

and developed algorithm, graphics of generated and calculated power from turbine were developed. The average value of deviation between predicted and generated power is + (–) 6%. These results provide the evidence that the proposed method small wind turbine selection, which is based on wind speed data in the region and power curve of the selected wind turbine, is quite accurate and can be used as a guideline in wind turbine selection for private farm electrification.

Key words: selection algorithm, small wind turbine, decentralized power supply system of farms.

References

1. Knyazev V.V., Shevlov V.I. Osnovnoe napravlenie tekhnicheskogo i tekhnologicheskogo razvitiya raspredelitel'nogo elektrosetevogo kompleksa [The main directions of technical and technological development of distribution grid complex] / V.V. Knyazev, V.I. Sevlov // Scientific journal Bulletin VIESH. "Power supply, automation and electro mechanization of agriculture". M.: SRU VIESH, 2005. Issue1. Pp. 258-270.
2. Elistratov V.V. Energoberezhenie avtonomnikh potrebiteley energokompleksami na baze vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Energy-saving standalone power complex based on renewable energy sources] / V.V. Elistratov // Conference proceedings "Energy efficiency and agricultural engineering". Ruse, Bulgaria, 11-12 November, 2015. Printing House "Avangard print" LTD. 2015. Pp. 494-502.
3. Chindyaskin V.I., Grin'ko D.V. Issledovanie i analiz optimalnikh metodov i sposobov kompleksno elektrosnabzhenia selskikh potrebiteley [Research and analy-

sis of best methods of integrated power supply to agricultural consumers] // Izvestiya OSAU. 2013. Issue 2 (40).

4. Elistratov V.V. Vozobnovyaemaya energetika [Renewable energy] / V.V. Elistratov // 2nd Ed. ext. SPb.: Science, 2013. 308 p.

5. Fang LiN Luo, Hong Ye. Renewable energy systems. Taylor & Francis Group, LLC., PUBLICATION2013. 833 p.

6. Loughton M.A. Renewable energy sources. ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD, PUBLICATION, 2003. 160 p.

7. Tarify na elektroenergiyu. [Electricity tariffs] // Federal Tariff Service RF [electronic resource]. URL: http://www.fstrf.ru/tariffs/info_tarif/electro/actual_price/1.

8. BingWu, YongqiangLang, NavidZargari, SamirKouro. Power Conversion and Control of Wind Energy-Institute of Electrical and Electronics Engineers: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2011. 481 p.

Received on October 18, 2016

УДК 621.382.23

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: asa-finance@yandex.ru

ЗАГИНАЙЛОВ ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ, докт. техн. наук, профессор

E-mail: energo-viz@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ЗАМЕНЫ КОНДЕНСАТОРОВ В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Для управления сельскохозяйственными технологическими процессами в большинстве случаев используются регуляторы, процессоры и специализированные контроллеры, построенные на элементах промышленной электроники. Наряду с высокими требованиями к эксплуатационным показателям этих приборов важной потребительской характеристикой является их стоимость. Совершенствование технологии производства элементов электронных схем приводит к снижению их стоимости, однако это снижение происходит неравномерно. На сегодняшний день стоимость полупроводниковых приборов оказалась значительно ниже стоимости конденсаторов. Кроме того, габаритные размеры и масса традиционных кера-

мических, слюдяных или электролитических конденсаторов остаются значительными, а их долговечность оставляет желать лучшего. Поэтому необходим поиск способов замены конденсаторов. Проведенные исследования показали, что во многих случаях конденсаторы можно успешно заменить на полупроводники, в частности, на полупроводниковые диоды, стабилитроны и триоды. Эти элементы при определенных схемах включения образуют электрическую емкость, которой можно управлять. Приведены результаты испытаний использования полупроводниковых приборов в качестве конденсаторов и рассмотрены их основные характеристики. Предложены схемные решения для выполнения типовых задач, реализуемых электронными устройствами, с применением полупроводниковых конденсаторов. Определена сфера использования полупроводниковых приборов для реализации функций управляемых конденсаторов. Выявлены основные преимущества ресурсосберегающих приемов при проектировании электронных схем.

Ключевые слова: стоимость элементов электронных схем, электрическая емкость, замена конденсаторов, полупроводниковые диоды, управляемая емкость, электрическая схема.

Введение. Современное сельскохозяйственное производство невозможно представить без широкого использования различных электронных устройств. Электронная техника стала неотъемлемым компонентом роботизированного оборудования, измерительных приборов и средств автоматизации. В большинстве случаев электронная техника входит в состав готовых блоков, процессоров или специализированных вычислительных средств. При этом, несмотря на широкий ассортимент выпускаемого оборудования, задача снижения его стоимости его остается актуальной [1, 2].

Принято считать, что за последние десятилетия стоимость производства элементов электронных схем уменьшилась более чем в 300...700 раз [3]. Столь значительное удешевление произошло исключительно за счет широкого использования микросхем и совершенствования технологии их производства. Давно ушли в прошлое электронные приборы, которые изготавливались посредством соединения отдельных деталей: резисторов, триодов, конденсаторов и т.д. Но в то же время остаются элементы, стоимость производства которых не только не уменьшилась, но и, напротив, стала существенно выше [4, 5]. Речь идет не об абсолютной стоимости, а о соотношении снижения стоимостей.

Цель исследований – экспериментальная проверка возможности замены конденсаторов на их полупроводниковые аналоги, а также изучение их основных рабочих характеристик.

Материал и методы. Материалом исследований послужили современные полупроводниковые приборы (преимущественно диоды и стабилитроны). В работе были использованы методы теоретического и экспериментального исследования с применением индуктивного подхода к составлению схем включения полупроводниковых конденсаторов.

Результаты и обсуждение. Любой полупроводниковый диод имеет так называемый *p-n* переход, т.е. область на границе между полупроводниками с различными типами проводимости [6]. В полупроводнике типа *n* имеются носители отрицательных электрических зарядов (электроны), а в полупроводнике типа *p* – носители положительных за-

рядов («дырки»), т.е. места в кристаллической решетке, где существует недостаток электронов.

Если к диоду приложить внешнее напряжение положительным полюсом к полупроводнику с проводимостью типа *n*, а отрицательным полюсом – к полупроводнику с проводимостью типа *p*, то электроны и «дырки» под действием электрического поля как бы оттянутся в обе стороны от поверхности раздела, и там образуется область, обедненная носителями зарядов [7]. Полупроводниковый диод в таком состоянии можно уподобить конденсатору, обкладками которого служат зоны с проводимостями *n* и *p* типов, а диэлектриком – область их раздела. Емкость такого конденсатора будет зависеть от величины запирающего напряжения: чем больше это напряжение, тем сильнее «оттягиваются» заряды от перехода и тем меньше оказывается емкость такого конденсатора [8].

На рисунке 1 показана схема включения диода в колебательном контуре. Диод *VD1* соединен с остальными элементами через конденсатор *C1*, который необходим для предотвращения шунтирования по постоянному току индуктивностью *L1*. Емкость диода изменяется с помощью потенциометра *R2*. Для исключения шунтирования колебательного контура потенциометром *R2* в цепь питания включен высокоомный резистор развязки *R1*. Поскольку запертый диод характеризуется большим сопротивлением, на него подается значительная часть управляющего напряжения $U_{упр}$.

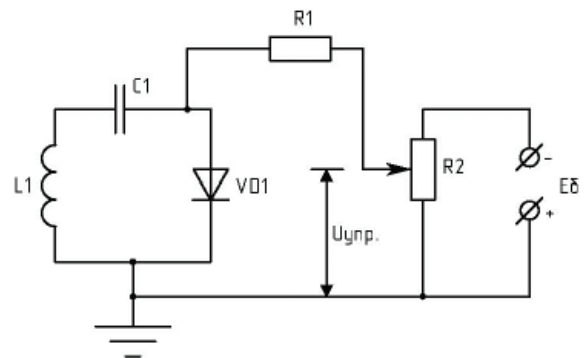


Рис. 1. Схема включения диода для настройки колебательного контура

Емкость диода должна изменяться в пределах, нужных для перекрытия диапазона. Изменение емкости в зависимости от величины приложенного управляющего напряжения у разных образцов диодов должно быть одинаковым. В противном случае было бы проблематичным осуществить сопряжение настройки нескольких колебательных контуров [9].

При исследовании *p-n* переходов диодов и триодов оказалось, что абсолютная величина емкости у разных переходов различна. Например, емкости селеновых шайб достигают 0,25 мкФ, а емкость высокочастотных диффузионных и поверхностно-барьерных переходов составляет единицы пикоФарад.

Как показал эксперимент, наиболее пригодными для настройки колебательных контуров оказались кремниевые переходы [10]. Из выпускаемых в настоящее время кремниевых элементов наиболее подходящими явились стабилитроны ВZХ79-С10 – ВZХ79-С13, предназначенные для стабилизации постоянного напряжения в электрических цепях. Как конденсаторы, они обладают хорошими электрическими характеристиками. Поэтому в дальнейшем речь пойдет, в основном, о них. Как известно, кремниевые стабилитроны

имеют *p-n*-переход сплавного типа. Емкость такого перехода выражается формулой:

$$C = \frac{K}{\sqrt{U_0 + E_{упр}}}, \quad (1)$$

где C – емкость, пФ; U_0 – контактная разность потенциалов, В; $E_{упр}$ – внешнее управляющее напряжение, приложенное к переходу, В; K – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров и физических свойств перехода.

В результате исследований были измерены емкости большого количества стабилитронов и рассмотрена их зависимость от приложенного постоянного напряжения (табл. 1). Оказалось, что максимальная емкость полупроводниковых переходов на частоте 1 МГц, измеренная в отсутствие внешнего постоянного напряжения, для отдельных экземпляров колеблется в пределах от 50 пФ до 800 пФ. Изменение емкости перехода при изменении управляющего постоянного напряжения удобно характеризовать параметрами K и U_0 . Если известны параметры K и U_0 , то для каждого значения постоянного напряжения, приложенного к переходу, по формуле 1 можно найти его емкость.

Таблица 1

Зависимость емкости перехода диода от постоянного управляющего напряжения

Диод	$E_{упр}, В$							
	0	0,1	0,3	0,6	1,5	5,0	15,0	40,0
1N34	3,40	1,60	1,10	0,80	0,60	0,58	0,55	0,45
1N302	1,45	0,60	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25	0,21
1N443	80,00	52,00	42,00	35,00	26,00	10,00	7,00	5,00
FR603	78,00	75,00	72,00	64,00	56,00	42,00	27,00	10,00
1N488	–	350,00	300,00	280,00	250,00	150,00	–	–

Измерения показали, что емкость стабилитронов имеет ярко выраженные области группирования, в пределах которых они отличаются менее чем на 10%. Для примера в таблице 2 приведены результаты статистической обработки измерений емкости диодов Z1A11, а на рисунке 2 построены графики зависимости среднего значения емкости каждой из групп от приложенного управляющего напряжения.

Перекрытие по емкости у полупроводниковых стабилитронов (k_c) на частоте 1 МГц может колебаться в пределах 2,5...3,2 при изменении управляющего напряжения от 0,5 В до максимально возможного.

Аналогичные зависимости для полупроводниковых триодов представлены в таблице 2.

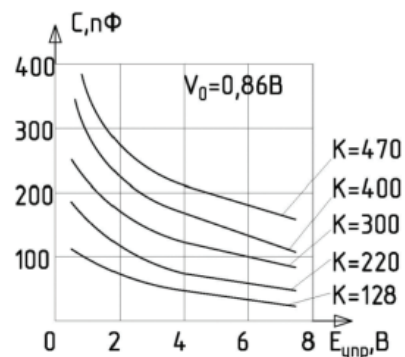


Рис. 2. Усредненные зависимости емкости перехода от приложенного постоянного напряжения диодов Z1A11

Зависимость емкости перехода некоторых полупроводниковых триодов от постоянного управляющего напряжения

Тип триода	Переход	$E_{упр}, В$						
		0	0,1	0,3	0,6	1,5	5,0	10,0
2N104	К – Б	–	80,0	64,0	52,0	40,0	26,0	22,0
	Б – Э	–	80,0	65,0	52,0	36,0	22,0	16,0
2N536	К – Б	150,0	138,0	122,0	104,0	80,0	45,0	30,0
	Э – Б	68,6	62,0	55,0	46,0	35,0	15,0	
2N2089	К – Б	22,5	14,0	11,0	9,0	7,5	5,0	4,5
	Э – Б	72,0	66,5	59,0	54,0	49,0	–	–
2N602	К – Б	10,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
	Э – Б	5,5	4,0	3,5	3,2	2,4	2,0	–
2N603	К – Б	26,0	24,0	20,0	17,0	13,0	8,0	6,5
	Э – Б	38,0	32,0	26,0	21,0	16,0	10,0	7,0
2N1743	К – Б	10,0	7,5	5,8	5,4	4,5	4,0	3,2
	Э – Б	10,0	9,8	8,8	–	–	–	–

На границе соприкосновения двух полупроводниковых слоев образуется некоторый перепад потенциалов, определяющий контактную разность. Если внешнее постоянное напряжение, приложенное к полупроводниковому конденсатору, меняется от $E_{мин}$, до $E_{макс}$, то перекрытие по емкости составит величину

$$k_c = \sqrt{\frac{U_0 + E_{макс}}{U_0 + E_{мин}}} \quad (2)$$

Из формулы 2 следует, что при изменении постоянного напряжения перекрытие по емкости будет тем меньше, чем больше контактная разность потенциалов U_0 .

В различных партиях полупроводниковых стабилитронов контактная разность потенциалов может меняться в пределах от 0,4 до 1,1 В. Однако в одной партии элементов изменение контактной разности потенциалов не превышает 10% от среднего значения. Контактная разность потенциалов полупроводникового перехода является дополнительным постоянным напряжением, которое необходимо учитывать при расчете условий открытия полупроводников.

При проектировании электронных схем определенное значение будут иметь неуправляемые токи утечки, $I_{ко}$, возникающие в $p-n$ -переходе при подключении внешнего напряжения. Экспериментально установлено, что с увеличением постоянного напряжения сопротивление утечки увеличивается, однако в области, близкой к напряжению стабилизации, сопротивление вновь начинает падать. Графики, иллюстрирующие изменение сопротивления утечки от управляющего напряжения

для двух экземпляров стабилитронов Z1A11, приведены на рисунке 3.

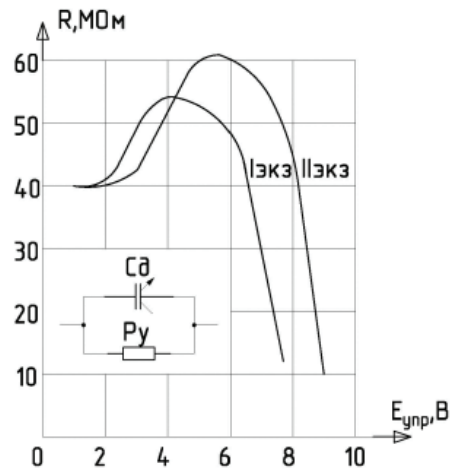


Рис. 3. Эквивалентная схема полупроводникового конденсатора и зависимость сопротивления утечки его от управляющего напряжения (для двух экземпляров диода Z1A11)

Важным показателем качества конденсатора является его добротность (Q), которая всегда обратно пропорциональна величине активных потерь. Величина потерь в конденсаторе, а следовательно, и его добротность, зависят от частоты, на которой работает конденсатор, от запирающего напряжения, а также от температуры. Зависимость добротности кремниевого конденсатора от частоты, построенная по экспериментальным данным, приведена на рисунке 4.

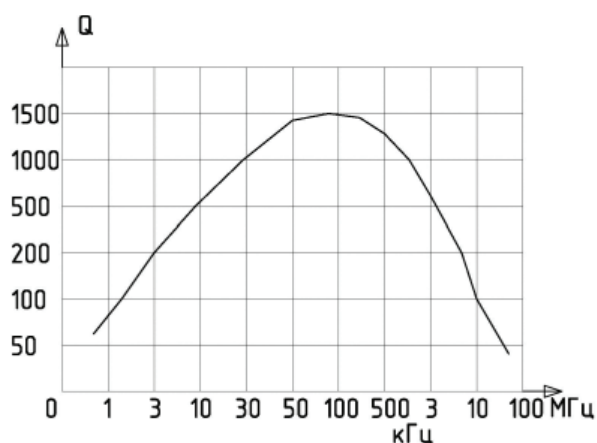


Рис. 4. Зависимость добротности кремниевого полупроводникового конденсатора от частоты

Установлено, что в среднем для кремниевых стабилитронов при управляющем напряжении 4 В на частоте 1 МГц добротность равна 250...500. На более высоких частотах она падает, достигая на частоте 30 МГц значения 5...15. Увеличение управляющего напряжения приводит к росту добротности кремниевых конденсаторов. Зависимость добротности кремниевых стабилитронов от управляющего напряжения имеет несколько иной вид. Наличие максимума при увеличении управляющего напряжения объясняется увеличением потерь в области, близкой к напряжению пробоя.

В качестве примера практического использования полупроводниковых диодов вместо конденсаторов можно привести схему многоконтурного усилителя промежуточной частоты с регулируемой полосой пропускания (рис. 5). В этом устройстве полоса пропускания регулируется в пределах от 4 до 9 кГц. При этом емкость диодов изменяется в пределах от 4 до 8 пФ [11].

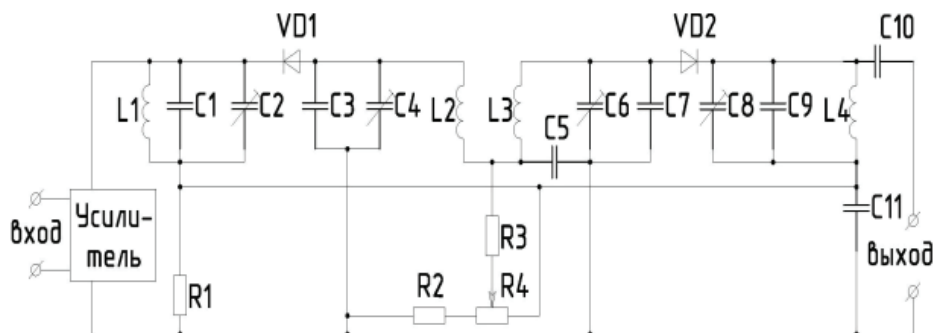


Рис. 5. Схема многоконтурного усилителя промежуточной частоты с регулируемой полосой пропускания

В схеме усилителя применена переменная емкостная связь между контурами, выполненная на полупроводниковых диодах *VD1* и *VD2* типа 1N606A. Управляющее напряжение подается на плоскостные диоды с потенциометра *R4* через резистор *R3*. Величина сопротивления резистора *R3* выбрана такой, чтобы он не шунтировал контуры фильтра. Добротность всех контуров остается одинаковой и составляет величину порядка 110.

Выводы

Относительно дорогие конденсаторы в схемах управления можно заменять на более дешевые полупроводниковые диоды. При этом величина емкости, образованной в *p-n*-переходе, в ряде случаев не уступает емкости заменяемых конденсаторов и одновременно является управляемой в достаточной широкой пределах. Параметры диодов с управляемой емкостью позволяют применять их во многих случаях для настройки колебательных контуров на высоких частотах. Такие диоды могут применяться, например, для настройки входных цепей радиоаппаратуры, а также для настройки контуров

маломощных гетеродинов в электронных устройствах на полупроводниковых триодах. Эти схемы могут найти применение в системах дистанционного контроля управляемых параметров: например, в системах коммерческого учета электроэнергии, воды и других ресурсов.

Библиографический список

1. Иванов Ю.Г., Сидоренко М.С., Голубятников В.А. Исследование микропроцессорной системы дистанционного мониторинга сигнала коров // Вестник ФГБОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2015. № 2 (66). С. 7-13.
2. Иванов Ю.Г. Радиотехническая система управления адресным обслуживанием животных на молочной ферме // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2005. № 1. С. 151-155.
3. Горелик С.С., Дашевский М.О. Материаловедение полупроводников и диэлектриков: Учебник. М.: Изд-во МИСиС, 2003. 483 с.
4. Лебедевский М.С., Помухин Н.П., Федотов А.И. Автоматизация производства конденсаторов. М.: Энергия, 1976. 109 с.

5. Михайлов И.В., Пропошин А.И. Конденсаторы. М.–Л.: Энергия, 1965. 32 с.
6. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем: Учебник. 4-е изд. М.: Энергия, 1977. 671 с.
7. Шалимова К.В. Физика полупроводников: Учебник. 4-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2010. 400 с.
8. Кардона П. Основы физики полупроводников / Пер. с англ. И.И. Решиной; Под ред. Б.П. Захарчени. 3-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 560 с.
9. Андреев С.А. Ресурсосберегающие схемные решения при проектировании электронных устройств // Перспективы развития технических наук: Сб. науч. трудов по итогам Международной научно-практической конференции (11 июня 2016 г.). Челябинск, 2016. № 3. С. 53-63.

10. Андреев С.А., Илясов Д.С. Исследование характеристик управляемых полупроводниковых конденсаторов // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем: Сб. науч. трудов по итогам III Международной научно-практической конференции / Инновационный Центр развития образования и науки. Казань, 2016. № 3. С. 119-127.

11. Андреев С.А., Илясов Д.С. Управляемые полосовые фильтры на полупроводниковых диодах // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сб. науч. трудов VI Международной научно-практической конференции (2-3 июня 2016 г.). Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 26-30.

Статья поступила 08.10.2016 г.

USING SEMICONDUCTOR ELEMENTS FOR CAPACITORS REPLACEMENT IN THE CIRCUIT OF ELECTRONIC DEVICES

SERGEY A. ANDREEV, *PhD Tech Sc, Associate Professor*

E-mail: asa-finance@yandex.ru

VLADIMIR I. ZAGINAILOV, *DSc, Professor*

E-mail: energo-viz@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

To manage the agricultural process used in most cases regulators, processors and specialized controllers built on elements industrial electronics. Along with high performance requirements of these devices, their cost is an important consumer feature. Improving the technology of production of electronic circuit elements results in a reduction of their cost, but this decline is not uniform. Nowadays the cost of semiconductor devices was significantly lower than the cost of capacitors. In addition, the dimensions and weight of traditional ceramic, mica or electrolytic capacitors are significant, but their durability leaves much to be desired. These circumstances determine the need to find a replacement of capacitors. Studies have shown that in many cases the capacitors can be quite successfully replaced by semiconductors, in particular, to semiconductor diodes, zener diodes and transistors. These elements enable under certain schemes form the capacitance, which, moreover, is manageable. The results of tests using semiconductor devices as capacitors are given and considered their main characteristics. Circuit solutions are proposed for common tasks implemented electronic devices using semiconductor capacitors. The scope of using semiconductor devices for implementing the functions controlled capacitors is determined. The basic advantages of resource practices are found in the design of electronic circuits.

Key words: cost of electronic circuits elements, electric capacity, replacement capacitors, semiconductor diodes, controlled capacitance, electric circuitry.

Reference

1. Ivanov Yu.G., Sidorenko M.S., Golubyatnikov V.A. Issledovanie mikroprotssornoy sistemy distantsionnogo monitoringa signala korov [Research microprocessor system for remote monitoring of cows

signal] // Vestnik FSEI HPE "MSAU named after V.P. Goryachkin". 2015. Issue 2 (66). Pp. 7-13.

2. Ivanov Yu.G. Radiotekhnicheskaya Sistema upravleniya adresnym obsluzhivaniem zhivotnykh na molochnoy ferme [The electronic control system in address service of animals on a dairy farm] // Izvestiya

Timiryazev Agricultural Academy. 2005. Issue 1. Pp. 151-155.

3. Gorelik S.S., Dashevskiy M.O. Materialovedenie poluprovodnikov i dielektrikov [Materials of semiconductors and dielectrics]: textbook for high schools. M.: Publishing house MISA, 2003. 483 p.

4. Lebedovsky M.S., Pomukhin N.P., Fedotov A.I. Avtomatizatsiya proizvodstva kondensatorov [Automate production of capacitors]. M.: Energy, 1976. 109 p.

5. Mikhailov I.V., Proposhin A.I. Kondensatory [Capacitors]. M.–L.: Energy, 1965. 32 p.

6. Stepanenko I.P. Osnovy teorii transistorov i transistornykh skhem [Basic theory of transistors and transistor circuits]. Textbook, 4th ed. M.: Energy, 1977. 671 p.

7. Shalimova K.V. Fizika poluprovodnikov [Semiconductor physics]: Textbook, 4th ed. SPb.: "Lan" Publishing House, 2010. 400 p.

8. Cardona P. Osnovy fiziki poluprovodnikov [Fundamentals of Semiconductor Physics] / transl. from eng. By I.I. Reshina. Ed. B.P. Zakharcheni. M.: FIZMATLIT, 2002. 560 p.

9. Andreev S.A. Resursosberegayushchie skhemye resheniya pri proektirovani elektronnykh us-

troistv [Resource schematics for the design of electronic devices] // Prospects for the development of technical sciences: Collection of scientific papers on the results of the International scientific-practical conference (11 June 2016). Chelyabinsk. 2016. Issue 3. Pp. 53-63.

10. Andreev S.A., Ilyasov D.S. Issledovanie kharakteristik upravlyaemykh poluprovodnikovykh kondensatorov [Research performance-driven semiconductor capacitors] // Questions of technical sciences: new approaches in solving the actual problems / Collection of scientific papers on the results of the III International Scientific and Practical Conference / Innovation Center for Development of Education and Science. Kazan, 2016. Issue 3. Pp. 119-127.

11. Andreev S.A., Ilyasov D.S. Upravlyaemye polosovye filtry na poluprovodnikovykh diodakh [Managed bandpass filters on semiconductor diodes] // Innovation, quality and service in engineering and technology. Collection of scientific works of VI International scientific-practical conference (2-3 June 2016). Kursk: South-West State University, Press "University Book", 2016. Pp. 26-30.

Received on October 8, 2016