

УДК 534.8:621.396.6

Д. т. н. В. Л. ЛАНИН<sup>1</sup>, И. Б. ПЕТУХОВ<sup>2</sup>Беларусь, г. Минск, <sup>1</sup>БГУИР, <sup>2</sup>КБТЭМ-СО ГНПО «Планар»

E-mail: vlanin@bsuir.by, petuchov@kbtem.by

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УЗ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

*Предложена методика расчета параметров полуволновых пакетных УЗ-пьезоизлучателей и ступенчатых волноводов, обладающая погрешностью не более 6–8%, которая может быть достаточно эффективно использована для проектирования ультразвуковых преобразователей различных конструкций в широком диапазоне частот в силу своей простоты, удобства применения и малых затрат.*

*Ключевые слова:* пьезокерамический излучатель, волновод, расчет параметров, импеданс, микросварка.

В современных установках микросварки волоочных выводов в изделиях электронной техники ультразвуковая (УЗ) система, состоящая из УЗ-генератора (УЗГ) и УЗ-преобразователя (УЗП), играет ключевую роль в стабильности работы установки и воспроизводимости качества сварных соединений, особенно при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа и с использованием проводников малого сечения. УЗ-генератор формирует на выходе программируемый по амплитуде и длительности переменный сигнал ультразвуковой частоты, поступающий на УЗ-преобразователь, который преобразует подводимую электрическую энергию в энергию механических колебаний на резонансной частоте. Работа большинства УЗП в установках микросварки основана на обратном пьезоэффекте используемых пьезокерамических материалов в виде колец или пластин. К основным параметрам УЗ-преобразователей относятся стабильность частоты резонанса в процессе эксплуатации, величина импеданса на резонансной частоте и форма частотных зависимостей модуля и фазы импеданса.

Современный УЗП для установок микросварки имеет импеданс 10–30 Ом на резонансной частоте, которая находится в диапазоне от 60 до 240 кГц. Низкий импеданс позволяет значительно упростить выходной каскад УЗ-генератора при согласовании нагрузки. УЗ-преобразователи повышенной частоты (с частотой резонанса более 100 кГц) применяются преимущественно в установках термозвуковой сварки методом «шарик — клин», что позволяет повысить производительность за счет сокращения времени сварки, а также уменьшить температуру зоны сварки [1]. Возможность снижения температуры зоны микросварки особенно актуальна при сборке при-

боров на полимерных носителях, например кредитных карт, SIM карт и т. п.

УЗ-преобразователь состоит из трех основных частей (рис. 1): пьезокерамического излучателя, волновода и крепежного стакана, расположенного в узле продольных колебаний. При соединении пьезоизлучателя с волноводом необходимо обеспечить такие условия, чтобы частота резонанса системы «пьезоизлучатель — волновод» оставалась равной резонансной частоте излучателя. Поэтому проектирование УЗ-системы включает в себя расчет геометрических размеров составных частей УЗ-преобразователя на заданную частоту с учетом конструктивных особенностей сварочной головки установки микросварки. Анализ амплитудно-частотной характеристики рассчитываемого УЗ-преобразователя выполняется с помощью измерительных стендов или программных средств компьютерного моделирования. Очевидно, что предварительное моделирование с помощью программных средств позволит избежать дорогостоящих производственных затрат на исправление конструкторских ошибок на этапе проектирования.

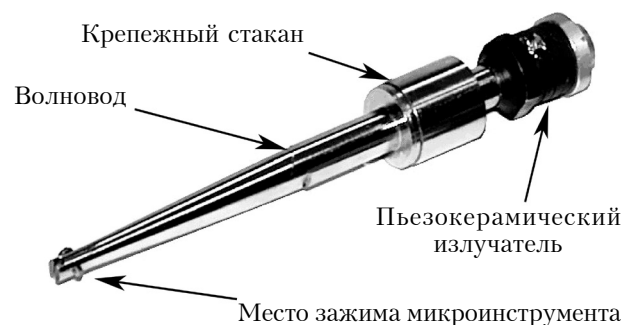


Рис. 1. Ультразвуковой преобразователь установки микросварки выводов

В настоящей работе предложена методика расчета параметров основных частей УЗ-преобразователей, которая может быть использована для расчета и анализа преобразователей различных конструкций в широком диапазоне частот.

**Расчет параметров пьезокерамического излучателя**

Пьезокерамический излучатель представляет собой несколько стянутых металлическими накладками пьезокерамических колец, электрически соединенных параллельно.

Круговую частоту  $\omega$  механического резонанса пьезоизлучателя можно определить из соотношения [2]

$$\frac{\omega l_2}{c_2} + \arctg\left(\frac{\rho_1 S_1 c_1}{\rho_2 S_2 c_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_1}{c_1}\right) + \arctg\left(\frac{\rho_3 S_3 c_3}{\rho_2 S_2 c_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_3}{c_3}\right) = \pi, \quad (1)$$

где  $l_i$ ,  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $S_i$  – соответственно длина, плотность материала, скорость звука в нем и площадь поперечного сечения тыльной накладки ( $i=1$ ), секции пьезокерамики ( $i=2$ ) и передней накладки ( $i=3$ ) (рис. 2).

Расчет частоты пьезоизлучателя по этой формуле проводился в математическом пакете MathCAD при следующих исходных данных:

- секция пьезокерамики состоит из четырех колец толщиной 2 мм, внешний диаметр 12 мм, внутренний 5 мм, материал ЦТС-43 ( $l_2=8$  мм,  $S_2=374$  мм<sup>2</sup>,  $\rho_2=7500$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_2=3200$  м/с [3]);
- накладки имеют форму цилиндра диаметром 12,8 мм и высотой 8,5 мм, материал сталь ( $l_1=l_3=8,5$  мм,  $S_1=S_3=130$  мм<sup>2</sup>,  $\rho_1=\rho_3=7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=c_3=5100$  м/с).

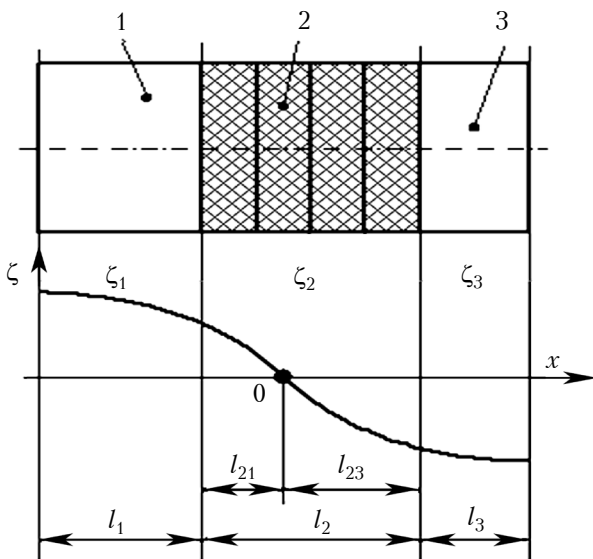


Рис. 2. Распределение амплитуды колебаний в полуволновом пьезоизлучателе:  
 1 – тыльная накладка; 2 – секция пьезокерамики;  
 3 – передняя накладка

В результате расчета было получено значение резонансной частоты пьезоизлучателя 64,141 кГц.

Измерения, проведенные на специальном стенде [4] для пяти образцов пьезоэлектрических излучателей показали, что их резонансная частота находится в диапазоне от 61,5 до 66,4 кГц, т. е. отклонение от расчетной частоты не превышает 8%.

Из анализа соотношения (1) можно заключить, что при уменьшении длины накладок частота пьезоизлучателя увеличивается. Например, при той же длине пьезосекции 8 мм уменьшение длины накладок с 8,5 до 3,2 мм приводит к росту частоты до 102 кГц. Очевидно, что для более высоких частот необходимо использовать пьезокольца меньшей толщины для обеспечения технологичности конструкции.

Приведенный расчет пригоден только для первоначальной оценки резонансной частоты, поскольку он не учитывает различные моды колебаний, которые могут возникать при определенных соотношениях геометрических размеров составных частей пьезоизлучателя, усилия сжатия пакета и др. К нежелательным модам колебаний относятся поперечные и крутильные колебания, которые, распространяясь по волноводу УЗ-преобразователя к месту зажима микроинструмента, могут вызвать сложные колебания его рабочего торца, что в свою очередь может сказаться на качестве сварных соединений [5].

Эта проблема больше всего проявляется при разработке УЗП повышенной частоты (более 100 кГц), поскольку, как указывалось выше, для них нужно использовать составляющие компоненты меньших геометрических размеров. В этом случае оценить выходные характеристики УЗП можно методом лазерной виброметрии, позволяющим дистанционно измерять амплитуду и спектр механических колебаний рабочего торца микроинструмента [6].

В симметричном полуволновом пьезоизлучателе узел колебаний находится посередине пьезокерамической секции, поэтому здесь возникают наибольшие внутренние напряжения. Чтобы увеличить надежность пьезокерамики при высокой подводимой мощности, желательно сместить узел колебаний ближе к границе пьезокерамической секции с передней накладкой, например: тыльная накладка вместе с секцией пьезокерамики образует четвертьволновой излучатель с узлом колебаний на границе пьезокерамики с передней накладкой, выполненной в виде четвертьволнового трансформатора, который обеспечивает необходимый коэффициент усиления. Очевидно, что в таком случае частотопонижающие накладки будут иметь разную длину, и тогда судить о положении узла колебаний по выражению (1) довольно сложно. Поэтому для определения размеров накладок и, соответственно, положения секций пьезокерамики относительно узла колебаний воспользуемся уравнением продольных колебаний [7]

$$\frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где  $\zeta(x, t)$  – функция распределения амплитуды колебаний;

$c$  – скорость звука в материале;

$x, t$  – координата и время распространения продольных колебаний соответственно.

Обычно решение такого уравнения в общем виде находят как

$$\zeta(x, t) = \left[ A \cos \frac{\omega}{c} x + B \sin \frac{\omega}{c} x \right] \sin \omega t. \quad (3)$$

Чтобы получить отсюда выражения для расчета длины накладок, составим граничные условия согласно рис. 2.

На границах секции керамики с накладками справедливы следующие равенства амплитуд и сил сжатия и растяжения:

– при  $x = -l_{21}$

$$\zeta_1 = \zeta_2, \quad (4)$$

$$E_1 S_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} = E_2 S_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x}; \quad (5)$$

– при  $x = l_{23}$

$$\zeta_2 = \zeta_3, \quad (6)$$

$$E_2 S_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} = E_3 S_3 \frac{\partial \zeta_3}{\partial x}; \quad (7)$$

где  $E_i$  – модуль Юнга для материала тыльной накладки ( $i=1$ ), пьезокерамики ( $i=2$ ) и передней накладки ( $i=3$ ).

На торцах полуволнового излучателя значения амплитуды колебаний достигают своих максимальных значений и, следовательно, их производные равны нулю, то есть:

– при  $x = -l_{21} - l_1$

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

– при  $x = l_{23} + l_3$

$$\frac{\partial \zeta_3}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

С использованием этих соотношений были проведены соответствующие преобразования, в результате которых получены следующие формулы для определения длины накладок:

$$l_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \frac{Z_1 \sin \frac{\omega}{c_1} l_{21} + \cos \frac{\omega}{c_1} l_{21}}{Z_1 \cos \frac{\omega}{c_1} l_{21} - \sin \frac{\omega}{c_1} l_{21}} - l_{21}, \quad (10)$$

$$l_3 = \frac{c_3}{\omega} \arctg \frac{Z_3 \sin \frac{\omega}{c_3} l_{23} + \cos \frac{\omega}{c_3} l_{23}}{Z_3 \cos \frac{\omega}{c_3} l_{23} - \sin \frac{\omega}{c_3} l_{23}} - l_{23}, \quad (11)$$

где

$$Z_1 = \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \operatorname{tg} \left( \frac{\omega}{c_2} l_{21} \right);$$

$$Z_3 = \frac{E_3 S_3 c_2}{E_2 S_2 c_3} \operatorname{tg} \left( \frac{\omega}{c_2} l_{23} \right).$$

Значения длины стальных накладок диаметром 12,8 мм, рассчитанные по формулам (10) и (11) для указанных выше размеров секции пьезокерамики ЦТС-43 (четыре кольца диаметром 12 мм и толщиной 2 мм) при резонансной частоте пьезоизлучателя 92 кГц, составили 4 мм для тыльной накладки и 4,2 мм для передней. Результаты испытаний партии излучателей (10 штук) с такими размерами показали разброс по частоте  $\pm 2$  кГц относительно заложенной в расчете величины, что можно считать достаточно хорошим согласованием.

### Расчет параметров составного волновода

Волновод является нагрузкой пьезоизлучателя и соединяется с ним посредством резьбовой шпильки. Конструкция классического волновода представлена на рис. 3. Здесь имеется три секции: первая, длиной  $l_1$ , имеет форму цилиндра диаметром  $d_1$ ; вторая, длиной  $l_2$ , – переменного сечения; третья, длиной  $l_3$ , – цилиндрическая, диаметром  $d_2$ . Первая секция соединяется с накладкой пьезоизлучателя, в третьей производят зажим микроинструмента. Вторая секция может быть выполнена в виде конуса, экспоненты или катеноида, однако очевидно, что с точки зрения изготовления наиболее технологичным является конус. Вся конструкция для исключения акустических потерь выполняется как одно целое.

Ступенчатый волновод представляет для пьезоизлучателя комплексную нагрузку, реактивная часть которой на резонансной частоте должна быть равна нулю. Для частотного анализа составного волновода воспользуемся соотношениями для входных импедансов каждой секции волновода [8], при этом будем учитывать, что третья секция является нагрузкой для второй секции с переменным сечением, которая, в свою очередь, является нагрузкой для первой части волновода.

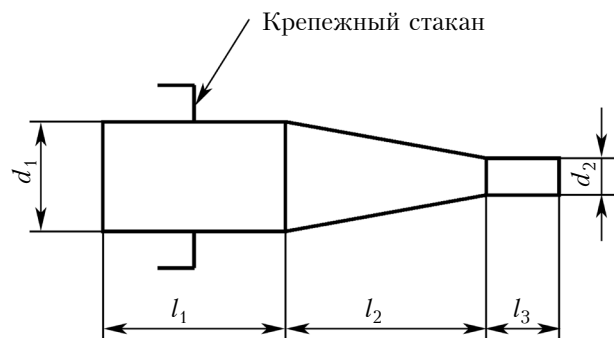


Рис. 3. Конструкция ступенчатого волновода

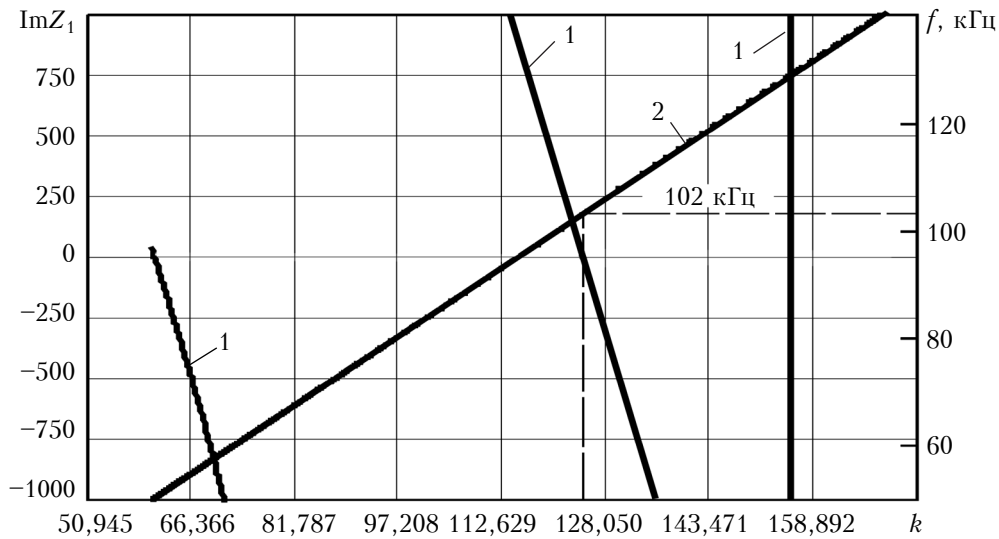


Рис. 4. Зависимости мнимой части импеданса (1) и резонансной частоты (2) ступенчатого волновода, выполненного из стали ( $d_1=7$  мм;  $d_2=3,5$  мм;  $l_1=49,6$  мм;  $l_2=39$  мм;  $l_3=6$  мм), от волнового числа  $k$

В приведенных далее выражениях, описывающих входные импедансы, нагрузка соответствующей секции волновода будет обозначаться как  $Z_{Li}$ , а ее акустический импеданс —  $Z_{ci}$  ( $Z_{ci}=\rho S_i c$ , где  $S_i$  — площадь поперечного сечения секции;  $\rho$ ,  $c$  — плотность материала и скорость звука в нем).

Входной импеданс третьей секции  $Z_3$  описывается следующим соотношением [8]:

$$Z_3 = \frac{Z_{L3} + jZ_{c3} \operatorname{tg} kl_3}{1 + j \frac{Z_{L3}}{Z_{c3}} \operatorname{tg} kl_3}, \quad (12)$$

где  $k$  — волновое число,  $k=2\pi f/c$ ;  
 $f$  — частота.

Для дальнейшего анализа будем считать, что третья секция волновода находится без нагрузки, т. е.  $Z_{L3}=0$ , и тогда выражение (12) сведется к следующему:

$$Z_3 = jZ_{c3} \operatorname{tg} kl_3. \quad (13)$$

Примем, что вторая секция имеет форму конуса и введем следующие обозначения:

$$M=d_1/d_2; \beta=(M-1)/(Ml_2); b_1=\beta/k;$$

$$b_2=\beta(M-1)/k; b_3=1+M\beta^2/k^2; b_4=M\beta/k.$$

Тогда входной импеданс второй секции будет описываться как

$$Z_2 = \frac{jZ_{c2}[-b_2 \cos kl_2 + b_3 \sin kl_2] + Z_{L2} M^2 [\cos kl_2 - b_1 \sin kl_2]}{\cos kl_2 - b_4 \sin kl_2 + j \frac{Z_{L2}}{Z_{c2}} M^2 \sin kl_2}. \quad (14)$$

Поскольку нагрузкой  $Z_{L2}$  этой секции является входной импеданс третьей секции  $Z_3$ , т. е.  $Z_{L2}=Z_3$ , подставим соотношение (13) в (14) и получим

$$Z_2 = \frac{jZ_{c2}[-b_2 \cos kl_2 + b_3 \sin kl_2] + Z_3 M^2 [\cos kl_2 - b_1 \sin kl_2]}{\cos kl_2 - b_4 \sin kl_2 + j \frac{Z_3}{Z_{c2}} M^2 \sin kl_2}. \quad (15)$$

Импеданс  $Z_2$ , в свою очередь, является нагрузкой для первой части волновода, т. е.  $Z_{L1}=Z_2$ . Тогда с учетом этого и на основании выражения (12) для импеданса цилиндрической части получим выражение для общего импеданса волновода в следующем виде:

$$Z_1 = \frac{Z_2 + jZ_{c1} \operatorname{tg} kl_1}{1 + j \frac{Z_2}{Z_{c1}} \operatorname{tg} kl_1}. \quad (16)$$

С учетом того, что входной импеданс волновода  $Z_1$  является комплексной величиной, частотный анализ проводится графически с отображением мнимой части импеданса  $\operatorname{Im}Z_1$ .

На рис. 4 приведены графики, из которых видно, что кривая импеданса пересекает нуль в точке, которая соответствует резонансной частоте 102 кГц, т. е. на этой частоте волновод указанных размеров должен быть согласован с пьезоизлучателем. Фактическая резонансная частота УЗ-преобразователя, изготовленного в соответствии с проведенными расчетами, получилась равной 100,6 кГц.

\*\*\*

Предложенная методика расчета параметров полуволнового пакетного УЗ-пьезоизлучателя повышенной частоты и ступенчатого волновода, имеет погрешность не более 6–8%. Несмотря на то, что это несколько больше, чем погрешность, которую обеспечивают коммерческие программные продукты типа ANSYS (3,5–5,0%), предложенная методика может быть достаточно эффективно использована для проектирования кон-

струкций УЗП и составных волноводов в широком диапазоне частот в силу своей простоты, удобства применения и малой стоимости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Parrini L. Advanced process characterization for 125 kHz wire bonder ultrasonic transducer // IEEE Transactions on components and packaging technologies. — 2002. — Vol. 25, N 3. — P. 486–494. — DOI: 10.1109/TCAPT.2002.803658
2. Chilibon I., Wevers M., Lafaut J.-P. Ultrasound underwater transducer for extracor-poreal shock wave lithotripsy // Romanian Reports in Physics. — 2005. — Vol. 57, N 4. — P. 979–992.
3. <http://www.elpapieroz.ru/rus/piezoceramic/material/powerultrasound.html>
4. Ланин В., Петухов И., Федоров Н. Настройка ультразвуковых колебательных систем микросварки соединений в электронике // Технологии в электронной промышленности. — 2011. — № 50. — С. 66–70. [Lanin V., Petukhov I., Fedorov N. // Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti. 2011. N 50. P. 66]
5. Parrini L. New techniques for the design of advanced ultrasonic transducers for wire bonding // IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing. — 2003. — Vol. 26, N 1. — P. 37–45. — DOI: 10.1109/TEPM.2003.813001
6. Ланин В., Петухов И., Мордвинцев Д. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности. — 2010. — № 1. — С. 48–50. [Lanin V., Petukhov I., Mordvintsev D. // Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti. 2010. N 1. P. 48]
7. Теумин И. И. Простые стержневые колебательные системы // В кн.: Ультразвуковые колебательные системы. — Москва: МАШГИЗ, 1959. — С. 87–97. [Teumin I. I. Prostye stержnevye kolebatel'nye sistemy // V kn.: Ul'trazvukovye kolebatel'nye sistemy. — Moskow: MASHGIZ, 1959. P. 87]
8. McBrearty M., Kim L. H., Bilgutay N. M. Analysis of impedance loading in ultra-sonic transducer systems // Ultrasonic Symposium. — 1988. — P. 497–502.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 08.04 2013 г.

V. L. Lanin, I. B. Petukhov. **Method of calculating the parameters of ultrasonic super-high-frequency transducers**

*Keywords: piezoceramic radiator, waveguide, calculation of parameters, impedance, microwelding.*

The paper presents a method of calculating the parameters of half-wave package ultrasonic piezoelectric emitters and step waveguides, which has an error no more than 6–8%. This method, owing to its simplicity, usability and low cost, can be effectively used for the design of ultrasonic transducers of different designs in a wide range of frequencies.

Belarus, Minsk, BHUIR, KBTEM-CO GNPO «Planar».

В. Л. Ланин, І. Б. Петухов. **Методика розрахунку параметрів УЗ-перетворювачів підвищеної частоти.**

*Ключові слова: п'єзокерамічний випромінювач, хвилевід, розрахунок параметрів, імпеданс, мікрозварювання.*

Запропоновано методику розрахунку параметрів напівхвильових пакетних УЗ-п'єзовипромінювачів і ступінчатих хвилеводів, що має похибку не більше 6–8%. Методика може бути досить ефективно використана для проектування ультразвукових перетворювачів різних конструкцій в широкому діапазоні частот через свою простоту, зручність застосування та малі витрати.

Білорусь, м. Мінськ, БГУІР, КБТЕМ-СО ГНПО «Планар».

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Бард Дж., Коварик В. Дж.-мл. Архитектура сетей связи на базе программируемых радиосредств.— Москва: Техносфера, 2013.**

В книге рассматриваются проблемы и преимущества, связанные с развитием радиосистем в соответствии со спецификацией SCA (архитектуры программируемых средств связи). Она представляет собой всеобъемлющее практическое введение в построение SCA-совместимых систем и помогает читателю освоить исторические и концептуальные основы, заполнить пробел между целью, содержащейся в спецификации SCA, и практическим воплощением. Книга предназначена для программистов, конструкторов, профессиональных исследователей, производителей и операторов беспроводной связи, а также для студентов старших курсов и аспирантов, изучающих мобильную и беспроводную связь.

