

Посвящается



К 75-летию Великой Победы  
Году Памяти и Славы

ISSN 2078-7707

# МЭС-2020

*IX Всероссийская научно-техническая конференция*

## ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИКРО- и НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ – 2020 (МЭС-2020)

***СБОРНИК ТРУДОВ. Выпуск IV***

**«Автоматизация проектирования микро- и  
наноэлектронных схем и систем»**

**«Разработка перспективных микро- и наноэлектронных  
элементов, схем и устройств»**



*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике  
Российской академии наук*

**Москва - 2020**

# IX Всероссийская научно-техническая конференция

## ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИКРО- и НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ – 2020

### СБОРНИК ТРУДОВ. Выпуск IV

**УЧРЕДИТЕЛИ**

Российская Академия Наук  
ОНИТ РАН  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (РФФИ)  
КОНЦЕРН ВЕГА  
ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ  
ИНЭУМ  
МИЭТ  
ПРОГРЕСС  
ФИЦ ИУ РАН  
КОЖЕВНИКОВСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОРГАНИЗАТОР** *ИИИ РАН* **Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН**

**СООРГАНИЗАТОР** «Корпорация развития Зеленограда»  
Казенное предприятие города Москвы

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ** *ИИИ РАН*

**ОПЕРАТОР** Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова

ФОНД ИНФРАСТРУКТУРНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ (Группа РОСНАНО)  
Sk Сколково  
intel  
ИИИ РАН  
ТУСУР

**СПОНСОРЫ** elbrus CADFEM МИПАНДР

**ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА** Журналы: Информационно-управляющие системы Информационные технологии ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ Электроника Нано- и микро-системная техника

## УДК 621.3.049.77 : 658.512

Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2020. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. М.: ИПИМ РАН, 2020. Выпуск IV. 262 с.

Выпуск IV настоящего периодического издания содержит 37 докладов из числа представленных на IX Всероссийскую научно-техническую конференцию «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2020» (Москва, Зеленоград, июнь-ноябрь 2020 г.). Эти работы выполнены научными сотрудниками и аспирантами институтов РАН, специалистами российских научно-производственных организаций и предприятий, преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами и студентами высших учебных заведений, а также сотрудниками ряда зарубежных организаций и высших учебных заведений, работающих в области проектирования микро- и наноэлектронных изделий. Издание предназначено для научных работников, специалистов, аспирантов и студентов, занимающихся проблемами разработки, анализа, тестирования сложных микро- и наноэлектронных схем и систем, а также соответствующих программных средств.

Материалы издания отражают современное состояние российской микро- и наноэлектроники и методов и средств разработки микро- и наноэлектронных схем и систем и являются важным источником информации по перспективным направлениям исследований и инвестиций в данной области.

Все статьи прошли рецензирование и одобрены Редакционной коллегией сборника, Организационным и Программным комитетами конференции.

Ответственный за выпуск к.т.н., с.н.с. Ходош Л.С.

Издается с 2005 года. Включено в систему Российского индекса научного цитирования. Аннотации на русском и английском языках находятся в свободном доступе на сайтах конференции (<http://www.mes-conference.ru>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей с 2010 г. по 2019 г. размещены на сайте конференции в разделе «АРХИВ». Там же размещен полный каталог статей с 2005 по 2019 г. и их тексты.

***Издание включено в Перечень ВАК российских рецензируемых научных журналов и периодических изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по следующим специальностям.***

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки).

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки).

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (технические науки).

05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети (технические науки).

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки).

### ПОДПИСКА:

- по каталогу «Издания органов научно-технической информации» АО «Агентство Роспечать» (индекс 59883);
- в редакции издания (тел./факс: (499)729-9208).

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике  
Российской академии наук

ISSN 2078-7707



на основе генетического алгоритма.....	83
<b>С.А. Никитин, А.В. Николаев, Ф.М. Путья, И.А. Неклюдов</b> Автоматизация маршрута функциональной верификации на основе стандарта IP-XACT.....	90
<b>С.А. Ложкин, В.С. Зизов, М.С. Шуплецов, В.В. Жуков, Д.Э. Хзмалян, О.О. Белянков</b> О сложности инверсных графов, реализующих булевы функции от малого числа переменных.....	95
<b>Н.В. Зенченко, П.П. Мальцев, И.А. Глинский</b> Моделирование распределения тепловых потоков в СВЧ монолитных интегральных схемах на основе нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов.....	103
<b>Ф.Ф. Идрисов, А.А. Квасников</b> О выделении трендов в задачах прогнозирования деградации радиоэлектронных систем в условиях рандомизированных наблюдений.....	108
<b>Д.А. Булах, А.В. Коршунов</b> Расширяемый фреймворк для отладки и проверки алгоритмов этапа топологического проектирования.....	112
<b>Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, А.А. Жиглатый</b> Размещение элементов СБИС на основе моделей роевого интеллекта.....	118

### **Разработка перспективных микро- и наноэлектронных элементов, схем и устройств**

<b>С.Г. Бобков</b> Пути и методы повышения производительности микропроцессоров.....	127
<b>В.Я. Архипкин, М.И. Дябин, В.В. Ерохин, Ю.Л. Леохин</b> Построение высокопроизводительной SnK на основе 16-разрядного процессорного ядра.....	134
<b>С.А. Ильин, Д.Ю. Копейкин, О.В. Ласточкин, А.А. Новиков, Д.С. Шипицин</b> Метод валидации в кремнии библиотек стандартных цифровых элементов .....	140
<b>А.А. Волков, В.А. Кузюков, М.С. Морозов</b> Максимизация помехоустойчивости приёма цифровых сигналов.....	146
<b>Г.С. Ханян</b> Теорема отсчетов во временной области для инфинитного сигнала: аналитическое выражение и геометрическая иллюстрация.....	151
<b>В.В. Курганов, В.И. Джиган</b> Калибровка антенных решёток с малым числом элементов: проблемы и их решения.....	159
<b>С.А. Ильин, А.В. Коршунов, Т.В. Гарбулина</b> Сравнительный анализ энергоэффективности библиотек по технологии FinFET 7 нм.....	169
<b>Л.В. Кореков, А.А. Метель, А.С. Сальников</b> Анализ схемных решений интегральных СВЧ цифровых ступенчатых аттенуаторов, изготавливаемых по различным технологическим процессам.....	174
<b>С.И. Аряшев, П.С. Зубковский, В.В. Цветков</b> Реализация функций библиотеки подпрограмм линейной алгебры на векторном сопроцессоре для не выравненных массивов.....	181
<b>В.А. Быков, Ан.В. Быков, Ю.А. Бобров, В.В. Котов, С.И. Леесмент, В.В. Поляков</b> Возможности метрологических систем атомно-силовой микроскопии для исследований, разработок и контроля параметров изделий микро- и наноэлектроники.....	187
<b>А.В. Кондратенко, Д.С. Брагин, Д.Д. Зыков</b> Монолитные интегральные схемы функциональных узлов радиотракта ППМ АФАР X-диапазона на основе арсенид-галлиевых и нитрид-галлиевых технологических процессов.....	193
<b>С.Б. Алексеев, А.М. Алексеева, Т.А. Лепёхина, С.Г. Лиханский, В.И. Николаев</b> Проблемные вопросы адаптивного синтеза радиолокационных изображений в бистатистических	

# О выделении трендов в задачах прогнозирования деградации радиоэлектронных систем в условиях рандомизированных наблюдений

Ф.Ф. Идрисов, А.А. Квасников

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,  
farit.idrisov@mail.ru

**Аннотация** — В работе излагаются модели и алгоритмы прогнозирования процессов деградации радиоэлектронных систем в условиях природных и преднамеренных воздействий.

**Ключевые слова** — деградация, внешние воздействия, радиоэлектронные системы, рандомизированные процессы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Острозадачные повороты международных отношений и предпринимаемые Россией меры по соблюдению своих национальных интересов выдвигают более высокие требования по обеспечению надежной работы радиоэлектронных систем (РЭС), и в первую очередь в условиях боевых столкновений. Очень важной частью данной проблемы является разработка моделей и алгоритмов прогнозирования наиболее критичных параметров, обеспечивающих эффективность РЭС на должном уровне (особенно в условиях мощного преднамеренного электромагнитного противодействия).

Как показывает практика, традиционный подход к разработке РЭС не всегда позволяет достичь требуемых результатов (например, в случае самолетов технологии «СТЕЛС», массированных атак тяжелых беспилотников и др.). Необходим тщательный анализ допущений о наблюдаемых внешних и внутренних процессах, обеспечивающих готовность РЭС и их элементов к выполнению своих задач.

Деградация РЭС наступает в результате естественного старения, либо интенсивного износа в процессе эксплуатации в суровых климатических условиях (например, в пустынях Ближнего Востока или в условиях Арктики), а также импульсных воздействий ударного типа.

Предполагаемая на практике эквидистантность наблюдений может в значительной степени исказить возможности моделей, используемых в задачах прогнозирования. Фактически РЭС работают со случайными процессами, наблюдаемыми в случайные моменты времени, когда даже число одномоментных наблюдений может быть случайным. Назовем такие процессы рандомизированными [1] и рассмотрим их на некоторых примерах.

В телеметрических спутниковых системах нередко встраиваются две схемы: по одной из них получение информации о состоянии спутника осуществляется в определенные промежутки времени, тогда как вторая схема включается в тех случаях, когда в космическом аппарате случается какое-то «событие» (например, срабатывание датчика или отключение какой-то подсистемы). Более того, имеется группа важнейших параметров, за которыми осуществляется непрерывное слежение, и как только хотя бы один из этих параметров принимает пограничное значение, начинается непрерывное отслеживание остальных параметров. Такие события строго говоря не являются эквидистантными, а сами моменты измерений, как правило, образуют пуассоновский поток событий. Причин для появления таких процессов достаточно много. В космонавтике, в частности, можно указать случайные изменения интервалов времени апогея и перигея траектории орбитального аппарата, интервалов «вскипания» солнечной плазмы и др. Еще один классический случай – это широко известный эффект дрожания моментов измерения параметров системы (jittering), порождающий пуассоновский поток случайных событий [2].

Особенно часто рандомизированность интервалов наблюдений встречается в медицине, в банковской и страховой индустрии. Их рассмотрение выходит за рамки нашей задачи.

## II. БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Конструирование моделей опирается на технику вычисления средних от статистик различного вида, в зависимости от задачи, таких как:

- а) 
$$\sum_{i=1}^N f(t_i)$$
- б) 
$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(t_i, t_j)$$
- в) 
$$\frac{1}{\lambda T} \sum_{i=1}^N f(t_i) \text{ и т.д.}$$

Здесь  $f$  – некоторая наблюдаемая функция,  $t_i$  и  $t_j$  – моменты наблюдения,  $T$  – интервал наблюдения,  $\lambda$  – интенсивность наблюдений.

Нами подробно исследованы свойства этих статистик, т.е. доказаны теоремы, устанавливающие достаточные условия сходимости статистик в среднеквадратичном смысле, почти наверное и их асимптотической нормальности при  $\lambda \rightarrow \infty$ , когда  $t_i$  образуют пуассоновский поток событий постоянной интенсивности.

Основные усилия в работе были направлены на получение оценок параметров трендов вида

$$x_i = x(t_i) = \sum_{k=1}^S \theta_k \varphi_k(t_i) + n_i,$$

где моменты измерений  $t_i$  представляют собой пуассоновский поток событий.

В основном исследованы упрощенные оценки  $\hat{\theta}_k$  параметров  $\theta_k$ , полученные на основе линейных комбинаций новых статистик вида

$$\frac{1}{\lambda T} \sum_{i=1}^N \varphi(t_i) x_i, \frac{1}{\lambda T} \sum_{i=1}^N \varphi(\tau_i) x_i, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi\left(T \frac{i}{N}\right) x_i$$

соответственно для случаев, когда моменты  $t_i$  известны точно; когда известны  $\tau_i = t_i + \xi_i$ , где  $\xi_i$  ошибки измерений  $t_i$ ; известен лишь порядок осуществления измерений, а сами моменты измерений  $t_i$  неизвестны. Здесь  $N$  – число наблюдений процесса  $x(t)$  на интервале наблюдений  $T$ .

### III. АЛГОРИТМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ

Представим в сжатой форме алгоритмы выделения трендов для рандомизированных процессов лишь для случая, когда моменты  $t_i$  известны точно. Все другие варианты не приводятся, хотя они решены и исследованы в стандартном объеме.

Итак, пусть имеется некоторый интересующий нас процесс  $x(t)$ , значения которого измеряются в некоторые случайные моменты времени  $t_i$ . Будем считать, что на интервале наблюдения  $[0, T]$  измеренные значения  $x_i = x(t_i)$  могут быть представлены в виде

$$x_i = x(t_i) = \sum_{k=1}^S \theta_k \varphi_k(t_i) + n_i \quad (1)$$

где  $\varphi_k(t)$  известные функции от времени,  $\theta_k$  неизвестные коэффициенты (параметры), а  $n_i$  – случайные добавки.

Оценки параметров тренда  $\hat{\theta}_k$  находятся из условия:

$$R = \sum_{i=1}^N (x_i - \sum_{k=1}^S \hat{\theta}_k \varphi_k(t_i))^2 \rightarrow \min_{\hat{\theta}_k} \quad (2)$$

Получаем систему уравнений, позволяющую получить оценку  $\hat{\theta}_k$ :

$$\sum_{k=1}^S \hat{\theta}_k \left( \sum_{l=1}^N \varphi_k(t_i) \varphi_l(t_i) \right) = \sum_{l=1}^N x_l \varphi_l(t_i). \quad (3)$$

В векторно-матричной форме уравнение (3) запишем в виде:

$$(\varphi^T \varphi) \hat{\theta} = \varphi^T \bar{x}, \quad (4)$$

откуда для  $\hat{\theta}$  получим:

$$\hat{\theta} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T \bar{x} \quad (5)$$

В работе доказана несмещенность оценок (5), выведена для них оценка матрицы ковариаций, позволяющая строить доверительные интервалы параметров  $\hat{\theta}$ .

Однако результаты имитационного моделирования показали, что для получения хороших оценок требуются выборки достаточно большого объема – порядка 100 и выше. Но тогда начинает сказываться неустойчивость вычислений, особенно при обращении матрицы  $(\varphi^T \varphi)$  при  $S \geq 3$ .

Для этих целей в работе предложен и исследован упрощенный алгоритм оценки параметров  $\hat{\theta}$ , не требующий операции обращения.

В очень сжатом виде поясним суть такого подхода. Элементы матрицы  $(\varphi^T \varphi)$  имеют вид:

$$\sum_{i=1}^N \varphi_k(t_i) \varphi_l(t_i). \quad (6)$$

Введем обозначение

$$\varphi_{kl} = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi_k(u) \varphi_l(u) du.$$

Тогда, представляя (6) в виде

$$\sum_{i=1}^N \varphi_k(t_i) \varphi_l(t_i) = \lambda T \times \frac{1}{\lambda T} \sum_{i=1}^N \varphi_k(t_i) \varphi_l(t_i),$$

в силу сходимости почти наверное заменяем последний множитель на  $\varphi_{kl}$ . Тогда при достаточно больших объемах выборки можно приближенно считать, что

$$\begin{aligned} (\varphi^T \varphi) &= \lambda T \times \Phi, \Phi = \|\varphi_{kl}\|, \\ (\varphi^T \varphi)^{-1} &= \frac{1}{\lambda T} \Phi^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

и оценки  $\hat{\theta}$  параметров  $\bar{\theta}$  примут вид

$$\hat{\theta} = \Phi^{(-1)} \times \frac{1}{\lambda T} (\Phi^T \bar{x}).$$

Заметим, что  $\Phi$  – числовая матрица Гильберта. Использовать полиномы степени выше 4 не рекомендуем.

В работе на примере пуассоновского потока моментов измерений проведены все необходимые выкладки (не приводимые здесь в силу ограниченного формата): несмещенность оценок, матрица ковариации ошибок и др. Доказаны все необходимые теоремы о сходимости полученных оценок. Кроме того, построены алгоритмы выделения трендов при неизвестных моментах измерений и проведено их теоретическое обоснование.

#### IV. АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ТРЕНДОВ ДЕГРАДАЦИИ

В данном разделе рассматривается проблема выделения трендов деградации в условиях априорной недостаточности информации об условиях работы РЭС. Для этих целей используются рекуррентные процедуры оценки сплайнов, когда не требуется оценивание параметров тренда всех сразу.

Рассмотрим эту задачу для ситуации, когда моменты наблюдений за РЭС известны точно (попутно заметим лишь, что ситуация, когда моменты наблюдений известны неточно, либо неизвестны, авторами решена, но из соображений возможности формата статьи здесь не приводится).

На произвольном отрезке времени  $[rT_0, (r+1)T_0]$  для момента  $t_i$   $i$ -го измерения результат самого измерения представлен в виде

$$x_i = x(t_i) = x_r(t_i) + n_i, \quad (8)$$

где  $x_r(t)$ ,  $r = 0, n-1$  тренд деградации:

$$x_r(t) = a_r + b_r \frac{t - rT_0}{T_0}, rT_0 \leq t \leq (r+1)T_0. \quad (9)$$

Таким образом, на  $r$ -ом отрезке тренд деградации оцениваем в виде полинома первого порядка.

«Сшивая» получаемые значения трендов, т.е.

$$x_r((r+1)T_0) = x_{r+1}((r+1)T_0)$$

приходим к условию

$$a_r + b_r = a_{r+1}. \quad (10)$$

Таким образом, для нас на начальных этапах деградация представляет собой кусочно-ломанную линию (сплайн первого порядка), что мы и видим нередко на экранах локаторов.

Начать процесс выделения тренда деградации РЭС – это начать процесс рекуррентного оценивания

его параметров  $\hat{a}_r, \hat{b}_r$ , но так, чтобы значения этих оценок стыковались, т.е.

$$\hat{a}_r + \hat{b}_r = \hat{a}_{r+1}. \quad (11)$$

Попутно заметим, что достаточно оценивать лишь параметры  $a_r$ , т.к.  $b_r$  мы определяем через  $a_r$  как

$$b_r = a_{r+1} - a_r.$$

Поэтому разумнее выразить тренд деградации, используя только параметры  $a_r$ . Тогда на произвольном отрезке времени  $[rT_0, (r+1)T_0]$  запишем его в виде

$$x_r(t) = a_r \left( r + 1 - \frac{t}{T_0} \right) + a_{r+1} \left( \frac{t}{T_0} - r \right), \\ rT_0 \leq t \leq (r+1)T_0,$$

Таким образом, если  $t_i$  попадает в интервал  $[rT_0, (r+1)T_0]$ , то мы имеем

$$x_i = x(t_i) = a_r \left( r + 1 - \frac{t_i}{T_0} \right) + a_{r+1} \left( \frac{t_i}{T_0} - r \right) + n_i, \quad (12)$$

где  $n_i$  – независимые случайные величины с  $M\{n_i\} = 0$  и  $D\{n_i\} = \sigma^2$ .

В сжатом виде для моментов  $t_i$ , известных точно, запишем полученный нами следующий рекуррентный алгоритм оценивания параметров тренда деградации, начиная с  $a_0$ .

Оценку  $\hat{a}_0$  запишем в виде:

$$\hat{a}_0 = \frac{1}{\lambda T_0} \sum_{i \in M_0} \left( 4 - 6 \frac{t_i}{T_0} \right) x_i.$$

Оценка  $\hat{a}_r$  находится в виде индексов тех  $t_i$ , которые попадают в  $r$ -й интервал:

$$\hat{a}_r = \frac{1}{\lambda T_0} \sum_{i \in M_r} \left( 4 - 6 \frac{t_i - rT_0}{T_0} \right) x_i.$$

Также получена и оценка ее дисперсии

$$\hat{D}\{\hat{a}_r\} = \frac{1}{(\lambda T_0)^2} \sum_{i \in M_r} \left( 4 - 6 \frac{t_i - rT_0}{T_0} \right)^2 x_i^2.$$

Наряду с этим в работе исследованы ситуации, когда моменты изменений параметров деградации РЭС известны неточно, либо неизвестны. Все результаты получены в замкнутой форме, доказаны все необходимые теоремы о свойствах полученных оценок.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход, основанный на учете случайностей моментов времени, когда возникают предпосылки для деградации РЭС, позволяет более реалистично

исследовать возможные условия ее работы и одна из важнейших задач данной проблемы – корректная оценка начинающихся трендов в системе.

Работа завершена в виде пакета программ, предоставляющего широкий спектр алгоритмов и сервисных возможностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Идрисов Ф.Ф. Рандомизированные временные ряды: моногр. / Ф.Ф. Идрисов. 2-е изд., испр. и доп. – Томск: Изд-во Томск. Гос. Ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 342 с.
- [2] Balakrishnan A.V. On the problem of time jitter in sampling / A.V. Balakrishnan // IRE Trans. Inform. Theory. – 1962. – Vol 8. – P. 226-236.

## On Identifying Trends in the Problems of Predicting the Radio Electronic Systems Degradation under Conditions of Randomized Observations

F.F. Idrisov, A.A. Kvasnikov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk,

farit.idrisov@mail.ru

**Abstract** — The paper presents models and algorithms for predicting the processes of degradation of radio electronic systems under conditions of different impacts.

**Keywords** — degradation, interference, radio electronic systems, randomized processes.

#### REFERENCES

- [1] Idrisov F.F. Randomizirovannye vremennye ryady (Randomized time series): monogr. / F.F. Idrisov. 2-e izd., ispr. i dop. – Tomsk: Izd-vo Tomsk. Gos. Un-ta sistem upr. i radioelektroniki, 2016. – 342 p. (in Russian)
- [2] Balakrishnan A.V. On the problem of time jitter in sampling / A.V. Balakrishnan // IRE Trans. Inform. Theory. – 1962. – Vol 8. – P. 226-236.