no. 6, pp. 13–16. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2898
8. Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliyah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M. Laboratory as a Service (LaaS): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories. *iJOE*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 13–21, doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654
9. Липай Б. Р., Маслов С. И. Интернет-лаборатория «Основы электротехники и электроники» как пример современного учебного комплекса с удаленным доступом для открытого инженерного образования. *Вестник Московского энергетического института*, 2017, № 2, с. 71–76. doi:10.24160/1993-6982-2017-2-71-76
10. *Cyber-physical laboratories in engineering and science education/* Eds. M. E. Auer, A. K. M. Azad, A. Edwards, T. De Jong. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 434 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76935-6>
11. Отраслевой стандарт 9.2–98. Учебная техника для образовательных учреждений. Системы автоматизированного лабораторного практикума. Основные положения. М., Росстандарт, 1998. 8 с.
12. Toyoda Y., Koike N., Li Y. An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud. *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2016, pp. 24–29. doi:10.1109/REV.2016.7444435
13. Tawfik M., Sancristobal E., Martin S., Gil R., Diaz G., Colmenar A., Peire J., Castro M., Nilsson K., Zackrisson J., Hakansson L., Gustavsson I. Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 60–72. doi:10.1109/TLT.2012.20
14. Markan C. M., Gupta P., Manas, Kumar G., Gupta S. Scalable multiuser remote laboratories provide on-demand hands-on laboratory experience. *2012 IEEE Conference on Technology and Society in Asia (T&SA)*, 2012, pp. 1–7. doi:10.1109/TSAAsia.2012.6397981
15. Yudi Limpraptono F., Putri Ratna A. A., Sudibyo H. New architecture of remote laboratories multiuser based on embedded web server. *iJOE*, 2013, vol. 9, iss. 6, pp. 4–11. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2886
16. Макаров А. Е., Сагдиев Р. К. Лабораторный стенд для исследования параметров высокочастотного цифрового сигнала. *Сборник трудов XV Международной конференции NI Days-2016*. М., ДМК-пресс, 2016, с. 177–178.
17. Евдокимов Ю. К., Кирсанов А. Ю., Салахова А. Ш., Петровская М. В. Дистанционные учебные лаборатории на аппаратной платформе NI. *Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments — 2012: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции*, Москва, 6–7 декабря 2012 г., М., ДМК-Пресс, 2012, с. 232–236.
18. Комаров В. А., Сарафанов А. В. Оптимизация операций управления в многопользовательских измерительно-управляющих системах. *Информационно-управляющие системы*, 2011, № 3, с. 52–56.
19. Комаров В. А., Глинченко А. С. Исследование эффективности временного разделения многократных измерений в распределенных измерительно-управляющих системах. *Информационно-управляющие системы*, 2013, № 4, с. 73–77.
20. Комаров В. А., Глинченко А. С., Сарафанов А. В. Распараллеливание функциональных операций в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах. *Датчики и системы*, 2012, № 4, с. 2–5.

UDC 62.519

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote accessV. A. Komarov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-9210-9908A. V. Sarafanov^b, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-4264-9388S. R. Tumkovskiy^c, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-1647-2171, STumkovskiy@hse.ru^aSC «Academician M. F. Reshetnev «Information Satellite System», 52, Lenin St., 662972, Zheleznogorsk, Russian Federation^bOOO Vitte Consulting (GK «I-Teco»), 15, Kedrov St., 117036, Moscow, Russian Federation^cNational Research University «Higher School of Economics», 20, Myasnitskaya St., 101000, Moscow, Russian Federation

Introduction: The rapid development of the information society is expressed in the emergence of new models of economic activity, forms of providing educational and social services, scientific activities, etc. on the basis of constantly improving digital technologies. This, in turn, leads to the emergence of new requirements for knowledge and skills of modern engineers whose preparation is based on various laboratory studies. The modern form of realization of such researches is multi-user remote access from digital educational environment to specialized experimental equipment (laboratory installations/stands/layouts), providing efficient use of this equipment. **Purpose:** Comparative analysis of methods for increasing the throughput of experimental equipment with multi-user remote access. **Methods:** Management of user request service procedure based on scheduling algorithms which take into account the functional and parametric content of the processed requests (configuration settings of the object of study, type of measurements taken, parameters of test signals, etc.), as well as the features of the hardware construction. **Results:** On the basis of the proposed approach for multi-user distributed measuring-control systems the following methods are developed: 1. A method of minimizing control operations which determines the sequence of retrieving jobs from the queue in accordance with the minimum of total control time for all the requests currently in the queue. 2. A method of temporary division of multiple measurements, providing distribution of operations of statistical processing of measurement results between the software on a measuring-control computer and the user terminal. 3. A method of parallelizing functional operations which reduces the time to service the requests by programmatically splitting and concurrently performing the management and measuring operations for queued queries related to different control objects. A comparative analysis of the applied approaches has shown that the most effective, in terms of the cost of equipping a single user workplace, are methods based on managing the process of servicing the user requests. **Practical relevance:** The developed methods have made it possible to create a number of samples of multi-user distributed measuring-control systems for the automation of educational and scientific experimental researches with a 16–40% lower cost of equipping a workplace and with throughput of 30–50 concurrent users on the basis of one set of specialized experimental equipment.

Keywords — experimental equipment with remote access, multi-user distributed measuring-control system, automation of educational and scientific experimental studies, throughput, multi-user access, digital educational environment, queuing system.

For citation: Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 68–76 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

References

- Saniie J., Oruklu E., Hanley R., Anand V., Anjali T. Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration. *International Journal of Engineering Education*, 2015, vol. 31, no. 1(A), pp. 106–120.
- Grodotski J., Ortelt T. R., Tekkaya A. E. Remote and virtual labs for engineering education 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1349–1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126
- Gula M., Zakova K. Proposal of component based architecture for internet of things: online laboratory case study. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 337–342. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.153
- Zapata Rivera L. F., Larrondo Petrie M. M. Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments. *iJOE*, 2016, vol. 12, no. 9, pp. 14–21. doi:10.3991/ijoe.v12i09.6129
- Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. Multi-user distributed information-control systems as an element of modern digital educational environment. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 2, pp. 83–94 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94
- Fomin S. S., Gudkov Y. I., Tumkovskiy S. R. Concept of a virtual workshop on ICT. *2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, 2018, pp. 787–790. doi:10.1109/itmqs.2018.8525034
- Seiler S. Current trends in remote and virtual lab engineering. Where are we in 2013? *iJOE*, 2013, vol. 9, no. 6, pp. 13–16. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2898
- Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M. Laboratory as a Service (Laas): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories. *iJOE*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 13–21. doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654
- Lipay B. R., Maslov S. I. The Internet-based laboratory "Fundamentals of electrical engineering and electronics" as an example of a modern remotely accessible educational package for obtaining open engineering education. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2017, no. 2, pp. 71–76 (In Russian). doi:10.24160/1993-6982-2017-2-71-76
- Cyber-physical laboratories in engineering and science education*. Eds. M. E. Auer, A. K. M. Azad, A. Edwards, T. De Jong. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 434 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76935-6
- Industry standard 9.2–98. Educational equipment for educational institutions. Systems of automated laboratory practicum. The main provisions. Moscow, Rosstandart Publ., 1998. 8 p. (In Russian).
- Toyoda Y., Koike N., Li Y. An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud. *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2016, pp. 24–29. doi:10.1109/REV.2016.7444435
- Tawfik M., Sancristobal E., Martin S., Gil R., Diaz G., Colmenar A., Peire J., Castro M., Nilsson K., Zackrisson J., Hakansson L., Gustavsson I. Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 60–72. doi:10.1109/TLT.2012.20
- Markan C. M., Gupta P., Manas, Kumar G., Gupta S. Scalable multiuser remote laboratories provide on-demand hands-on laboratory experience. *2012 IEEE Conference on Technology and Society in Asia (T&SA)*, 2012, pp. 1–7. doi:10.1109/TSAsia.2012.6397981
- Yudi Limpraptono F., Putri Ratna A. A., Sudibyo H. New architecture of remote laboratories multiuser based on em-

- bedded web server. *iJOE*, 2013, vol. 9, iss. 6, pp. 4–11. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2886
16. Makarov A. E., Sagdiev R. K. Laboratory stand for studying the parameters of high-frequency digital signal. *Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy konferentsii "NI Days-2016"* [Proc. XV Int. Conf. "NI Days-2016"], Moscow, 2016, pp. 177–178 (In Russian).
 17. Evdokimov Yu. K., Kirsanov A. Yu., Salakhova A. Sh., Petrovskaya M. V. Remote educational laboratories on the NI hardware platform. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments — 2012"* [Proc. of XI Int. Sci. and Tech. Conf. "Engineering and Scientific Applications Based on National Instruments Technology — 2012"], Moscow, DMK-Press Publ., 2012, pp. 232–236 (In Russian).
 18. Komarov V. A., Sarafanov A. V. Optimization of process control in the multi-user distributed measuring-controlling system. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 3, pp. 52–56 (In Russian).
 19. Komarov V. A., Glinchenko A. S. The research on efficiency of time separation multiple measurement in distributed measurement and control systems. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 4, pp. 73–77 (In Russian).
 20. Komarov V. A., Glinchenko A. S., Sarafanov A. V. Parallelization of functional operations in the multi-user distributed measuring-controlling system. *Sensors & Systems*, 2012, no. 4, pp. 2–5 (In Russian).

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.
