

УДК 621.38; 536.5

**И.В. Мирошниченко, ст. преподаватель**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт  
просп. Победы 37, Киев, Украина, 03056

E-mail: goodgod@ukr.net

## ВЫБОР ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА СТАТИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

*Показано, что определяющий показатель качества статистических систем вычисления числовых характеристик сигналов, сформированный методом разрешения компромиссов между ценностью информации и затратами на её получение по результатам измерений с заданной погрешностью, должен быть составным и комплексным.*

**Ключевые слова:** система обработки экспериментальных данных, CALS-технология, внешнее проектирование, оптимизация, определяющий показатель качества.

**Постановка проблемы.** Опыт проектирования современных аналого-цифровых систем обработки экспериментальных данных, в том числе и контроля качества (СОЭД-К), в состав которых входит программно управляемые интегрированные измерительные каналы, иногда в виде информационно-измерительных систем (ИИС), дает качественную картину того, как сказывается организация проектирования на качество основного изделия.

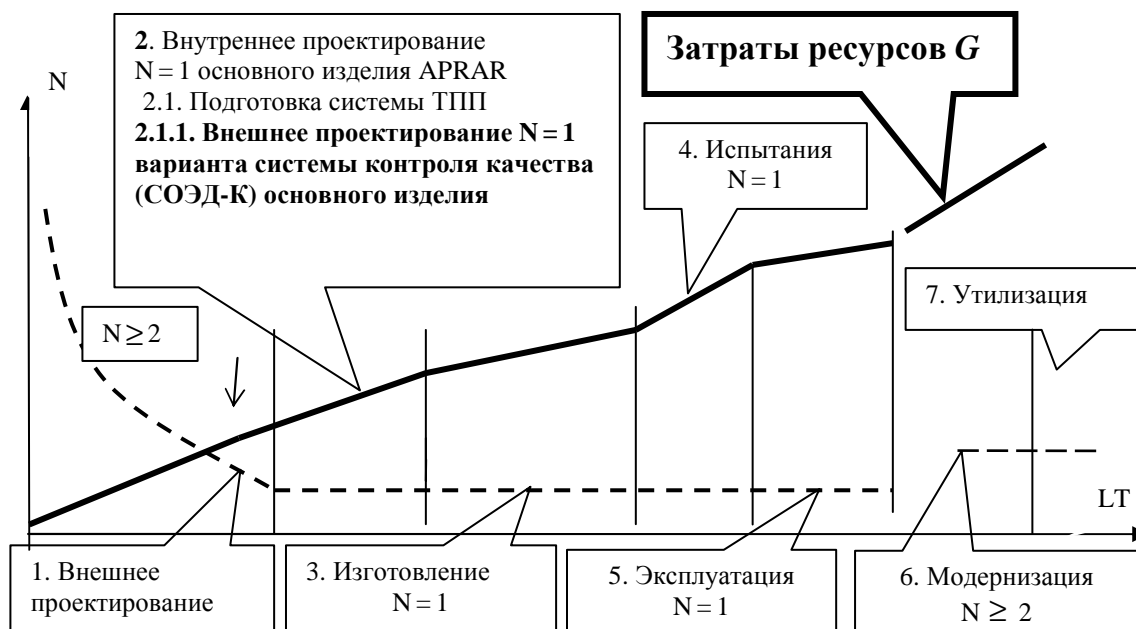


Рисунок 1 – Затраты ресурсов по этапам за время жизненного цикла  $LT$  системы

Для ускорения процесса проектирования в промышленности используются технологии непрерывной информационной поддержки жизненного цикла  $LT$  (Life cycle Time) изделия – CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support), которые зарождались в 80-х гг. прошлого века как “Компьютеризированная поддержка логистических систем” (Computer Aided Logistic Support – CALS), но с середины 90-х гг. трактуются уже как “Непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия” (Continues Acquisition and Life cycle Support – CALS). Идея CALS-технологий состоит в охвате всех этапов  $LT$  образцов современной высокотехнологичной техники – от создания математической модели (ММ), электронного макета изделия, проектирования агрегатов и их деталей, оснастки для изготовления этих агрегатов, управления в процессе производства, испытаний, сбыте продукции и эксплуатации, модернизации, до утилизации.

Основная цель использования CALS-технологий состоит в эффективном *управлении* на всех этапах  $LT$  изделий: внешнем проектировании (выработке концепции, создании ММ проблемной области (Problem area – PRAR), проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и формированию определяющего показателя качества), внутреннем проектировании, технологической подготовке производства и производстве изделия, реализации изделия (маркетинг), эксплуатации

(включая сервис), модернизации и утилизации (Рисунок 1), в сочетании с непрерывным технико-экономическим анализом рисков и затрат различных ресурсов  $G$  (финансовых, материальных, сырьевых, людских и т.д.) при выборе оптимального проектного решения по определяющему показателю качества (точности, надежности, стоимости и т. д.).

Сокращение сроков разработки высокотехнологичных изделий авиационной PRAR (APRAR) и уменьшение затрат ресурсов на всех этапах их ЛТ, кроме эксплуатации и утилизации, может быть осуществлено применением интегрированной информационной среды (ИНИС) – совокупности средств измерения для получения данных, их кодирования, передачи и хранения в распределённых в пространстве базах данных и программ для их обработки в центральном компьютере СОЭД-К. На этапах внешнего и внутреннего проектирования идеология ИНИС, в которой действуют единые для APRAR правила хранения, обновления, поиска и передачи информации, базируется на программном и инструментальном (техническом) обеспечении, стандартах на представление и обмен информацией, а также методах управления предприятиями.

**Анализ** последних исследований и публикаций показывает, что в процессе внешнего проектирования (рисунок 1, участок 1) число эффективных идей  $N$  убывает примерно по экспоненциальному закону при одновременном непрогнозируемом росте  $G$ . При этом может оказаться, что за время только внешнего проектирования некоторая идея устаревает и поэтому идея оптимизации [1] по критерию “уменьшение времени внешнего и внутреннего проектирования” очевидна. Однако при проектировании СОЭД-К, имеющих в своём составе программно управляемые интегрированные измерительные каналы, использование методов оптимизации в “чистом виде” затруднено из-за нечеткой постановки задачи и почти всегда требуется разработка подхода, специфического для APRAR.

Классическая задача оптимизации заключается в нахождении экстремального значения некоторой функции  $f(S_1, S_2, \dots, S_K)$  в определенной принятым образом области  $S$ , задаваемой неравенствами вида  $G(S_1, S_2, \dots, S_K) \geq 0$  или  $G(S_1, S_2, \dots, S_K) \leq 0$ .

Для решения этой задачи применяется много методов: линейное, нелинейное, динамическое, дискретное, выпуклое квадратическое (или стохастическое) программирования с различными подходами к учёту действующих ограничений (симплекс-метод Данцига; классические методы вариационного; градиентные методы – принцип оптимальности Р. Беллмана; принцип максимума Понтрягина и другие методы). Выбор подхода зависит от вида целевой функции  $f$  и характера ограничений в APRAR, что предполагает исследование самой постановки на корректность [1].

*Определение корректности* можно представить в виде  $z = R(u)$ , где  $z$  – решение количественной задачи по исходным данным  $u$ , а  $z$  и  $u$  есть элементы метрических пространств  $Z$  и  $U$  с расстояниями между элементами  $\rho_u(u_1 u_2)$  и  $\rho_z(z_1 z_2)$ ,  $u_1 u_2 \in U$ ,  $z_1 z_2$  при выполнении двух условий.

*Условие I.* Задача нахождения  $z \in Z$  и  $u \in U$  называется корректной на паре метрических пространств  $Z$  и  $U$ , если:

– определено понятие решения по  $u$ , т.е. известно, каков результат и в какой форме желательно его получить;

– имеется множество  $u = \{u_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  такое, что для всякого  $u \in U$  есть  $z \in Z$ ;

–  $\text{rank}(u) = z$ , т.е. решение однозначно;

– задача устойчива на пространстве решений  $z = R(u)$ , т.е. выполняется условие II.

*Условие II.* Задача нахождения  $z = R(u)$  устойчива на  $(z, u)$ , если для любого числа  $\varepsilon > 0$  существует  $\delta(\varepsilon) > 0$  такое, что из неравенства  $\rho_u(u_1 u_2) \leq 0$  следует  $\rho_z(z_1 z_2) < \varepsilon$ , где  $z_1 = R(u_1)$ ;  $z_2 = R(u_2)$ ;  $u_1 u_2 \in U$ ;  $z_1 z_2 \in Z$ .

*Нарушение хотя бы одного из пунктов этих условий свидетельствует о некорректности задачи.*

Задачи оптимизации большинства СОЭД-К некорректны почти по всем пунктам, поэтому для таких прикладных задач были разработаны методы глобальной регуляризации слабо корректных и некорректных задач: метод регуляризации А.Н. Тихонова; методы регуляризации задач линейного программирования на принципе инвариантности оптимальных решений; методы регуляризации задач дискретного программирования, например, метод “правильных” отсечений (алгоритм Гомори) и др. [2].

Условие регуляризации задач большой размерности  $m * n$ , где  $m$  – число неизвестных параметров при  $n$  ограничениях, типичным образом которых является задача оптимизации СОЭД-К, может быть сформулировано как условие применения *пошаговой оптимизации – субоптимизации* [2], имеющей универсальный характер при оптимизации различных многоступенчатых иерархических структур. Принцип субоптимизации важен при синтезе СОЭД-К, работающих в условиях априорной неопределенности, когда на каждом уровне детализации системы решается своя локальная задача проектирования.

При оптимізації СОЭД-К суттєвим являється розбиття області допустимих (можливих) рішень на області угоди і компромісів, при якому *оптимальне рішення може належати тільки області компромісів* (оптимальне по Парето рішення), т.к. в області угоди рішення може бути покращено, по визначенню, по всім прийнятним критеріям, а якщо рішення може бути покращено, то воно не являється оптимальним. Але оскільки покращення якості рішення по одному критерію в області компромісів обов'язково влечет за собою погіршення якості по іншому критерію, вибір кращого варіанта без спільного одночасного застосування аналізу і синтезу неможливо.

Тому математичне забезпечення процесу зовнішнього проектування обов'язково повинно містити дві підсистеми: підсистему аналізу – повні і точні алгоритми повернутого розрахунку і підсистему синтезу – спрощені ММ і швидкі алгоритми рішення обернутих і оптимізаційних завдань. При цьому система синтезу на кожному рівні деталізації повинна неперервно поповнюватися новими, більш повними, ММ і відповідними їм алгоритмами, а кожен етап синтезу повинен перевірятися на підсистемі аналізу. Ця процедура повинна повторюватися до тих пор, поки не буде отримано рішення, що задовольняє *Умову II*.

**Цель работы.** Обобщив требования к выбору определяющих показателей качества СОЭД-К с учетом рекомендаций: по обоснованию решений и методов проектирования, при которых требования надежности, в том числе и метрологической [4], являются обязательными; о первостепенном значении информационной ценности для СОЭД-К и, принимая во внимание то, что оптимальное решение  $z_{opt} = R(u)$  обязательно должно лежать в области компромиссов, приходим к необходимости уточнения процедуры формирования определяющего показателя качества СОЭД-К.

Очевидно, что по физической сущности процесс формирования показателя качества  $Q$  базируется на принципе сравнения с некоторым эталоном, для которого известны или сформулированы на стадии внешнего проектирования основные и оптимальные в определенном смысле показатели  $Q_0 = \langle Q_{01}, Q_{02}, \dots, Q_{0N} \rangle$ . При оптимизации достигается минимум расстояния  $\rho(Q_1 Q_2)$  между концами  $n$ -мерных векторов показателей, определяемых множеством показателей  $Q_0$  эталонной и  $Q_1$  проектируемой СОЭД-К

$$\text{MIN} \rho(Q_1 Q_2) = \text{MIN} \sqrt{\alpha_1 (Q_1 - Q_{01})^2 + \dots + \alpha_N (Q_N - Q_{0N})^2},$$

где  $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_N$  – весовые коэффициенты, выбираемые так, что  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ .

Параметрическая чувствительность  $S$  расстояния  $\rho(Q_1 Q_2)$  к изменениям любого  $Q_i \in Q = \langle Q_1, Q_2, \dots, Q_n \rangle, i = \overline{1, n}$  характеризуется соотношением

$$S_{Q_i}^p = \frac{Q_i}{\rho(Q_1 Q_0)} \frac{d\rho(Q_1 Q_0)}{dQ_i} = \alpha_i Q_i (Q_i - Q_0), i = \overline{1, n},$$

из которого следует условие выбора наиболее существенных для заданного показателя качества параметров, обеспечивающих  $S_{Q_i}^p = \text{MAX}$ .

Определяющий показатель качества должен отражать разрешение двух главных компромиссов, принципиальных для СОЭД-К:

1) между ценностью  $V$  информации и затратами  $C$  на её получение при назначении одной из основных метрологических характеристик СОЭД-К – суммарной относительной погрешности  $\delta_\Sigma$  (рисунок 2) или “точности” (exactitude –  $ET$ ), определяемый как  $ET = 1/\delta_\Sigma$ .

2) между затратами: начальными  $P$  и затратами  $E$  на эксплуатацию СОЭД-К с заданной точностью  $ET$  при изменении [4] метрологической надежности  $R$  (рисунок 3).

Отсюда следует, что определяющий показатель качества СИИС должен быть составным и комплексным, то есть результатом решения в области компромиссов. Общность свойств данного комплексного показателя качества системы отражается сущностью понятия *ценности  $V$  информации и затрат  $E$*  на получение и обработку этой информации.

Ценность информации  $V$  является основным критерием для СОЭД-К и включает следующие факторы: погрешность (точность) измерения, давность информации о состоянии объекта (время получения результатов и согласованием их с параметрами объекта), давность информации для выработки решения (управляющего воздействия), возможность прогнозирования (возможность проведения адаптации), уместность и последствие.

Достижение первого компромисса по суммарной погрешности  $\delta_{\Sigma}$  (точности  $ET=1/\delta_{\Sigma}$ ) предполагает достижения  $MAX[V(\delta)-C(\delta)]$  (рисунок 2), а второго компромисса – достижения  $F_{\Sigma} = MINF_{\Sigma}$  суммарных затрат ресурсов  $E, F$  и  $P$  (рисунок 3).

Такой составной и комплексный показатель качества СОЭД-К может быть приведен в аддитивной форме при обеспечении в процессе оптимизации следующих условий:

$$Q_1 = \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2, \quad MAXF_1 = MAX [V(\delta) - C(\delta)], \quad MAXF_2 = MINF_{\Sigma},$$

здесь  $\beta_1 + \beta_2 = 1$ , где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – весовые коэффициенты компромиссов.

В большинстве технических приложений определяющее значение имеет погрешность (точность), принципиально недостижимая [3] при статистических измерениях за требуемое (или наперед заданное) время, и увеличивающая таким образом давность информации, что ведет к принятию неверных решений.

Ценность  $V$  информации, с одной стороны, возрастает при увеличении точности СОЭД-К, но с другой стороны, одновременно с этим, увеличивается время измерения [3] и обработки результатов – то есть ценность информации со временем уменьшается. Если время получения результата измерения с заданной  $\delta_{\Sigma}$  превышает предел, способствующий принятию эффективного решения, то в этом случае дополнительная точность должна игнорироваться, так как информация “устаревает” к моменту принятия решения (управляющего воздействия).

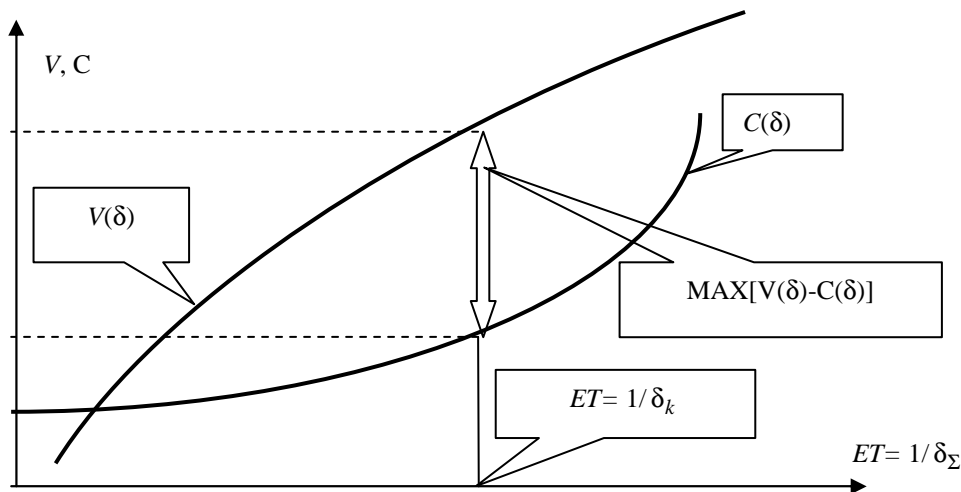


Рисунок 2 – Первый компромисс  $ET=1/\delta_k$  по точности и  $ET=1/\delta_{\Sigma}$  между ценностью  $V$  информации и затратами  $C$  на получение данных

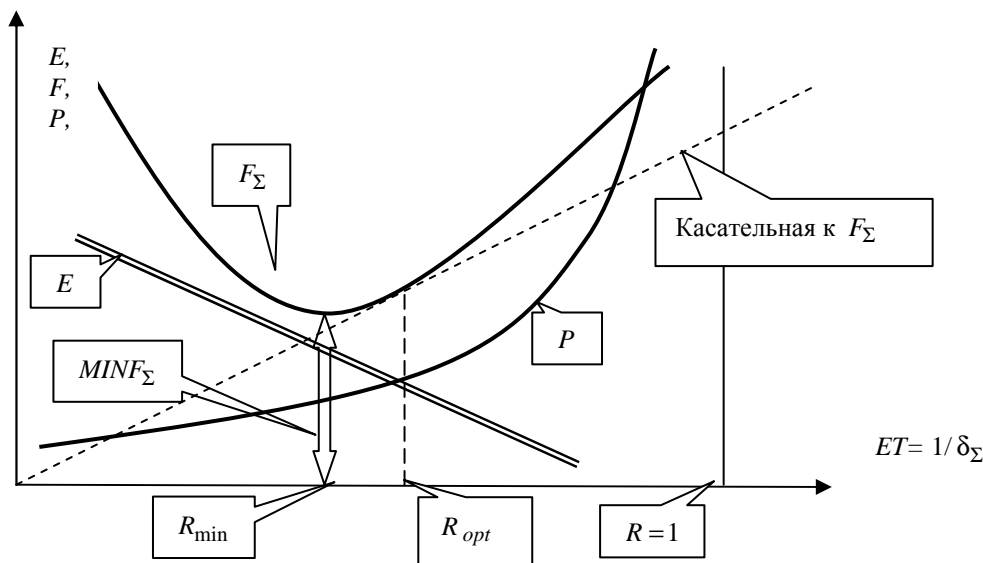


Рисунок 3 – Второй компромисс по точности  $ET=1/\delta_{\Sigma}$  для суммарных затрат  $F_{\Sigma} = MINF_{\Sigma}$  ресурсов при начальных затратах  $P$  и затратах  $E$  на эксплуатацию СОЭД-К с заданной  $ET$  при изменении метрологической надежности  $R$  системы

Проектирование систем вычисления статистических характеристик (СХ) сигналов, характеризующих физические процессы в различных PRAR, возможно при использовании как аналоговых, так и цифровых методов. Схемные решения, использующие аналоговую технику, позволяют обеспечить высокое быстродействие, но отличаются большими погрешностями и малыми, в смысле гибкости применения, функциональными возможностями. Использование цифровых принципов [2] позволяет повысить точность статистических измерений и создать многофункциональные СОЭД-К, вычисляющие различные СХ и реализующие даже такие алгоритмы обработки, что становится возможным выявление “искаженных” массивов информации (например, при изменениях или даже “провалах” питающих напряжений, сменах носителей записи и т.д.).

Использование *процессорных средств измерений*, в состав которых может быть включен специализированный процессор (аналоговый – электронный или оптический; цифровой – сигнальный DSP и т.п.), принимающих непосредственное участие как в измерениях (прямых, косвенных, совокупных, совместных, комплексированных и др.), так и в управлении измерительным экспериментом и последующей обработке результатов измерений, дает возможность проектирования (внешнего и внутреннего) и изготовления универсальных в алгоритмическом и аппаратурном планах статистических СОЭД-К.

В аналого-цифровых СОЭД-К с интегрированными измерительными каналами, в которых процедура измерения (сравнения с мерой) первой производится в АЦП, может быть применена адаптация путём выбора минимального числа разрядов АЦП для повышения быстродействия всей системы, и, как следствие, увеличения объёма выборки, что приводит к уменьшению статистической составляющей суммарной погрешности  $\delta_{\Sigma}$  вычисления СХ [3].

Для APRAR должна быть составлена обобщенная динамическая модель, обладающая свойствами непротиворечивости по отношению к известным подходам, имеющая локальные и общие обратные связи и реализующая принцип субоптимизации пошаговой (эволюционной) оптимизации при проектировании (синтезе) систем [2]. Например, при производстве протяженных авиационных изделий предпочтение отдаётся СОЭД-К с интегрированными программно управляемыми адаптивными каналами измерения ординат шероховатости (ПУАКИШ) на базе аналоговых индукционных контактных датчиков (ИКД), устойчивых к ударным перегрузкам и воздействию внешних магнитных полей, усилителями, фильтрами и АЦП с последующей адаптивной обработкой цифровых данных процессором СОЭД-К в режиме реального времени [3].

В таких СОЭД-К используются ПУАКИШ с независимой опорой (Traversing system of an instrument with the external reference datum), в которых ИКД перемещается по внешней измерительной базе, сохраняя ориентацию постоянной, при этом шероховатая поверхность не действует на ИКД и не влияет на его траекторию. Перемещение ИКД по независимой линейной базе позволяет проведение двумерного анализа шероховатости, по результатам которого может быть дополнительно вычислена волнистость простых поверхностей, или, иначе говоря, осуществлено комплексирование статистических измерений.

Погрешности ПУАКИШ с ИКД, практически не подверженных воздействию электромагнитных полей и относительно невысокая стоимость [3], дают основания полагать о возможности их использования в аналого-цифровых СОЭД-К при автоматизации производства, испытаниях и последующей модернизации авиационных изделий.

Особенностью статистических измерений является необходимость проверки результатов измерений различными методами, т.к., даже для конкретной APRAR, математические модели сигналов весьма разнообразны и зачастую противоречивы. Для решения этих задач необходима систематизация имеющихся и разработка новых алгоритмов как анализа, т.е. более полных и, соответственно, более точных алгоритмов поверочных расчетов элементов СОЭД-К в условиях как априорной неопределенности и при появлении некоторой новой информации, используемой для адаптации, так и алгоритмов синтеза, т.е. более быстрых и простых алгоритмов решения обратных и оптимизационных задач.

**Выводы.** Некорректность задачи оптимизации внешнего проектирования СОЭД-К в большинстве технических приложений требует разработки комплексных методов уменьшения времени внешнего проектирования или синтеза систем с учетом информационного обеспечения в предметной области и априорных сведений о распределении ресурсов  $G$  (алгоритмических, системных, конструктивных и т.д.) при выборе суммарной погрешности в качестве определяющего показателя СОЭД-К.

При этом в качестве основного должен быть принят универсальный принцип пошаговой оптимизации, при анализе СОЭД-К порождающий действие приемов декомпозиции, а при их синтезе – модульности в любой проблемной области. Поэтому при автоматизации производства, испытаниях и последующей модернизации протяженных авиационных изделий определяющий показатель качества СОЭД-К должен быть составным и комплексным.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, С. Рэгсдейл. Пер. с англ. — М: Мир, 1986. — 349 с.
2. Корниенко Г.И. Перспективы развития и применения проблемно-ориентированных ЦВК для обработки данных натурных испытаний / Г.И. Корниенко // Построение автоматизированных систем обработки экспериментальных данных. — К.: ИК АН УССР, 1985. — С. 3–5.
3. Мирошниченко И.В. Обработка экспериментальных данных о профиле шероховатости поверхностей в аналого-цифровых системах с интегрированным измерительным каналом / И.В. Мирошниченко // Адаптивні системи автоматичного управління: міжвідомчий науково-технічний збірник. — Київ: Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, 2012. — Вип. 21 (41). — С. 46–53.
4. Екимов А.В. Надежность средств электроизмерительной техники / А.В. Екимов, М.И. Ревяков. — Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд. 1986. — 208 с.

*Поступила в редакцию 15.06.2012 г.*

**Мірошниченко І.В. Вибір визначального показника якості статистичних систем обробки експериментальних даних**

Показано, що визначальний показник якості статистичних систем обчислення числових характеристик сигналів, сформований методом дозволу компромісів між цінністю інформації і витратами на її отримання за результатами вимірювань із заданою похибкою, повинен бути складеним і комплексним.

**Ключові слова:** система обробки експериментальних даних, CALS - технологія, зовнішнє проектування, оптимізація, визначальний показник якості.

**Miroshnichenko I.V. Choice determine quality of statistical system experimental data processing**

It is shown that determining the quality score of statistical systems computing numerical characteristics of signals generated by permit trade-offs between the value of information and the cost of obtaining it from the measurements with the given error, and must be part of the complex.

**Keywords:** system of experimental data, CALS- technology, external design, optimization, determining quality score.