

В. С. ПОПУКАЙЛО

Республика Молдова, г. Тирасполь, Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко
E-mail: vsp.science@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ В ПАРНЫХ ВЫБОРКАХ МАЛОГО ОБЪЕМА

Рассмотрены методы нахождения значений линейной корреляционной связи в парных выборках малого объема. Исследовано влияние процедур виртуального увеличения объема выборки на значение коэффициента корреляции Пирсона, а также возможности использования этого коэффициента и модифицированного индекса Фехнера после применения метода точечных распределений и построения таблиц двумерного виртуального распределения. Сделан вывод, что рассмотренные методы не дают требуемой точности на выборках малого объема, а применение «бутстреппинга» и метода точечных распределений при проведении корреляционного анализа не рекомендуется.

Ключевые слова: малая выборка, корреляционный анализ, коэффициент корреляции Пирсона, модифицированный индекс Фехнера, метод точечных распределений.

При решении задач контроля качества микронизированных изделий большой интерес представляет задача проверки гипотезы о значимости корреляционной связи между случайными величинами, т. е. значимости отклонения коэффициента корреляции от нуля. Это обусловлено тем, что определение коэффициента связи при отборе факторов позволяет существенно сократить количество отбраковочных контрольных операций при сохранении качества изделия. Коэффициент корреляции при этом показывает, насколько связь между случайными величинами близка к линейной.

При применении корреляционного анализа к исходной информации предъявляются определенные требования, а именно: число наблюдений или объектов должно быть достаточно большим, а исходные данные — однородными, т. е. отражать наиболее характерные черты изучаемой совокупности. Кроме того, данные должны быть выражены количественно и измерены достаточно точно. Однако в задачах технического контроля не всегда можно получить достаточно большой набор данных для проведения анализа. Например, при производстве кристаллов интегральных микросхем из-за специфики топологии на пластине имеется от 5 до 10 тестовых ячеек, измерения в которых должны с некоторой вероятностью отражать поведение одноименных параметров 400–5000 рабочих кристаллов [1]. Проблема объема выборки при исследовании коэффициента корреляции поднимается различными исследователями [2–4], существует ряд методов повышения точности расчета коэффициента корреляции в условиях ограниченного набора данных, однако оптимально-

го метода нахождения значения корреляционной связи для выборок малого объема (3–20 элементов) на данный момент не предложено.

Целью настоящей работы является исследование меры тесноты связи и выработка методологии определения силы линейной корреляционной связи в малых парных выборках.

Важнейшими эмпирическими мерами тесноты линейной взаимосвязи количественных, равноценных в независимых наблюдениях переменных являются коэффициент парной корреляции Пирсона и коэффициент прямой корреляции знаков Фехнера.

Наиболее точной мерой линейной корреляционной связи является коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный по парной выборке достаточно большого объема, которая распределена по нормальному закону и не содержит грубых промахов. При несоблюдении хотя бы одного из этих условий величина коэффициента корреляции может значительно отличаться от реальной [2]. Поэтому применение коэффициента Пирсона не дает приемлемых результатов при малых выборках, поскольку в этих случаях невозможно точно определить вид закона распределения и обнаружить грубые промахи, однако, несмотря на это, он используется при анализе малых выборок [5].

Коэффициент Фехнера — это оценка степени согласованности направлений отклонений индивидуальных значений факторного и результативного признаков от их средних значений. Преимуществами использования этого коэффициента являются простота его вычисления и более низкая зависимость от вида закона распределения и от наличия в выборке грубых прома-

хов. Однако точность оценки при этом хуже, чем при использовании коэффициента корреляции Пирсона, а относительное совпадение этих коэффициентов наблюдается только при значениях, больших 0,8. Этот недостаток существенно уменьшается, если использовать модифицированный индекс Фехнера (**МИФ**) [6], однако его применение при малом числе наблюдений не представляется возможным.

Для повышения точности определения коэффициентов корреляции предлагается применить метод точечных распределений (**МТР**) [7] с построением таблицы двумерного виртуального распределения. Алгоритм расчета рассмотрим на конкретном числовом примере.

Пусть дана парная выборка объемом $n=10$, полученная на основании данных производства кристаллов интегральных микросхем (**табл. 1**)

Согласно методу точечных распределений каждое i -е значение выборки считается центром виртуального распределения с заданным законом распределения.

Для создания корреляционной таблицы необходимо сначала определить границы существова-

ном получается 10 групп интервалов дискретности. Следующим шагом формируется таблица, в столбцах которой располагаются центры 10 групп интервалов, а в строках — экспериментальные значения соответствующей выборки. В ячейку, находящуюся на пересечении центра группы и исходного значения рассматриваемой выборки, заносится число, соответствующее условию накрывания интервалов задания для данной выборки. Таким образом формируются таблицы для обеих выборок X и Y (**табл. 2, 3**).

Затем следует сформировать таблицу двумерного распределения (основа — метод Чебышева), клетки которой заполняются по формуле

$$d_{jl} = \sum_{i=1}^n n_{ji} n_{li} \quad (1)$$

где n — объем первоначальной парной выборки;

n_{ji}, n_{li} — данные ячеек табл. 2 и 3 соответственно.

Результаты двумерного виртуального распределения представлены в **табл. 4**.

Исследование связи между двумя случайными величинами начнем с вычисления смешанного центрального момента первого порядка:

$$\begin{aligned} \mu_{1/1} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k (X_j - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) n_{ji} = \\ &= \frac{19922,9}{818,106} = 24,3525. \end{aligned} \quad (2)$$

Смешанный основной момент первого порядка является коэффициентом корреляции и находится следующим образом:

$$r_{1/1} = \frac{\mu_{1/1}}{S_X S_Y} = \frac{24,3525}{42,8364} = 0,5685, \quad (3)$$

где S_X и S_Y — среднеквадратические отклонения, $S_X = 10,00146$, $S_Y = 4,28302$.

Для расчета индекса Фехнера необходимо вычислить таблицу знаков отклонения $\text{sign}(X_i - X_{cp})$ и $\text{sign}(Y_i - Y_{cp})$. Количество пар отклонений, совпадающих по знаку, обозначим как v , а не совпадающих — как w .

Далее найдем модифицированный индекс Фехнера, используя формулу

$$f^* = \pm \sqrt{\frac{|v - w|}{v + w}} \pm 0,051, \quad (4)$$

где знак «+» берется при $v > w$, знак «-» — при $v < w$.

Определим число пар совпадающих и не совпадающих знаков отклонения от среднего в таблице двумерного виртуального распределения. Для этого подсчитаем суммы n_{ji} чисел, которые стоят в ячейках на пересечении совпадающих и не совпадающих знаков отклонения величин X и Y соответственно. Решив эту задачу, получим $v=589,041$, $w=229,065$, и тогда в соот-

Таблица 1

Исходная парная выборка

i	X_i	Y_i
1	247,03	206,15
2	231,19	200,78
3	223,24	199,38
4	221,70	193,02
5	238,64	200,11
6	240,42	207,82
7	237,47	201,29
8	227,54	198,47
9	220,44	197,87
10	240,07	202,10

ния выборок каждого параметра (a_X, b_X и a_Y, b_Y), а также интервалов перекрытия каждого ядра ($\pm pX$ и $\pm pY$) с одновременным выбором вида ядра, коэффициента p' и количества интервалов дискретности каждого отрезка (a, b).

В результате расчетов получено: $p'=0,36962$; $a_X=210,619$; $b_X=254,929$; $p_X=16,3778$; $a_Y=190,682$; $b_Y=210,716$; $p_Y=7,40454$.

Каждый отрезок (a, b) следует разбить на 30 интервалов дискретности и найти центры для каждого интервала. Затем определяется условие накрывания каждой i -й дельтаобразной функции интервалом задания $\pm p$ каждого центра j -го интервала дискретности.

Частоты средних интервалов дискретности следует объединить по три, и таким обра-

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Таблица 2

Суммарные виртуальные частоты для выборки случайной величины X

		247,03	231,19	223,24	221,70	238,64	240,42	237,47	227,54	220,44	240,07	n_j	$X_j \cdot n_j$	$X_j^2 \cdot n_j$
1	212,83	0,00	0,01	0,52	0,83	0,00	0,00	0,00	0,09	1,16	0,00	2,62	557,67	118690,72
2	217,27	0,00	0,13	1,66	2,14	0,00	0,00	0,00	0,54	2,49	0,00	6,97	1513,93	328924,97
3	221,70	0,00	0,69	2,82	2,93	0,03	0,01	0,05	1,70	2,86	0,01	11,10	2461,00	545595,63
4	226,13	0,00	1,94	2,56	2,14	0,24	0,11	0,37	2,84	1,75	0,13	12,09	2733,92	618215,24
5	230,56	0,04	2,91	1,24	0,84	1,03	0,62	1,37	2,53	0,57	0,69	11,83	2728,45	629066,72
6	234,99	0,29	2,33	0,32	0,17	2,37	1,83	2,65	1,21	0,10	1,94	13,20	3102,51	729058,27
7	239,42	1,16	0,99	0,04	0,02	2,90	2,88	2,76	0,31	0,01	2,91	13,98	3346,53	801227,18
8	243,85	2,49	0,23	0,00	0,00	1,90	2,43	1,53	0,04	0,00	2,33	10,95	2669,03	650846,85
9	248,28	2,86	0,03	0,00	0,00	0,66	1,09	0,45	0,00	0,00	1,00	6,09	1511,43	375260,56
10	252,71	1,75	0,00	0,00	0,00	0,12	0,26	0,07	0,00	0,00	0,23	2,43	614,67	153336,11
Σ		8,59	9,26	9,17	9,07	9,25	9,23	9,26	9,26	8,94	9,24	91,26	21239,14	4952222,26

Таблица 3

Суммарные виртуальные частоты для выборки случайной величины Y

		206,15	200,78	199,38	193,02	200,11	207,82	201,29	198,47	197,87	202,10	n_l	$Y_l \cdot n_l$	$Y_l^2 \cdot n_l$
1	191,68	0,00	0,00	0,03	2,55	0,01	0,00	0,00	0,08	0,15	0,00	2,82	540,54	103613,40
2	193,69	0,00	0,06	0,23	2,83	0,12	0,00	0,03	0,49	0,75	0,01	4,51	873,78	169241,16
3	195,69	0,00	0,39	1,01	1,68	0,64	0,00	0,25	1,60	2,02	0,12	7,70	1507,02	294910,03
4	197,69	0,01	1,39	2,34	0,53	1,86	0,00	1,07	2,79	2,92	0,64	13,56	2679,93	529805,91
5	199,70	0,11	2,67	2,91	0,09	2,89	0,02	2,40	2,60	2,26	1,87	17,81	3556,70	710263,21
6	201,70	0,62	2,74	1,92	0,01	2,40	0,16	2,89	1,30	0,93	2,89	15,86	3198,85	645209,42
7	203,70	1,83	1,50	0,68	0,00	1,07	0,78	1,86	0,34	0,20	2,39	10,66	2171,50	442342,20
8	205,71	2,88	0,44	0,13	0,00	0,25	2,07	0,64	0,05	0,02	1,06	7,54	1550,21	318888,98
9	207,71	2,42	0,07	0,01	0,00	0,03	2,93	0,12	0,00	0,00	0,25	5,83	1210,87	251510,08
10	209,71	1,08	0,01	0,00	0,00	0,00	2,21	0,01	0,00	0,00	0,03	3,35	702,24	147268,92
Σ		8,97	9,26	9,26	7,68	9,26	8,16	9,26	9,26	9,25	9,26	89,63	17991,63	3613053,32

Таблица 4

Таблица двумерного виртуального распределения

		191,68	193,69	195,69	197,69	199,70	201,70	203,70	205,71	207,71	209,71	n_l	$X_j - X_{cp}$	$Y_j - Y_{cp}$
1	212,83	2,32	3,39	4,42	5,33	4,48	2,24	0,64	0,10	0,01	0,00	22,93	-19,90	-9,04
2	217,27	5,90	8,56	11,22	14,00	12,40	6,60	2,03	0,36	0,04	0,00	61,12	-15,47	-7,04
3	221,70	8,10	11,94	16,55	22,33	21,40	12,46	4,29	0,89	0,14	0,03	98,13	-11,04	-5,04
4	226,13	6,02	9,49	15,26	23,80	25,99	17,62	7,35	2,03	0,59	0,27	108,44	-6,61	-3,03
5	230,56	2,48	4,65	10,07	19,96	26,90	22,72	12,04	4,82	2,49	1,47	107,59	-2,18	-1,03
6	234,99	0,61	1,74	6,05	16,21	27,42	28,08	18,19	10,07	7,08	4,47	119,92	2,25	0,97
7	239,42	0,12	0,73	3,85	12,58	24,20	27,72	21,18	15,32	12,45	7,77	125,92	6,69	2,98
8	243,85	0,03	0,33	2,03	7,11	14,54	18,32	17,26	16,22	13,96	8,17	97,97	11,12	4,98
9	248,28	0,01	0,11	0,67	2,43	5,28	7,81	10,06	12,01	10,43	5,55	54,35	15,55	6,98
10	252,71	0,00	0,02	0,12	0,47	1,16	2,29	4,22	5,90	5,06	2,48	21,73	19,98	8,99
n_j		25,58	40,98	70,24	124,23	163,77	145,87	97,26	67,73	52,25	30,21	818,11	—	—

ветствии с формулой (4) величина МИФ в этом случае будет равна

$$f^* = 0,71433. \quad (5)$$

Таким образом, были обработаны более ста парных выборок с коэффициентом корреляции от 0,1 до 1.

Результаты проделанной работы представлены на **рис. 1–4**, где изображены линии тренда, аппроксимируемые по двум точкам, по оси X располагаются значения коэффициентов корреляции Пирсона по первоначальной выборке большого объема (r^6), по оси Y : на **рис. 1** — значения коэффициента корреляции Пирсона по выборке малого объема (r^M), на **рис. 2** — наивероятнейшего коэффициента корреляции после применения «бутстреппинга» ($r_{\text{бтс}}$), на **рис. 3** — коэффициента корреляции Пирсона по выборке малого объема после применения метода точечных распределений ($r_{\text{мтр}}$), на **рис. 4** — моди-

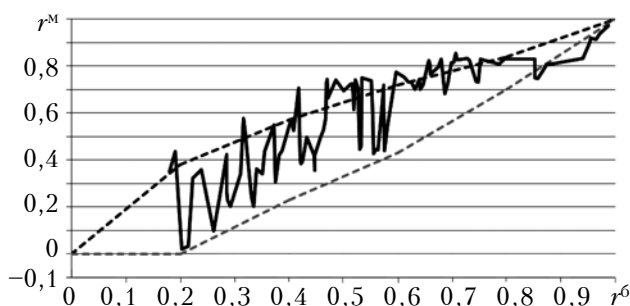


Рис. 1. Коэффициент корреляции Пирсона по малой выборке

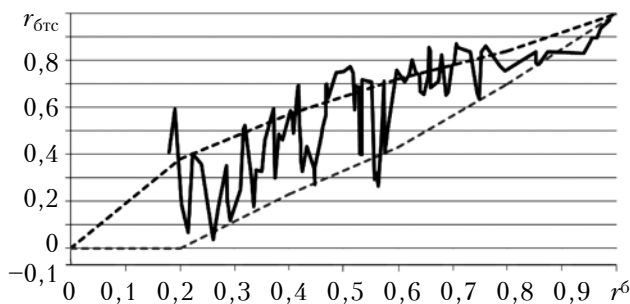


Рис. 2. Наивероятнейший коэффициент корреляции после применения «бутстреппинга»

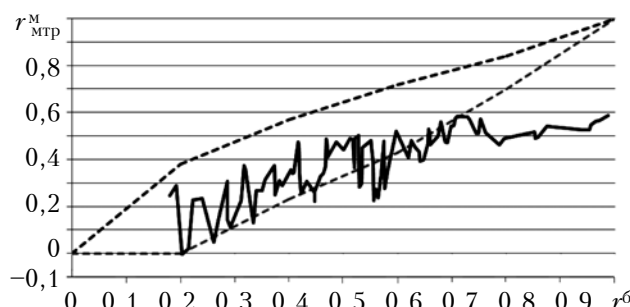


Рис. 3. Коэффициент корреляции Пирсона после применения МТР

фицированного индекса Фехнера после применения метода точечных распределений ($f_{\text{мтр}}^*$). Пунктирными линиями на графиках обозначены доверительные интервалы для коэффициента корреляции, полученного по первоначальной выборке [8, с. 250].

Для оценки силы связи в теории корреляции применяется шкала Чеддока: слабая — от 0,1 до 0,3; умеренная — от 0,3 до 0,5; заметная — от 0,5 до 0,7; высокая — от 0,7 до 0,9; весьма высокая (сильная) — от 0,9 до 1,0.

Как видно из **рис. 1**, практически все случаи, когда коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный по малой выборке, показывает слабую или умеренную корреляционную связь, действительно являются выборками с данными видами связей. Также этот критерий почти безошибочно указывает на высокую и весьма высокую (сильную) связь. Однако в тех случаях, когда $0,5 < r < 0,75$, наблюдается заметная тенденция к завышению значения коэффициента корреляции. Кроме того, разброс значений коэффициентов корреляции до $r=0,6$ в первоначальной выборке большого объема приводит к довольно большому разбросу при определении связи по парной выборке объемом $n=10$.

Процедура «бутстреппинга» не дает улучшения результата, а только увеличивает разброс получаемых значений коэффициента корреляции при общем сохранении тренда (**рис. 2**).

Из **рис. 3** видно, что после применения метода точечных распределений тенденция в изменении значений коэффициента корреляции сохраняется, их разброс значительно снижается, однако в случаях заметной и более тесных связей явно преобладает тенденция к значительному снижению значения коэффициента корреляции, что не позволяет успешно использовать данный метод на практике. Необходимо разработать дополнительный поправочный коэффициент, который учтет обнаруженный недостаток.

Применение модифицированного индекса Фехнера после метода точечных распределений (**рис. 4**) при значениях первоначального коэффициента корреляции до 0,3 также дает на выходе большой разброс, который даже увеличивается по сравнению с разбросом при нахождении коэффициента корреляции Пирсона по ма-

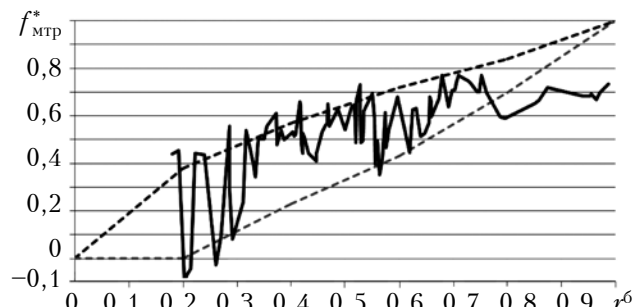


Рис. 4. Модифицированный индекс Фехнера после применения МТР

лой выборке. Однако при более высоких значениях r (от 0,3 до 0,75) разброс значительно уменьшается, что приводит к тому, что почти все значения попадают в доверительный интервал. Недостатком данного метода, таким образом, является невозможность определить сильную линейную связь между выборками малого объема.

Выводы

Проведенное исследование показало, что при решении задач корреляционного анализа применительно к выборкам малого объема ни один из рассмотренных коэффициентов не дает результаты, которые с высокой степенью надежности позволяют устанавливать вид линейной корреляционной связи между величинами. Применение процедур виртуального увеличения количества исследуемой информации, таких как «бутстрепинг» и метод точечных распределений, не увеличивают точности при нахождении наивероятнейшего коэффициента корреляции Пирсона. Расчет модифицированного индекса Фехнера после применения метода точечных распределений дает удовлетворительные результаты для разграничения слабой и высокой связей, однако не позволяет определить сильную корреляционную связь. К тому же, в задачах контроля качества микросхемной продукции применение данного метода вместо нахождения коэффициента Пирсона по классическому методу не рекомендуется в связи с относительно высокой его трудоемкостью.

Направлением дальнейших исследований должно стать определение оптимального мето-

да нахождения корреляционной связи по выборкам малого объема.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Столяренко Ю. А. Контроль кристаллов интегральных схем на основе статистического моделирования методом точечных распределений / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Москва: ГУП НПП «СПУРТ», 2006.
2. Goodwin L.D., Leech N.L. Understanding correlation: factors that affect the size of r // The Journal of Experimental Education. — 2006. — Vol. 74, iss. 3. — P. 249–266. <http://dx.doi.org/10.3200/JEXE.74.3.249-266>
3. De Winter J.C.F. Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. — Practical Assessment, Research & Evaluation. — 2013. — Vol. 18, N 10. — <http://pareonline.net/getvn.asp?v=18&n=10>
4. Moinester M., Gottfried R. Sample size estimation for correlation with pre-specified confidence interval // The Quantitative Methods for Psychology. — 2014. — Vol. 10, N 2. — P. 124–130.
5. Сухорученков Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. — Москва: Вузовская книга, 2010.
6. Долгов А. Ю. Повышение эффективности статистических методов контроля и управления технологическими процессами изготовления микросхем / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тирасполь: Приднестровский гос. ун-т им. Т. Г. Шевченко, 2000.
7. Столяренко Ю. А. Метод точечных распределений // Радиоэлектронные и компьютерные системы. — 2012. — № 6. — С. 75–77.
8. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. — Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.

Дата поступления рукописи
в редакцию 30.11 2015 г.

В. С. ПОПУКАЙЛО

Республіка Молдова, м. Тираспіль, Придністровський державний університет ім. Т. Г. Шевченко
E-mail: vsp.science@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО КОРЕЛЯЦІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ПАРНИХ ВИБІРКАХ МАЛОГО ОБСЯГУ

Розглянуто методи знаходження значень лінійного кореляційного зв'язку в парних вибірках малого обсягу. Досліджено вплив процедур віртуального збільшення обсягу вибірки на значення коефіцієнта кореляції Пірсона, а також можливості використання цього коефіцієнта та модифікованого індексу Фехнера після застосування методу точкових розподілів і побудови таблиць двовимірного віртуального розподілу. Зроблено висновок, що розглянуті методи не дають необхідної точності на вибірках малого обсягу, а застосування «бутстрепінга» і методу точкових розподілів при проведенні кореляційного аналізу не рекомендується.

Ключові слова: мала вибірка, кореляційний аналіз, коефіцієнт кореляції Пірсона, модифікований індекс Фехнера, метод точкових розподілів.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.27
UDC 519.25

V. S. POPUKAYLO

Moldova, Tiraspol, Shevchenko Transnistria State University
E-mail: vsp.science@gmail.com

THE LINEAR CORRELATION RESEARCH IN PAIRED SMALL VOLUME SAMPLES

This article describes the methods of finding the values of the linear correlation in paired small volume samples. The importance of the study lies in the fact that in problems of technical control it is not always possible to

obtain a data set sufficiently large for traditional analysis methods. In this research the author investigates and visually illustrates the possibility of Pearson correlation coefficient usage (and the impact on the value of the virtual procedures increasing the volume sample), as well as the possibility of the Fechner's modified index usage after applying the method of pointed distributions and tabulation of the virtual two-dimensional distribution. The study allows concluding that the considered methods do not provide the required accuracy on small volume samples, and the usage of "bootstrapping" and the method of point distributions during the correlation analysis are not recommended here.

Keywords: small volume samples, correlation analysis, method of point allocations, Pearson correlation coefficient, Fechner's modified index.

REFERENCES

1. Stolyarenko Yu.A. [The crystals control of integrated schemes on the basis of statistical modeling by pointed distributions method]. *Dissertation abstract*. Moscow, SUE NPTs "SPURT", 2006. (Rus)
2. Goodwin L.D., Leech N.L. Understanding Correlation: Factors That Affect the Size of r . *The Journal of Experimental Education*, 2006, vol. 74, iss. 3, pp. 249-266. <http://dx.doi.org/10.3200/JEXE.74.3.249-266>
3. J.C.F. de Winter. Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 2013, vol. 18, no. 10. <http://pareonline.net/getvn.asp?v=18&n=10>
4. Moinester M., Gottfried R. Sample size estimation for correlation with pre-specified confidence interval. *The Quantitative Methods for Psychology*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 124-130.
5. Sukhoruchenkov B.I. *Analiz maloi vyborki* [Small sample analysis. Applied statistical methods]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2010, 384 p. (Rus)
6. Dolgov A.Yu. [The efficiency of statistical control and management methods of technological chips production processes]. *Dissertation abstract*. Tiraspol, Pridnestrovien state university of T. G. Shevchenko, 2000. (Rus)
7. Stolyarenko Y.A. [Method of point allocations]. *Electronic and computer systems*, 2012, no.6, pp. 75-77. (Rus)
8. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Mathematical Statistics Tables]. Moscow, Nauka, 1983, 416 p. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Матвійків М. Д., Вус Б. С., Матвійків О. М. Елементи та компоненти електронних пристроїв.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Викладено основні відомості про сучасні та перспективні елементи і компоненти електронних пристроїв, зокрема наведено визначення різних видів елементів та компонентів, розглянуто їх призначення, класифікацію, умовні зображення і позначення, будову, роботу, властивості, застосування.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом "Радіoeлектронні апарати", та фахівців, які проектують, виготовляють або обслуговують різноманітні електронні апарати, зокрема аудіо- та відеотехніку, електронні обчислювальні машини, мікропроцесори та персональні комп'ютери, медичні апарати, засоби зв'язку, контрольно-вимірювальні прилади, робототехніку, автоматизовані системи проектування та управління тощо.



НОВЫЕ КНИГИ



Баришніков Г. В., Волинюк Д. Ю., Гельжинський І. І., Готра З. Ю., Мінаєв Б. П., Стахіра П. Й., Черпак В. В. Органічна електроніка.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Наведено основні постулати квантової механіки для органічної електроніки. Описано базові структури та особливості функціонування нанорозмірних елементів, пристроїв електронної техніки: сонячних фотоелементів, світловипромінювальних структур, транзисторних структур, сенсорів тощо. Розглянуто фізико-хімічні основи технології створення електронних структур органічної електроніки.

Для студентів та аспірантів, які навчаються за напрямом електроніки.

