

УДК 621.39:537.312.62

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИОГЕНИКИ  
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ***И.Н. Бондаренко, канд. техн. наук**Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба*

Рассмотрены предпосылки использования криогенных технологий в радиотехнических устройствах, определены основные направления применения низкотемпературных процессов и явлений для совершенствования радиосвязных систем, проведены оценки некоторых характеристик.

\* \* \*

Розглянуті передумови використання криогенних технологій у радіотехнічних пристроях, визначені основні напрямки застосування низькотемпературних процесів та явищ щодо удосконалення радіозв'язкових систем, проведені оцінки деяких характеристик.

\* \* \*

The backgrounds of usage of cryogenic technologies in radio engineering devices inspected, the basic directions of application of low-temperature processes and phenomenons for perfecting radiocommunication systems are determinated, the estimations of some parameters are exicuted.

*Постановка проблемы.* Непрерывное совершенствование технологии производства радиоматериалов и принципов конструирования аппаратуры привело к тому, что параметры значительного числа радиоустройств, предназначенных для работы в обычном интервале температур, приблизились к теоретически достижимому пределу. Это означает, что возможности, определяемые свойствами веществ, из которых изготовлены компоненты радиоаппаратуры, при комнатных температурах во многом уже исчерпаны.

В то же время развитие спутниковой, тропосферной, космической связи и глобального вещания в диапазоне СВЧ, радиолокации, радиоастрономии, радиоспектроскопии требует создания радиоустройств с такими характеристиками, получить которые сложившимися ранее методами крайне затруднительно или вообще невозможно.

*Цель статьи.* Новые перспективы открываются перед радиотехникой благодаря исследованию явлений, происходящих в веществах при глубоком охлаждении, и разработке криогенных систем, обеспечивающих заданные уровни низких температур.

При понижении температуры происходят не только изменения ряда свойств веществ, но и начинают сказываться такие эффекты, которые при

обычных температурах, близких к 300 К, проявляются весьма слабо. Явления, проявляющиеся в веществах при низких температурах, позволяют по-новому решить такие проблемы, стоящие перед радиотехникой, как:

- повышение чувствительности приемников диапазона дециметровых, сантиметровых, миллиметровых, субмиллиметровых и световых волн;
- создание эффективных когерентных генераторов и гетеродинов непрерывного излучения коротковолновой части радиодиапазона и световых волн;
- создание высокочастотных малогабаритных резонаторов и малогабаритных многорезонаторных устройств с к. п. д., близким к единице.

Однако, несмотря на столь заманчивые перспективы, охлаждаемые радиоустройства, и тем более многофункциональные охлаждаемые бортовые и наземные системы, встречаются редко.

Одной из причин этого является потребность в эффективном охлаждении.

*Анализ известных достижений.* Для охлаждения радиоэлектронных устройств до низких температур (ниже 100° К) в настоящее время применяют в основном два метода.

Первый, наиболее простой – применение крио-

генных жидкостей или твердых хладагентов, получаемых при охлаждении газов. Температуры кипения и плавления некоторых веществ при атмосферном давлении приведены в табл. 1. Охлаждаемое устройство при этом помещается в специальный теплоизолированный сосуд – криостат, в который заправляется соответствующий хладагент. Достоинства: эффективность; надежность и стабильность работы; отсутствие затрат энергии на охлаждение; отсутствие дополнительных механических помех работе радиоэлектронного устройства; относительная простота устройства и обслуживания. Недостатки: необходимость регулярного пополнения запаса хладагента; ограниченное время хранения хладагента, непрерывно испаряющегося от притока тепла из окружающей среды; в ряде случаев ограниченная свобода выбора положения охлаждаемого узла в пространстве; высокая стоимость и взрывоопасность некоторых хладагентов.

Таблица 1

Температуры кипения и плавления некоторых веществ при атмосферном давлении

Газ	Темп. кип., К	Темп. плав., К
Кислород (O <sub>2</sub> )	90,19	54,40
Азот (N <sub>2</sub> )	77,34	63,15
Аргон (Ar)	87,29	83,85
Фтор (F <sub>2</sub> )	85,24	55,2
Неон (Ne)	27,1	24,57
Водород (H <sub>2</sub> )	20,39	13,96
Гелий (He)	4,216	–

Второй метод – применение специальных холодильных устройств, непосредственно связанных с радиоэлектронным устройством и являющихся его составной частью. Метод обеспечивает автономность в течение длительного времени и в любом положении охлаждаемого узла в пространстве.

Недостатки: затраты энергии для работы системы охлаждения; возможность возникновения вибраций от движущихся частей холодильной машины; сложность создания компактной, легкой машины,

эффективно работающей при низкой температуре; высокая стоимость машины.

За последние годы достигнуты существенные успехи в разработке малогабаритных холодильных машин, их дальнейшее усовершенствование должно привести к частичному или полному устранению указанных недостатков. Учитывая достоинства и недостатки каждого метода, выбирают наилучшую систему охлаждения в зависимости от конкретных требований к радиоэлектронному устройству.

Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры в космосе обеспечивается без значительных энергетических затрат благодаря беспрепятственному излучению тепла в космическое пространство.

Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры или, по крайней мере, отдельных радиоэлементов, возможно также с помощью термоэлектрических охладителей, основанных на эффекте Пельтье. Однако, предельный уровень температур, достигаемый с их помощью, не превосходит 150° К.

Электрическое сопротивление большинства чистых металлов при обычных и умеренно низких температурах приблизительно пропорционально абсолютной температуре и уменьшается с ее понижением. Возрастающая последовательность удельных сопротивлений при комнатных температурах следующая: серебро, медь, алюминий, цинк. При низких температурах эта последовательность такова – алюминий, медь, серебро, цинк. Наличие примеси даже в небольшом количестве ведет к существенному возрастанию сопротивления металлов при низких температурах. Поэтому температурная зависимость сопротивления сплавов совсем другая, чем у чистых металлов [1, 2].

Проблема снижения активного сопротивления проводников представляет значительный интерес для радиоэлектроники. В настоящее время определены два направления решения этого вопроса.

Первое: применение очень чистых металлов с минимальным электрическим сопротивлением при

охлаждения. Создание проводников из сверхчистых металлов, охлаждаемых до очень низких температур, позволяет получать удельные сопротивления порядка тысячных долей от величин при комнатных температурах.

Второе: использование сверхпроводников. Наиболее часто используемыми и технологичными сверхпроводниками в настоящее время являются Pb ( $T_{кр} \sim 7,19^\circ \text{K}$ ), Nb ( $T_{кр} \sim 9,25^\circ \text{K}$ ), Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_{кр} \sim 18^\circ \text{K}$ ), а также сплавы на основе соединений свинца-олово и ниобий-титан. Сверхпроводники с критическими температурами ниже  $25^\circ \text{K}$  еще называют низкотемпературными сверхпроводниками в отличие от так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе керамических соединений. Наиболее перспективными для создания практических устройств являются ВТСП на основе металлооксидных керамик типа  $\text{ABa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (система 1-2-3,  $T_{кр} = 90-95^\circ \text{K}$ ). Критическая температура незначительно зависит от металла А, в качестве которого может быть иттрий (Y) или любой из лантанидов. Таким же перспективным можно считать соединение  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$  (система 2-2-1-2,  $T_{кр} = 110-125^\circ \text{K}$ ) [3, 4].

Учитывая, что глубокое охлаждение в первую очередь ведет к снижению тепловых шумов и электрических потерь, необходимо выделить именно те элементы и узлы, параметры которых главным образом определяются этими факторами.

Наиболее очевидным представляется использование глубокого охлаждения для снижения шумовой температуры (или коэффициентов шума) входных элементов приемного тракта.

Известно, что

$$U_{ш}^2 = 4kTR\Delta f, \quad (1)$$

где  $U_{ш}$  – шумовое напряжение активного сопротивления, В;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура сопротивления, К;  $R$  – величина сопротивления, кОм;  $\Delta f$  – полоса частот, в пределах которой измеряется шумовое напряжение, кГц.

Видно, что тепловые шумы активного сопротивления пропорциональны его физической температуре, т.е. тепловые шумы активного сопротивления можно значительно уменьшить, охлаждая его до криогенных температур.

Радиоприемную систему можно рассматривать как систему соединенных между собой пассивных и активных звеньев. К пассивным звеньям относятся фидерная линия и элементы антенно-фидерного тракта (вентили, циркуляторы, направленные ответвители и др.) к активным – УВЧ, смеситель, УПЧ.

Источниками собственных шумов радиоприемного устройства являются все активные сопротивления (в том числе и сопротивление источника сигнала), контуры и электронные приборы. Шумы сопротивлений и контуров возникают из-за теплового движения электронов, шумы электронных приборов складываются из теплового шума и дробового шума, причиной которого являются флуктуации токов, протекающих через прибор.

Для оценки шумовой температуры приемника  $T_{пр}$  можно воспользоваться рассмотрением типовой структуры линейной части супергетеродинного приемника (аналогичный анализ выполняется для приемника, построенного по схеме прямого усиления).

Коэффициент шума супергетеродинного приемника при этом определяется соотношением [5]:

$$F_{пр} = F_{\phi} + (F_{прс} - 1)L_{\phi} + \frac{(F_{сч} - 1)L_{\phi}}{K_{прс}} + \frac{(F_{урч} - 1)}{K_{ах.уе}} + \frac{(F_2 - 1)}{K_{ах.уе}K_{урч}}, \quad (2)$$

где  $F_{\phi}$ ,  $F_{прс}$ ,  $F_{сч}$ ,  $F_{урч}$ ,  $F_2$  – коэффициенты шума фидера, преселектора, согласующего устройства, усилителя радиочастоты и части приемника, следующей за УРЧ, соответственно;  $L_{\phi}$  – потери в фидере;  $K_{прс}$  – коэффициент передачи преселектора;  $K_{ах.уе} = K_{прс}/L_{\phi}L_{сч}$ ;  $L_{сч}$  – потери в согласующем устройстве;  $K_{урч}$  – коэффициент усиления УРЧ.

Обычно первые три правых слагаемых рассматриваются вместе:

$$F_{\text{вх. ус}} = F_{\phi} + (F_{\text{нрс}} - 1)L_{\phi} + \frac{(F_{\text{св}} - 1)L_{\phi}}{K_{\text{нрс}}} \quad (3)$$

Для определения путей улучшения шумовых характеристик входных трактов проанализируем слагаемые, стоящие в правой части соотношения (3). Коэффициенты шума этих слагаемых равны:

$$F_{\phi} = 1 + \frac{T_{\phi}}{T_0}(L_{\phi} - 1), \quad F_{\text{нрс}} = 1 + \frac{T_{\text{нрс}}}{T_0}(L_{\text{нрс}} - 1), \quad (4)$$

$$F_{\text{св}} = 1 + \frac{T_{\text{св}}}{T_0}(L_{\text{св}} - 1)$$

Здесь  $T_{\phi}$ ,  $T_{\text{нрс}}$ ,  $T_{\text{св}}$  – шумовые температуры фидера, преселектора и согласующего устройства, соответственно;  $T_0$  – физическая температура (температура окружающей среды).

Шумовые температуры определяются соответственно:

$$T_{\phi} = T_0(1 - K_{\phi}); \quad T_{\text{нрс}} = T_0(1 - K_{\text{нрс}}); \quad T_{\text{св}} = T_0(1 - K_{\text{св}}), \quad (5)$$

где  $K_{\phi}$ ,  $K_{\text{св}}$  – коэффициенты передачи фидера и согласующего устройства.

Очевидно, основными путями уменьшения коэффициента шума являются: охлаждение элементов входного тракта и уменьшение потерь в этих элементах. Кроме того, могут быть использованы специальные схемы, исключая отдельные элементы, а также произведен выбор соответствующих режимов работы усилителей радиочастоты.

Наиболее эффективным является охлаждение отдельных элементов входного тракта или всего тракта в целом. Охлаждение позволяет существенно уменьшить вторые слагаемые, стоящие в правой части (4) за счет уменьшения множителя, равного отношению температур, а также уменьшению потерь в соответствующих элементах. Благодаря этому уменьшается результирующий коэффициент шума входного устройства (3), что в итоге ведет к росту чувствительности приемного устройства. Если, к тому же, использовать малошумящие УРЧ (см. табл.2, [2]) и охлаждаемые смесители, то увеличение чувствительности приемного тракта и приемника в целом может быть очень значительным.

ПУ – параметрический усилитель.

Таблица 2

Характеристики малошумящих УРЧ

Тип усилителя	Мазер	ПУ (4,2 К)	ПУ (77 К)	ПУ (290 К)
$\Delta f_{\text{раб}}$ , ГГц	1 - 40	0,3 - 35	0,3 - 35	0,3 - 35
$T_{\text{ш.урч}}$ , К	4 - 25	10 - 20	50 - 70	$\geq 100$ - 300
$K_{\text{ус}}$ , дБ	25 - 40	8 - 45	8 - 45	8 - 45

Избирательные свойства по входу приемника в основном определяются преселекторами, представляющими из себя различного рода фильтры (в диапазоне СВЧ - различные резонаторы), шумы которых имеют тепловое происхождение и определяются температурой окружающей среды и КПД резонатора. Температура шума фильтра  $T_{\text{ш.ф}}$ , состоящего из  $n$  резонаторов, определяется формулой [5]:

$$T_{\text{ш.ф}} = T_{\phi} \left[ 2 \sum_{r=1}^n \frac{Q_r}{Q_0} + C \left( 1 + 2 \sum_{r=1}^n \frac{Q_r}{Q_0} \right) \right], \quad (6)$$

где  $T_{\phi}$  – температура среды, окружающей фильтр;  $Q_0$  и  $Q_r$  – собственная и нагруженная добротности  $r$ -го резонатора соответственно;  $C$  – параметр усилителя, характеризующий его шумовые свойства.

При комнатной температуре даже при максимально высокой собственной добротности  $Q_0$  фильтра не удается получить низкую шумовую температуру  $T_{\text{ш.ф}}$ , т.к. даже при оптимальной конструкции резонатора увеличение его собственной добротности ограничивается конечной величиной активного сопротивления стенок резонатора.

Из (6) видно, что охлаждение позволяет снизить температуру шума фильтров, применяемых во входных устройствах. Это достигается уменьшением  $T_{\phi}$  и повышением  $Q_0$ . Действительно, при охлаждении резонаторов появляется возможность увеличения собственной добротности резонатора  $Q_0$  вследствие уменьшения удельного сопротивления материалов, используемых для формирования проводящих поверхностей колебательных систем.

Анализ свойств проводников и сверхпроводни-

ков в высокочастотных полях показывает, что поверхностное сопротивление  $R_n$ , ответственное за потери в резонаторе, для хорошо проводящих металлов при обычных температурах может быть вычислено из соотношения [6]

$$R_n = (\omega\mu_0/2\sigma_n)^{1/2}, \quad (7)$$

где:  $\omega$  – угловая частота;  $\sigma_n$  – проводимость металла на постоянном токе;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

На данной частоте поверхностное сопротивление может быть уменьшено только за счет увеличения проводимости  $\sigma$ , что достигается понижением температуры. Однако ограничения на рост проводимости в этом случае накладываются аномальным скин-эффектом. При достижении температуры, при которой длина свободного пробега  $l_0$  становится сравнимой с глубиной скин-слоя  $\sigma_n$ , дальнейшее понижение температуры ведет к тому, что  $R_n$  стремится к некоторому асимптотическому значению  $R_{n\infty}$ , величина которого определяется как [1]

$$R_{n\infty} = \left(\frac{1}{b}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{l_0}{\sigma_n}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\omega\mu_0}{2}\right)^{2/3}, \quad (8)$$

где  $b$  – коэффициент, связанный с характером отражения электронов от поверхности проводника и направлением их движения (обычно  $b = 7,3-10,3$ ).

Металлы классифицируют по минимально достижимому поверхностному сопротивлению в случае аномального скин-эффекта. Независимо от частоты меньшее сопротивление имеет тот металл, у которого меньше отношение  $l_0/\sigma_n$ . Минимальными значениями  $R_{n\infty}$ , которые достигаются при температурах  $\sim 10-20\text{ K}$ , обладают алюминий и медь.

Оценки, проведенные для добротности цилиндрических резонаторов, изготовленных из Al и Cu (вид колебаний  $H_{011}$ , частота 10 ГГц, высота резонатора равна его диаметру), дают следующее: при комнатной температуре  $\sim 4 \cdot 10^4$  для Al и  $\sim 3 \cdot 10^4$

для Cu, при  $R_n = R_{n\infty}$  соответственно  $\sim 1,67 \cdot 10^5$  и  $\sim 1,52 \cdot 10^5$ , а при температуре кипения жидкого азота  $\sim 8,2 \cdot 10^4$  и  $\sim 8 \cdot 10^4$ . Для частот ниже 10 ГГц эти величины будут соответственно выше, поскольку зависимость поверхностного сопротивления охлаждаемого проводника от частоты будет пропорциональна  $\sim f^2$ . Разумеется, такие значения могут быть достигнуты только при использовании высокочистых металлов и достаточно высоком уровне технологической обработки рабочих поверхностей (включая химическое и электрохимическое полирование).

Таким образом, даже при использовании нормальнопроводящих объемных резонаторов, охлаждаемых до температур кипения жидкого азота, можно получить высокие значения добротности.

К настоящему времени накоплен большой опыт в создании сверхпроводящих резонаторов СВЧ диапазона. На частоте  $\sim 10$  ГГц были получены значения поверхностного сопротивления  $R_c \sim 10^{-8} - 10^{-9}$  Ом, что соответствует добротности  $\sim 10^{10} - 10^{11}$  [1]. Значения величин  $R_c$  для различных сверхпроводников можно определить с помощью соотношения

$$R_c = R(\omega, T) + R_{ост}, \quad (9)$$

где  $R(\omega, T)$  – составляющая поверхностного сопротивления, которая зависит от температуры и частоты;  $R_{ост}$  – остаточное поверхностное сопротивление, природа которого до конца не выяснена, но в значительной степени зависит от совершенства сверхпроводящей рабочей поверхности, которое, в свою очередь определяется уровнем технологии.

Наиболее подходящими для изготовления резонаторов являются такие сверхпроводники, у которых температура сверхпроводящего перехода  $T_{кр}$  достаточно высока. В настоящее время для этих целей используются Pb, Nb и  $Nb_3Sn$ . Так, максимальные значения добротности  $\sim 10^{10} - 10^{11}$  были до-

стигнуты при температуре  $\sim 1,3$  К. При 4,2 К (температура кипения жидкого гелия при атмосферном давлении) эти величины соответственно  $\sim 2 \cdot 10^7$ ,  $\sim 3 \cdot 10^7$  и  $\sim 2 \cdot 10^9$  ( $f_p = 10$  ГГц).

Значения  $R_c$  для других частот (при  $t_{np} = T/T_{кр} \sim 0,3 - 0,8$ ) можно получить, умножая величину  $R_c$  при  $f = 10$  ГГц на  $(F/10)^2$ , где  $F$  – значение рабочей частоты в ГГц [1].

В настоящее время существуют также и охлаждаемые диэлектрические резонаторы, ни в чем не уступающие по своим характеристикам сверхпроводящим. Такие резонаторы изготавливаются из лейкосапфира и имеют собственную добротность при температуре жидкого азота  $\sim 10^7$  [7, 8].

Резонаторы, изготовленные из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) пока не способны конкурировать не только с резонаторами из низкотемпературных сверхпроводников и диэлектриков, но и даже с охлаждаемыми резонаторами из нормальных металлов, поскольку технология получения качественных ВТСП поверхностей большой площади (более 1-2 см<sup>2</sup>) не отработана. В то же время ВТСП весьма перспективны для создания планарных миниатюрных радиоэлектронных схем и микрополосковых структур, предназначенных для работы при температурах кипящего азота [4].

#### Выводы

Таким образом, из проведенного выше рассмотрения можно сделать вывод, что переход к низким температурам является безальтернативным для дальнейшего совершенствования радиоэлектронных приборов и устройств. В то же время существует значительное число факторов, препятствующих развитию этого направления. В первую очередь – это необходимость в использовании систем охлаждения, сложность, стоимость и энергопотребление которых могут свести на нет все преимущества, предоставляемые глубоким охлаждением. Следующим существенным фактором является невозможность в ряде

случаев использования при глубоком охлаждении серийно выпускаемых приборов и радиоэлементов, предназначенных для работы при обычных температурах, что, в свою очередь, ведет к необходимости разработки специальных радиоэлектронных приборов и устройств для работы при низких температурах и в условиях многочисленных термоциклов.

Разумеется, что в ходе развития физики низких температур и криогенной техники эти и многие другие факторы будут преодолены, но на данном этапе имеет смысл определить основные, возможные пути реализации преимуществ криоэлектронных приборов.

Есть два пути решения этой проблемы.

Первый путь связан с созданием интегральных криоэлектронных схем, которые представляли бы из себя единый криогенный модуль, выполняющий целый ряд функций, включающих обнаружение сигнала, его усиление, преобразование, предварительную обработку и другие.

Второй путь является как бы частью первого и определяется использованием отдельных устройств или элементов, охлаждение которых дает существенный выигрыш в улучшении параметров всей радиоэлектронной системы в целом. К нему можно также отнести направления исследований, связанных с созданием отдельных элементов (и активных в том числе), которые также позволили бы уменьшить габариты и энергопотребление, как самих устройств, так и их обеспечения.

Первое направление, хотя и совпадает с главным направлением развития современной радиоэлектроники, требует значительных материальных и интеллектуальных усилий, определяемых как спецификой криоэлектроники вообще, так и недоисследованностью многих физических явлений, проявляющихся и используемых при создании охлаждаемых (особенно сверхпроводящих) структур. Это научное направление является в настоящее время приоритетным для развитых стран, обладающих

высокими технологиями в области интегральной микроэлектроники и развитой производственной и научной инфраструктурой в направлениях, связанных с физикой низких температур и криогенной техникой.

Исходя из объективных предпосылок, второй путь более предпочтителен с точки зрения быстрой практической демонстрации возможностей криогеники.

С учетом проведенного краткого рассмотрения можно сформулировать основные направления возможного применения охлаждаемых устройств для улучшения систем связи.

Очевидно, что системы дальней космической и спутниковой связи вряд ли могут обойтись без использования элементов и узлов, работающих при глубоком охлаждении, поскольку только они смогут обеспечить необходимую при этом чувствительность приемных трактов. Естественно, что улучшение характеристик таких систем связи будет, в первую очередь, определяться улучшением параметров охлаждаемых элементов. По-видимому, то же самое можно сказать и про системы дальней тропосферной связи, поскольку в этом случае проблема повышения чувствительности приемных устройств также актуальна. Учитывая, что такие системы связи формируются, как правило, на основе стационарных станций с большими габаритами, надежным и значительным энергопотреблением, включение в их состав охлаждаемых устройств со своими системами охлаждения вряд ли приведет к существенному увеличению габаритов и энергопотребления.

Совершенно иной подход должен быть при рассмотрении возможностей охлаждаемых устройств в системах связи, использующих подвижные и бортовые станции с малыми габаритами и малым энергопотреблением, т.е. таких применение которых носит массовый характер в системах связи авиации. При этом основной акцент следует делать на разработку и использование охлаждаемых устройств с

малыми габаритами и малым энергопотреблением, которые в то же время могут обеспечить существенное улучшение основных характеристик связи. Такими устройствами могут быть миниатюрные и микроминиатюрные входные цепи и малощумящие усилители с малыми собственными потерями, охлаждаемые микрохолодильными машинами замкнутого цикла типа таких, которые используются для охлаждения приемников излучения в системах ночного видения и прицеливания.

#### Литература

1. Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Трубицын А.В. Охлаждаемые и сверхпроводящие резонансные системы. – К.: Наук. думка. 1976. – 272с.
2. Екимов В.Д. Низкие температуры в технике связи. – М.: Связь. 1975. – 80с.
3. Newman N., Lyons V.G. High-temperature superconducting microwave devices: fundamental issues in materials, physics and engineering (review) // Journal of Superconductivity. – 1993. – V.6, N 3. – P.119–160.
4. Sarker M.M., Flavell W.R. Review of application of high-temperature superconductors // Journal of Superconductivity. – 1998. – V.11, N 2. – P.209–214.
5. Перцов С.В., Шуцкой К.А. Входные цепи радиоприемников. – М.: Энергия. 1973. – 256с.
6. Рамо С., Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. Пер. с англ. Под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. – 568 с.
7. Брагинский В.Б. Митрофанов В.П., Панов В.И. Системы с малой диссипацией. – М. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 144 с.
8. Багдасаров Х.С. и др. Аномально малая диссипация электромагнитных волн в совершенных монокристаллах-диэлектриках // УФН. – 1985. – Т.145, № 1. – С.151–153.

Поступила в редакцию 30.09.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Алешин Г.В., Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков