

Д. т. н. В. М. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. А. В. ЗАДЕРЕЙКО,  
к. т. н. О. В. НИКОЛАЕНКО

Дата поступления в редакцию  
20.08 2003 г.

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: zadereyko@ukr.net

Оппонент к. т. н. В. Н. ТАРАКАНОВ  
("Супертел", г. С.-Петербург)

## МЕТОДИКА КОНСТРУКТОРСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕПРОВОЛОЧНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

*Методика носит общий характер и обеспечивает проектирование как традиционных непроволочных переменных резисторов, так и пленочных.*

В современной электронной аппаратуре непроволочные переменные резисторы (НПР) находят широкое применение для обеспечения заданных функциональных свойств отдельных фрагментов ее электронных схем [1, 2]. К этим свойствам, прежде всего, следует отнести зависимости

$$u_R = U_R(x), i_R = I_R(x), P_R = P_R(x), r_R = R_R(x), \quad (1)$$

где  $u_R, i_R, P_R, r_R$  — соответственно напряжение, ток, мощность и сопротивление НПР ( $R$ ), зависящие от  $x$  — величины перемещения подвижного контакта (рис. 1). Здесь  $U_{cx}$  и  $I_{cx}$  — известные значения напряжения и тока электронной схемы, а  $R_0$  — эквивалентное переходное сопротивление между схемой и НПР.

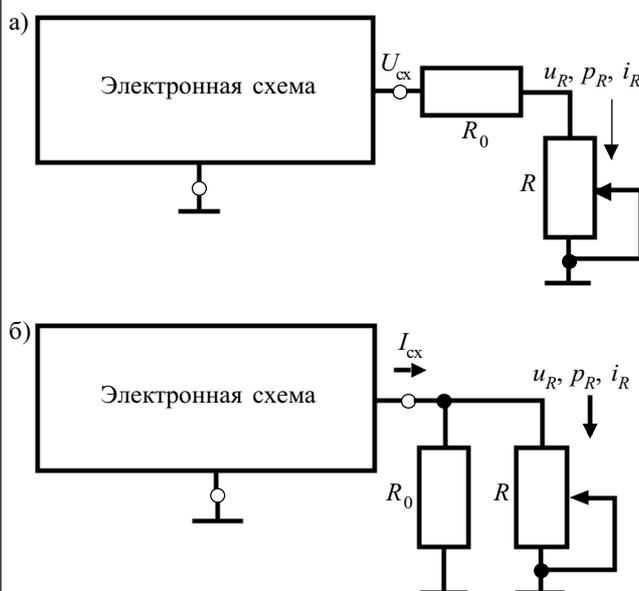


Рис. 1

В этой связи возникает задача разработки методики конструкторской реализации НПР, которая обеспечивает определение формы и свойств их резистивных элементов в зависимости от заданных функциональных характеристик (1), варианта исполнения и схемы применения (рис. 1).

Для разработки конструкторской реализации отмеченных НПР удобно воспользоваться зависимостью  $r_R = R_R(x)$  [2, с. 110], приведя к ней характеристики (1). Тогда для случая рис. 1, а получаем:

$$R_R(x) = U_{cx} / I_R(x) - R_0; \quad (2)$$

$$\text{— при заданном } U_R(x)$$

$$R_R(x) = R_0 U_R(x) / [U_{cx} - U_R(x)]; \quad (3)$$

$$\text{— при заданной } P_R(x)$$

$$R_R(x) = \left[ U_{cx} \pm \sqrt{U_{cx}^2 - 4R_0 P_R(x)} \right]^2 / 4P_R(x), \quad (4)$$

где  $U_{cx}^2 - 4R_0 P_{Rmax} \geq 0, P_R(x)_{max} = \max[P_R(x)], x \in [x_{min}, x_{max}]$ .

Выражения, аналогичные (2)—(4), можно получить и для случая рис. 1, б:

$$R_R(x) = R_0 I_{cx} / I_R(x) - R_0; \quad (5)$$

$$\text{— при заданном } U_R(x)$$

$$R_R(x) = U_R(x) / [I_{cx} - U_R(x) / R_0]; \quad (6)$$

$$\text{— при заданной } P_R(x)$$

$$R_R(x) = \left[ I_{cx} R_0 \pm \sqrt{I_{cx}^2 R_0^2 - 4R_0 P_R(x)} \right]^2 / 4P_R(x), \quad (7)$$

где  $I_{cx}^2 R_0 - 4P_{Rmax} \geq 0$ .

В общем случае зависимость  $r_R = R_R(x)$  (1) определяется из рис. 2, где  $\rho(x), S(x), \delta(x)$  — текущие удельное сопротивление, ширина и толщина резистивного элемента НПР, соответственно.

$$dR = \rho(x) dx / S(x) \delta(x). \quad (8)$$

Интегрируя выражение (8), получаем описание характеристики  $R_R(x)$  как

$$R_R(x) = \int_0^x \frac{\rho(\xi)}{S(\xi) \delta(\xi)} d\xi \quad (9)$$

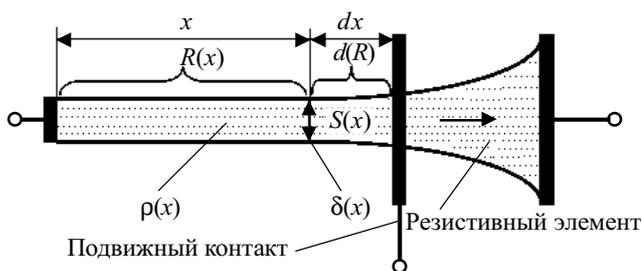


Рис. 2

или

$$R_R(x) = \int_0^x \frac{R_s(\xi)}{S(\xi)} d\xi, \quad (10)$$

где  $R_s(\xi) = \rho(\xi)/\delta(\xi)$  — удельное поверхностное сопротивление.

В соответствии с соотношениями (8)—(10) возможны различные варианты конструкторской реализации НПП на базе заданных характеристик  $R_R(x)$  (2)—(7). Наиболее простые из них включают по два фиксированных параметра. В частности, первый вариант имеет  $S = \text{const}$  и  $\delta = \text{const}$ , а заданная характеристика реализуется посредством зависимости

$$R_s(x) = S \frac{dR_R(x)}{dx}. \quad (11)$$

Второй вариант основывается на требованиях  $\delta = \text{const}$  и  $R_s = \text{const}$ , а характеристика реализуется за счет изменения ширины резистивного элемента НПП:

$$S(x) = R_s \frac{dR_R(x)}{dx} - S_0, \quad (12)$$

где  $S_0$  — начальная ширина резистивного элемента.

В третьем варианте фиксируются  $S = \text{const}$  и  $\rho = \text{const}$ , а зависимость  $R_R(x)$  реализуется посредством изменения толщины резистивного элемента НПП:

$$\delta(x) = \rho \left/ S \frac{dR_R(x)}{dx} - \delta_0 \right., \quad (13)$$

где  $\delta_0$  — начальная толщина резистивного элемента.

Кроме рассмотренных вариантов, возможны также ситуации с использованием двух и трех переменных:  $S = \text{const}$ ,  $\delta(x) = \text{var}$ ,  $\rho(x) = \text{var}$ ;  $\delta = \text{const}$ ,  $S(x) = \text{var}$ ,  $\rho(x) = \text{var}$ ;  $\rho = \text{const}$ ,  $S(x) = \text{var}$ ,  $\delta(x) = \text{var}$ ;  $S(x) = \text{var}$ ,  $\delta(x) = \text{var}$ ,  $\rho(x) = \text{var}$ .

Все эти ситуации, а также третий вариант (13), практического применения не находят в связи с определенными сложностями их реализации.

Дополнительно необходимо отметить, что часто для сокращения габаритов применяется круговая конструкция резистивного элемента НПП, т. е.  $r_R^* = R_R^*(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол перемещения подвижного контакта. Тогда, используя очевидные соотношения

$$x = \beta g \alpha; \quad \frac{dR_R(x)}{dx} = \frac{1}{\beta g} \frac{dR_R^*(\alpha)}{d\alpha} \quad (\beta = 2\pi/360), \quad (14)$$

где  $g$  — радиус резистивного элемента НПП, перепишем выражения (11), (12) следующим образом:

$$R_s^* = \frac{S}{\beta g} \frac{dR_R^*(\alpha)}{d\alpha}; \quad S^*(x) = R_s \beta g \left/ \frac{dR_R^*(\alpha)}{d\alpha} - S_0^* \right. \quad (15)$$

Возвращаясь к исходной задаче разработки конструкторской реализации НПП с заданными функциональными свойствами и учитывая формулы (2), (3), (4), (11), (12), (15), для случая рис. 1, а запишем:

— задано  $I_R(x)(I_R^*(\alpha))$ ; варианты конструкторской реализации:

$$R_s(x) = -\frac{S U_{\text{cx}}}{I_R^2(x)} \frac{dI_R(x)}{dx}; \quad R_s^*(\alpha) = -\frac{S U_{\text{cx}}}{\beta g [I_R^*(\alpha)]^2} \frac{dI_R^*(\alpha)}{d\alpha}; \quad (16)$$

$$S(x) = -R_s I_R^2(x) / U_{\text{cx}} \frac{dI_R(x)}{dx} - S_0; \quad (17)$$

$$S^*(\alpha) = -R_s \beta g [I_R^*(\alpha)]^2 / U_{\text{cx}} \frac{dI_R^*(\alpha)}{d\alpha} - S_0^*; \quad (17)$$

— задано  $U_R(x)(U_R^*(\alpha))$ ; варианты конструкторской реализации:

$$R_s(x) = S R_0 U_{\text{cx}} \frac{dU_R(x)}{dx} / [U_{\text{cx}} - U_R(x)]^2; \quad (18)$$

$$R_s^*(\alpha) = \frac{S R_0 U_{\text{cx}}}{\beta g} \frac{dU_R^*(\alpha)}{d\alpha} / [U_{\text{cx}} - U_R(\alpha)]^2; \quad (18)$$

$$S(x) = R_s [U_{\text{cx}} - U_R(x)]^2 / U_{\text{cx}} R_0 \frac{dU_R(x)}{dx} - S_0; \quad (19)$$

$$S^*(\alpha) = R_s \beta g [U_{\text{cx}} - U_R^*(\alpha)]^2 / \left[ U_{\text{cx}} R_0 \frac{dU_R^*(\alpha)}{d\alpha} \right] - S_0^*; \quad (19)$$

— задано  $P_R(x)(P_R^*(\alpha))$ ; варианты конструкторской реализации:

$$R_s(x) = -\frac{S U_{\text{cx}}}{2 P_R^2(x)} \frac{dP_R(x)}{dx} \left[ U_{\text{cx}} \pm \frac{U_{\text{cx}}^2 - 2 R_0 P_R(x)}{\sqrt{U_{\text{cx}}^2 - 4 R_0 P_R(x)}} \right]; \quad (20)$$

$$R_s^*(\alpha) = -\frac{S U_{\text{cx}}}{2 \beta g [P_R^*(\alpha)]^2} \frac{dP_R^*(\alpha)}{d\alpha} \left[ U_{\text{cx}} \pm \frac{U_{\text{cx}}^2 - 2 R_0 P_R^*(\alpha)}{\sqrt{U_{\text{cx}}^2 - 4 R_0 P_R^*(\alpha)}} \right]; \quad (20)$$

$$S(x) = -\frac{2 R_s P_R^2(x)}{U_{\text{cx}} \left[ U_{\text{cx}} \pm \frac{U_{\text{cx}}^2 - 2 R_0 P_R(x)}{\sqrt{U_{\text{cx}}^2 - 4 R_0 P_R(x)}} \right] \frac{dP_R(x)}{dx}} - S_0;$$

$$S^*(\alpha) = -2 R_s \beta g [P_R^*(\alpha)]^2 \times$$

$$\times \left\{ U_{\text{cx}} \left[ U_{\text{cx}} \pm \frac{U_{\text{cx}}^2 - 2 R_0 P_R^*(\alpha)}{\sqrt{U_{\text{cx}}^2 - 4 R_0 P_R^*(\alpha)}} \right] \frac{dP_R^*(\alpha)}{d\alpha} \right\}^{-1} - S_0^*. \quad (21)$$

Практическое значение формул (16)—(21) обуславливает потребность в описании основных вариантов конструкторской реализации и для случая рис. 1, б. Тогда, опираясь на выражения (5), (6), (7), (11), (12), (15), представим эти описания в виде **таблицы**.

Для иллюстрации полученных выше результатов рассмотрим пример конструкторской реализации НПП с заданными функциональными свойствами.

Пусть для случая рис. 1, а требуется разработать НПП с линейной зависимостью  $u_R = U_R(x) = kx$  и линейным перемещением подвижного контакта. Эта задача может быть решена на основе формул для  $R_s(x)$  (18) и  $S(x)$  (19).

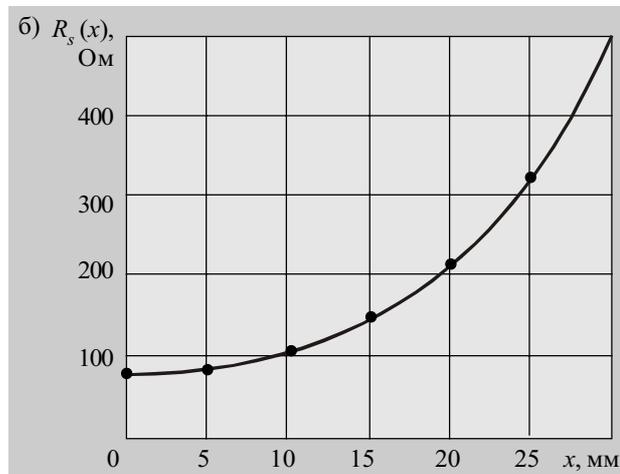
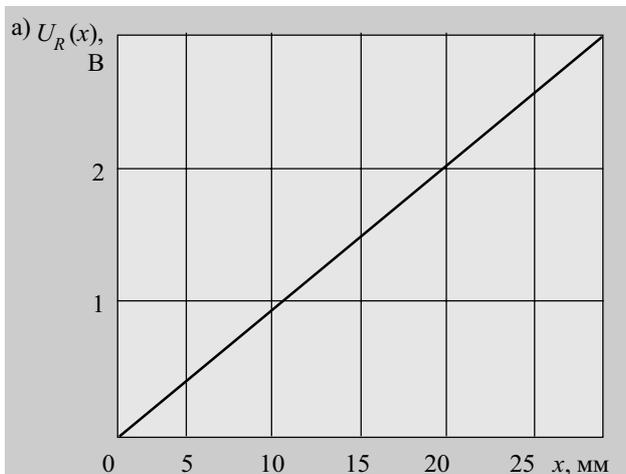
В первом случае имеем:  $S = 4$  мм;  $U_{\text{cx}} = 5$  В;  $R_0 = 1$  кОм;  $k = 0,1$  В/мм;  $x_{\text{min}} = 0$ ;  $x_{\text{max}} = 30$  мм.

Зависимости  $U_R(x)$  и  $R_s(x)$  приведены на **рис. 3, а** и **б**, соответственно. Вид резистивного элемента изображен на **рис. 4, а**.

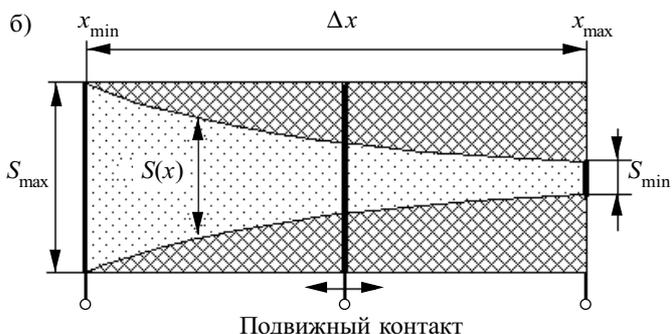
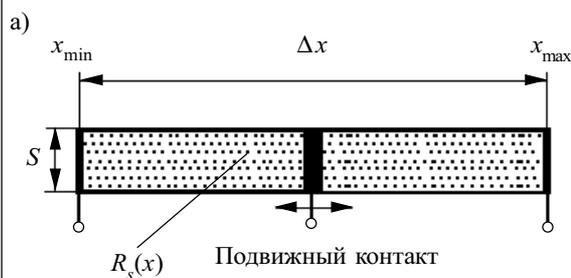
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ. КОНСТРУИРОВАНИЕ**

*Описание вариантов конструкторской реализации НПП для случая рис.1, б*

Заданная характеристика	Линейная реализация НПП	Круговая реализация НПП
$I_R(x)$ , $I_R^*(\alpha)$	$R_s(x) = -\frac{R_0 I_{cx} S}{I_R^2(x)} \frac{dI_R(x)}{dx}$	$R_s^*(\alpha) = -\frac{R_0 I_{cx} S}{\beta g [I_R^*(\alpha)]^2} \frac{dI_R^*(\alpha)}{d\alpha}$
$U_R(x)$ , $U_R^*(\alpha)$	$R_s(x) = SI_{cx} \frac{dU_R(x)}{dx} / [I_{cx} - U_R(x)/R_0]^2$	$R_s^*(\alpha) = \frac{SI_{cx}}{\beta g} \frac{dU_R^*(\alpha)}{d\alpha} / [I_{cx} - U_R^*(\alpha)/R_0]^2$
$P_R(x)$ , $P_R^*(\alpha)$	$R_s(x) = -\frac{SR_0 I_{cx}}{2P_R^2(x)} \frac{dP_R(x)}{dx} \times$ $\times \left[ I_{cx} R_0 \pm \frac{I_{cx}^2 R_0^2 - 2R_0 P_R(x)}{\sqrt{I_{cx}^2 R_0^2 - 4R_0 P_R(x)}} \right]$	$R_s^*(\alpha) = -\frac{SR_0 I_{cx}}{2\beta g [P_R^*(\alpha)]^2} \frac{dP_R^*(\alpha)}{d\alpha} \times$ $\times \left[ I_{cx} R_0 \pm \frac{I_{cx}^2 R_0^2 - 2R_0 P_R^*(\alpha)}{\sqrt{I_{cx}^2 R_0^2 - 4R_0 P_R^*(\alpha)}} \right]$
	$S(x) = -2R_s P_R^2(x) / \frac{dP_R(x)}{dx} R_0 I_{cx} \times$ $\times \left[ I_{cx} R_0 \pm \frac{I_{cx}^2 R_0^2 - 2R_0 P_R(x)}{\sqrt{I_{cx}^2 R_0^2 - 4R_0 P_R(x)}} \right] - S_0$	$S^*(\alpha) = -2R_s \beta g [P_R^*(\alpha)]^2 / \frac{dP_R^*(\alpha)}{d\alpha} \times$ $\times R_0 I_{cx} \left[ I_{cx} R_0 \pm \frac{I_{cx}^2 R_0^2 - 2R_0 P_R^*(\alpha)}{\sqrt{I_{cx}^2 R_0^2 - 4R_0 P_R^*(\alpha)}} \right] - S_0^*$



**Рис. 3**



**Рис. 4**

Во втором случае (выражение (19)), приняв  $S_0 = 0$  мм,  $R_s = 0,25$  кОм, получаем форму резистивного элемента НПР (рис. 4, б) ( $S_{\max} = S(x_{\min})$ ,  $S_{\min} = S(x_{\max})$ ,  $\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$ ). С помощью тех же формул (18) и (19) можно определить конструкцию кругового НПР для заданного примера.

Аналогичные результаты могут быть получены и для случая рис. 1, б с применением описаний конструкторской реализации НПР, приведенных в таблице.

Дополнительно отметим, что если исходные характеристики НПР (1) заданы в графическом или табличном виде, то удобно воспользоваться методом гладкой кривой [3] для их аппроксимации. Тогда во всех выражениях ((11)—(21), таблица) следует применять простые формулы для определения соответствующих функций и производных:

$$F_R(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad \frac{dF_R(x)}{dx} = \sum_{i=1}^n i a_i x^{i-1},$$

где  $F_R(x)$  — заданная характеристика НПР;  
 $a_i (i=0, n)$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома.

\*\*\*

Таким образом, предложенная методика конструкторской реализации непроволочных переменных резисторов позволяет определить форму и свойства резистивных элементов в зависимости от заданной характеристики резистора (1), варианта его исполнения и схемы применения. Эта методика носит общий характер и обеспечивает проектирование как НПР традиционного типа, так и резисторов в пленочном исполнении. При этом разработчику представляется выбор в реализации конструкции НПР с учетом особенностей электронной схемы.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Радиотехнические методы и устройства диагностики энергетических установок / Под ред. Ю. С. Ямпольского.— Одесса: ОЦНТИ, 2002.
2. Зайцев Ю. В. Переменные резисторы.— М.: Энергоиздат, 1984.
3. Николаенко В. М., Николаенко О. В. Аппроксимация характеристик макромоделей электронных устройств методом гладкой кривой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 1.— С. 13—15.

#### ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2004 ГОДУ

- 170 лет назад (1834) английский ученый Ч. Бэббидж предложил проект цифровой вычислительной машины с программным управлением.
- 140 лет назад (1864) в статье "Динамическая теория электромагнитного поля" английский физик Дж. Максвелл впервые дал определение электромагнитного поля и заложил основы его теории.
- 100 лет назад (1904) английский ученый и инженер Д. Флеминг изобрел двухэлектродную электронную лампу (диод).
- 90 лет назад (1914, август—сентябрь) русский физик Н. Д. Папалекси разработал первые в России образцы радиолампы (трехэлектродные лампы — катодные реле).
- 70 лет назад (1934, июль—август) проведены первые в мире испытания электровизора-радиолокатора по проекту изобретателя П. К. Ощепкова.
- 70 лет со времени открытия (1934) учеными-физиками С. И. Вавиловым и П. А. Черенковым нового вида оптического свечения, получившего название излучения Вавилова—Черенкова.
- 60 лет назад (1944) впервые в мире сотрудниками Московского телевизионного центра предложена система электронного телевидения с разверткой на 625 строк.
- 50 лет со времени создания (1954) советскими физиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и американским физиком Ч.-Х. Таунсом первых квантовых генераторов на пучке молекул аммиака. В 1964 году эти ученые были удостоены Нобелевской премии за фундаментальные исследования в области квантовой электроники.
- 50 лет назад (1954) под руководством конструктора Б. И. Рамеева создана малая ЭВМ первого поколения "Урал-1".
- 35 лет назад (1969) в США в рамках военного проекта ARPAnet были объединены в сеть четыре университетских узла, что положило начало Internet.

Из "Календаря юбилейных и памятных дат в области естественных наук и техники на 2004 год".— М.: Политехнический музей, 2003.

- 30 лет назад (1974) инженер Э. Робертс из фирмы MITS (США) построил первый персональный компьютер Altair 8080.
- 25 лет назад (1979) американские инженеры-программисты Д. Бриклин и Б. Фрэнкстон создали первую прикладную программу VisiCalc для персонального компьютера.
- 20 лет назад (1984) фирма IBM (США) выпустила персональный компьютер IBM PC/AT.
- 17 января — 75 лет со дня рождения (1929) Ф. В. Букинна, ученого в области радиоэлектроники и квантовой физики.
- Февраль — 275 лет назад (1729) английский физик С. Грей открыл явление электропроводности.
- 3 февраля — 100 лет со дня рождения А. А. Харкевича (1904—1965), ученого в области радиотехники, электроники, акустики и приборостроения.
- 9 февраля — 100 лет со дня рождения С. И. Катаева (1904—1991), ученого и изобретателя в области телевидения и радиоэлектроники, одного из пионеров отечественной телевизионной техники.
- 24 февраля — 200 лет со дня рождения Э. Х. Ленца (1804—1865), ученого-физика, создателя учения об электричестве и теоретических основ электротехники.
- 25 марта — 120 лет со дня рождения В. И. Коваленкова (1884—1960), ученого в области электросвязи, основоположника дальней телефонной связи.
- Май — 60 лет назад (1944) американский математик и конструктор Г. Айкен создал цифровую вычислительную машину на электронных реле MARK-1.
- 4 мая — 125 лет со дня рождения Л. И. Мандельштама (1879—1944), ученого-физика, одного из основателей отечественной научной школы по радиофизике.
- 31 мая — 100 лет со дня рождения В. И. Сифорова (1904—1993), ученого в области радиотехники, радиоэлектроники и теории передачи информации.