

Критерий эффективности для проектирования распределенных измерительных систем

П. Г. Королев

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: pgkorolev@etu.ru

А. С. Козлов

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: akozlofs@yandex.ru

В. Мамыкова

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: mamvik4@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке критерия эффективности для составления расписания работы модулей многоуровневой информационно-измерительной системы, когда формирование множества результатов при совместных измерениях осуществляется на верхнем уровне – распределенной информационно-измерительной системы. Подобные системы осуществляют измерения с датированием в различных предметных областях, таких как техническая диагностика и медицинская реабилитация, мониторинг состояния объекта и прогнозирование чрезвычайных ситуаций. Рассмотрена структура кадра синхронизации системы и влияние структуры на погрешность датирования. В критерии учтены погрешности временного сдвига, обусловленные трехуровневой структурой системы (компактная, локальная, распределенная).

Ключевые слова: распределенная измерительная система; критерий эффективности; погрешность датирования

I. ВВЕДЕНИЕ

Данная статья посвящена разработке критерия эффективности, применяемому при проектировании распределенных информационно-измерительных систем (РИИС). Будут использованы обозначения: период измерительного эксперимента (ПЭ), длительность которого рассчитывается как $T_n = 1 / f_{jmin}$, где частота сигнала f_{jmin} является минимальной. ПЭ состоит из N_n тактов синхронизации, значение $N_n = f_{jmax} / f_{jmin}$, где f_{jmax} – частота измерения сигнала, характеризующего самый быстропротекающий процесс [1].

Аддитивный критерий эффективности для выбора номенклатуры средств измерений, оптимизирующий общетехнические характеристики измерительной системы был рассмотрен в [2], критерий для минимизации погрешности временного сдвига для исследовательских задач, без использования результатов для целей управления – в [3].

Представлены критерии, для обеспечения синхронизации работы измерительных и вычислительных модулей (составления расписаний) в многоуровневых информационно-измерительных системах [4] Результаты сложных видов измерений также формируются на уровне компактной и локальной измерительных систем.

Классификация сигналов измерительной информации проведена в [3] с учетом жесткости привязки к моменту измерения в кадре синхронизации. На жесткость привязки к моменту измерения влияют параметр τ и частота f . Если у сигналов $\tau = 0$ существует возможность запуска на нескольких тактах ($f_{max}f_j$). Для сигналов с $\tau \neq 0$ такой возможности нет, и если $f_j < f_{max}$, жадные алгоритмы не находят оптимального решения. Тем не менее, они применяются по причине полиномиальной вычислительной сложности, но необходимо оценить отличие решения от оптимального. Формула 1 предназначена для расчета показателя важности сигнала V_j для установления порядка их рассмотрения при построении расписания работы измерительного модуля, который включен в систему для измерения данного сигнала.

$$V_j = \tau_j 2^0 + S_j 2^{-2} + T_j f_{jmax} 2^{-n} \quad (1)$$

где τ_j – определяет неизменяемый номер такта запуска модуля на измерение сигнала с номером j , T_n – период измерительного эксперимента; S – признак того, что данный сигнал участвует в косвенных или совместных измерениях n – количество разрядов, необходимое для задания количества измерений за ПЭ. [3].

II. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Возможны два варианта использования результатов измерений: исключительно для целей исследования и диагностики состояния технических средств, когда можно считать моментом получения результата момент начала его измерения (запоминания напряжения в устройстве выборки и хранения АЦП) [3], а также использования результатов для целей управления, когда результат можно считать полученным не ранее того момента, когда выполнится аналого-цифровое преобразование, код будет масштабирован, а также выполнены вычисления в случае, если выполняются косвенные или совместные измерения, а также статистическая обработка при многократных измерениях. Критерий эффективности для случая прямых измерений, полученных на самом низком уровне системы в целях управления, вычисляется по (2) [1].

$$V_c = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \left(\frac{(vc_{j-1,l} + vc_{j,l}) \times t_s + vc_{j,l} \times (t_{convj} + t_{rdj} + t_{ICj})}{t_s} \times \frac{f_j}{f_{max}} \right)}{L \sum_{j=1}^J \left(\max \left(\frac{j \times t_s + t_{conv} + t_{rd} + t_{IC}}{t_s} \right) \right)} \quad (2)$$

$$vc_{j,l} = \begin{cases} 1, & A_{j,l} \neq 0 \\ 0, & A_{j,l} = 0, \quad vc_{0,l} = 0 \end{cases}$$

В данной формуле J – количество сигналов в задании на эксперимент, L – количество тактов за ПЭ, j – номер сигнала, l – номер такта, $A_{j,l}$ – компонент расписания A [1]. Если $A_{j,l} = 0$, то j – сигнал на l – такте не измеряется, если $A_{j,l} \neq 0$ то это ссылка на вектор параметров запуска модуля: содержимое регистра команд, позволяющее выбрать диапазон, номер канала модуля и т.п., конструкция $(vc_{j-1,l} + vc_{j,l})$ учитывает количество сигналов, измеряемых на данном такте, что увеличивает погрешность датирования для сигналов, измеряемых позже. Выражение в знаменателе

$$L \sum_{j=1}^J \left(\max \left(\frac{j \times t_s + t_{conv} + t_{rd} + t_{IC}}{t_s} \right) \right)$$

– худший случай, когда оптимизация расписания работы измерительных модулей оказалась невозможной из-за того, что $f_j = f_{max}$, для всех сигналов задания. На рис. 1 представлена структура такта измерительной системы при быстроедействии измерительных модулей, позволяющих получать результат на текущем такте.

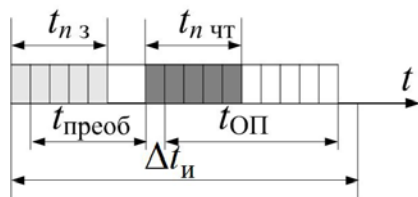


Рис. 1. Структура такта измерительной системы.

$$V_c = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \left\{ \begin{array}{l} vc_{j,l} \times \frac{(vc_{j-1,l} + vc_{j,l}) \times t_s + vc_{j,l} \times (t_{convj} + t_{rdj} + t_{ICj})}{t_s} \times \frac{f_j}{f_{max}}, \quad F_j \notin SF \\ \max \left(\forall i \left(vc_{j,l} \times \frac{(vc_{j-1,l} + vc_{j,l}) \times t_s + vc_{j,l} \times (t_{convj} + t_{rdj} + t_{ICj})}{t_s} \times \frac{f_j}{f_{max}} + \frac{t_{IFCj} + t_{CalcCj}}{\Delta t_3} \right) \right), \quad F_j \in SF \end{array} \right.}{L \sum_{j=1}^J \left(\max \left(\frac{j \times t_s + t_{conv} + t_{rd} + t_{IC}}{t_s} \right) + \max \left(\frac{t_{IFCj} + t_{CalcCj}}{\Delta t_s} \right) \right)} \quad (3)$$

В (3) t_{IFCj} – составляющая погрешности временного сдвига на нижнем уровне системы, t_{CalcCj} – время реализации вычислительной процедуры, $F_j \in SF$ – означает, что сигнал участвует в косвенных или совместных измерениях (признак синхронных измерений).

Выражение $t_{IFCj} + t_{CalcCj}$ введено для того, чтобы учесть время пересылки результатов измерений сигналов

На рис. 1 $t_{нз}$ – время, затраченное на запуск измерительных модулей, $t_{нчт}$ – время, затраченное на чтение результатов измерения, $t_{преоб}$ – длительность аналого-цифрового преобразования, $t_{оп}$ – длительность вычислительной процедуры для получения результата. Операции обработки результатов не могут начаться раньше, чем пройдет время, складывающееся из следующих составляющих: запуск минимум одного канала, время аналого-цифрового преобразования, время пересылки результата из регистров измерительного модуля в вычислительное устройство системы.

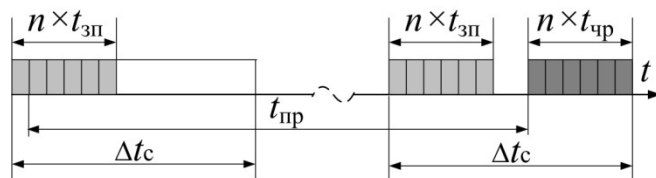


Рис. 2. Структура двух тактов измерительной системы – такта запуска и такта получения результатов.

На рис. 2 представлена Структура двух тактов измерительной системы – такта запуска и такта получения результатов. Эти такты могут быть как соседними, так и разнесенными по времени.

При реализации измерительной управляющей системы, результат косвенных или совместных измерений формируется на основании прямых измерений в рамках одной или нескольких компактных или локальных измерительных систем, для оптимизации решения следует применять критерий (3).

между подсистемами нижнего уровня в вычислительный модуль, в котором должен быть сформирован результат косвенных или совместных измерений, а также время выполнения вычислительной процедуры, включая время статистической обработки данных.

Конструкция $(vc_{j-1,l} + vc_{j,l}) \times t_3$ предназначена для того, чтобы учесть штраф за погрешность датирования, обусловленную сдвигом по времени запуска сигнала с номером j .

Формула (4) обеспечивает поиск наибольшей временной задержки при выполнении косвенных или совместных измерений с получением результатов

прямых измерений модулями $i \in 1...I$ из нескольких подсистем [2].

$$\max \left(\forall i \left(vc_{j,l} \times \frac{(vc_{j-1,l} + vc_{j,l}) \times t_s + vc_{j,l} \times (t_{convj} + t_{rdj} + t_{ICj})}{t_s} \times \frac{f_j}{f_{\max}} + \frac{t_{IFCj} + t_{CalcCj}}{\Delta t_s} \right) \right) \quad (4).$$

На рис. 3 представлена структура кадров компактной, локальной и распределенной измерительных систем. Для того, чтобы исключить дополнительные погрешности временного сдвига за счет задержек запуска ЛИИС и

КИИС, интерфейсы между распределенной и локальными системами, а также локальными и компактными системами должны обладать режимом широкополосной передачи.

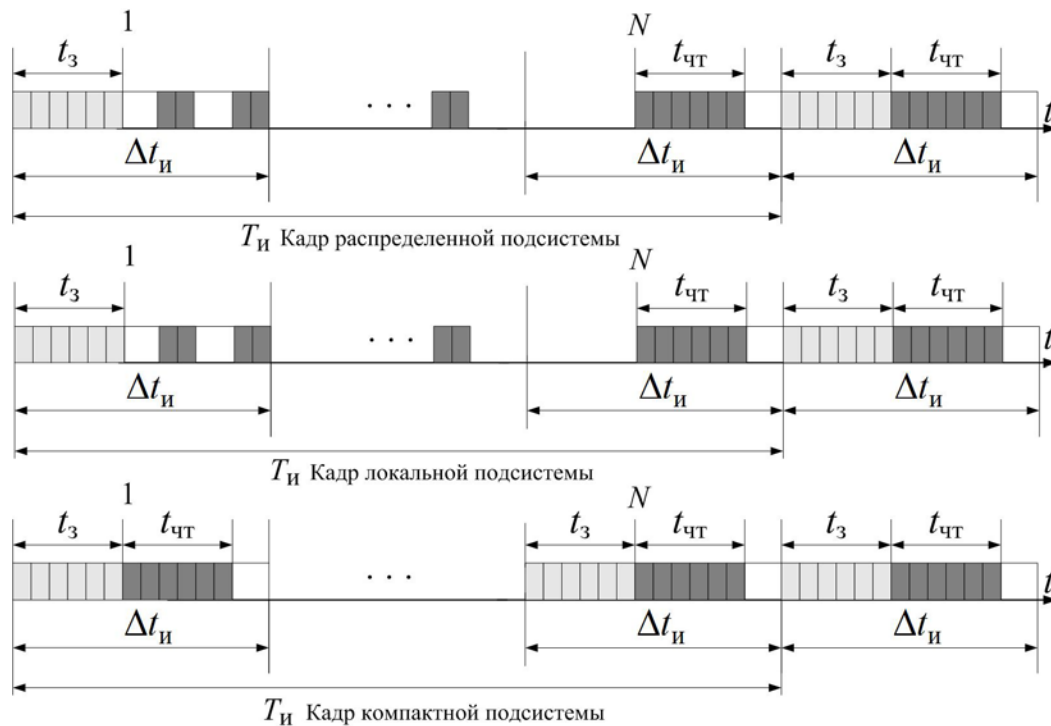


Рис. 3. Структура кадров компактной, локальной и распределенной подсистем.

На низшем уровне системы (КИИС) начало первого такта, как и последующих, отведено для запуска измерительных каналов, на уровне локальных подсистем может осуществляться как запуск измерительных каналов, так и запуск КИИС. На уровне распределенной подсистемы – осуществляется только запуск локальных подсистем. У ЛИИС и РИИС допускаются такты синхронизации, содержащие только операции чтения результатов прямых, косвенных и совместных измерений от подсистем более низкого уровня. Случай, когда из-за длительного времени преобразования (более одного такта), чтение результата оказывается в следующем кадре, здесь не рассматривается. Данной ситуации можно избежать, организовав запуск измерения сигналов без жесткой привязки ко времени с учетом быстродействия измерительных модулей.

Если компактные ИИС не обладают достаточными вычислительными ресурсами (быстродействие процессора, разрядность, объем оперативной и энергонезависимой памяти), а также «распределенность» измеряемых физических величин, предназначенных для формирования результата, косвенного или комплексной оценки, по компактным подсистемам, выполнение вычислительных алгоритмов и принятие решений переносятся в локальную подсистему. Критерий эффективности для локальной подсистемы вычисляется по формуле (5) [2] и учитывает погрешности датирования, накопленные в компактных подсистемах и время пересылок результатов в локальную подсистему.

$$V_{Loc} = \sum_{c=1}^C V_c + \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \left(w_{j,l} \times \frac{t_{IFCLj} + t_{CalcLj}}{T_{И}} \right)}{L \times \max \left(\frac{t_{IFCL} + t_{CalcL}}{T_{И}} \right)}, w_{j,l} = \begin{cases} 1, & F_j \in SF \\ 0, & F_j \notin SF \end{cases} \quad (5)$$

В формуле (5) $\sum_{c=1}^C V_c$ накапливает значения функций штрафов, образовавшихся на уровне компактных ИИС. Функции штрафов компактных ИИС V_c вычисляются по (2) и (3), время, затрачиваемое распределенной подсистемой на пересылку результата из локальной подсистемы и на вычислительную процедуру $t_{IFCLj} + t_{CalcLj}$ приводится к длительности периода измерительного эксперимента $T_{И}$. Нормирующим значением является наибольшее из таких значений,

$$\max \left(\frac{t_{IFCL} + t_{CalcL}}{T_{И}} \right),$$

умноженное на количество тактов за период эксперимента.

Для распределенной системы критерий (функция штрафов) V_{Dis} вычисляется по (6).

$$V_{Dis} = \sum_{Loc=1}^{LOC} V_{Loc} + \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \left(w_{j,l} \times \frac{t_{IFLDj} + t_{CalcDj}}{T_{И}} \right)}{L \times \max \left(\frac{t_{IFLD} + t_{CalcD}}{T_{И}} \right)}, w_{j,l} = \begin{cases} 1, & F_j \in SF \\ 0, & F_j \notin SF \end{cases} \quad (6)$$

где t_{IFLDj} – время передачи результата измерения из локальной в распределенную систему, t_{CalcPj} – время выполнения вычислительной процедуры в подсистеме верхнего уровня (РИИС). В (4) $\sum_{Loc=1}^{LOC} V_{Loc}$ – сумма значений критериальных функций локальных ИИС в количестве LOC , V_{Loc} вычисляются по (5), $t_{IFLDj} + t_{CalcDj}$ также приводится к периоду измерительного эксперимента $T_{И}$. $\max \left(\frac{t_{IFLD} + t_{CalcD}}{T_{И}} \right)$ – наибольшее время получения результата в подсистеме верхнего уровня (РИИС), учитывающее время на обработку результатов и интерфейсные взаимодействия.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жадные алгоритмы (алгоритмы неполного перебора с полиномиальной вычислительной сложностью) находят оптимальное решение при условиях, рассмотренных в работах [3, 5]. Выбор очередного измерительного модуля из матрицы потенциальных возможностей (множества возможных решений), не должен «ухудшать» пространство поиска. Тем не менее, пространство поиска оказывается упорядоченным с нарушением данного требования при наличии в задании на эксперимент сигналов с жесткой привязкой к номеру такта запуска ($\tau \neq 0$). Дополнительная погрешность от временного сдвига оценивается по следующей формуле [2]:

$$V_{доп} = \sum_{j=2}^J \sum_{k=1}^j v_k \times \frac{f_j}{f_{\max}}, v_k = \begin{cases} N_{И} \frac{f_k}{f_{\max}}, & \tau_j = 0 \wedge \tau_k \neq 0 \wedge f_j > f_k \\ 0, & \tau_k = 0 \vee (\tau_k \neq 0 \wedge f_j < f_k) \end{cases},$$

Данная ситуация возникает, когда $\tau_k \neq 0 \wedge f_j > f_k$, и упорядочение пространства поиска в соответствии со значением показателя важности сигнала, рассчитанным по формуле (1), создает условия, для неоптимального решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ensuring Synchronization in Multilevel Measurement Systems. Pavel G. Korolev; Anton V. Pankov; Fedor I. Beliaev; Egor A. Aspednikov; Mikhail S. Udelnov; Daniil A. Zhuravlev. Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EICon 2024, 2024, p 381–385. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10468124>. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468124.
- [2] Алексеев В.В., Боронахин А.М., Королев П.Г. Концепция построения мультифизических измерительных систем. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 148 с.
- [3] П.Г. Королев, Н.В. Романцова, А.В. Царева / Составление расписаний работы информационно-измерительных и управляющих систем // Приборы. 2015. № 10. С. 22-28.
- [4] Systems design for movement kinematics research. Efficiency criteria. Alekseev, V.V., Korolyov, P.G., Olar, V.O., Tsareva, A.V. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRus 2017. 7910541, с. 251-253. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7910541>. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910541.
- [5] Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988. 213 с.