

А. А. Акимов, Н. В. Горячев, Д. В. Дерябин, А. А. Прошин, А. А. Рыжов

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

A. A. Akimov, N. V. Goryachev, D. V. Deryabin, A. A. Proshin, A. A. Ryzov

APPLICATION PROBLEMS OF VACUUM ELECTRONIC DEVICES

Аннотация. Данная статья представляет из себя энциклопедическую заметку, несущую в себе информацию об электронных вакуумных приборах. Материал разделен на четыре смысловых раздела. В первом, введении, рассказано об устройстве электронных вакуумных приборов в общем виде, описаны основные элементы, из которых состоит типовой прибор, и вкратце охвачены вопросы производства и эксплуатации. Второй раздел, классификация, дает нам понять, что вакуумных электронных приборов существует великое множество, большинство из которых приведены в разделе в виде списка, а на некоторых авторы решили заострить особое внимание. В частности, внимания удостоились электронные лампы, а также их подвиды: диод, триод, тетрод, пентод. Приведены их условные графические обозначения и формулы, дающие представление об их основных параметрах, таких как крутизна и внутреннее сопротивление. Третий раздел сосредоточен на особо востребованной в наши дни разновидности электронных вакуумных приборов, вакуумном реле. Охвачен вопрос их применения, на примерах показаны области, в которых устройства нашли себе место. Дан обзор производящих компаний и списка их продукции. В четвертом разделе, заключении, сделаны выводы по всему сказанному в данной статье.

Ключевые слова: вакуум, электрон, прибор, электрод, анод, катод, лампа.

Abstract. This article is an encyclopedic note that carries information about electronic vacuum devices. The material is divided into four semantic sections. In the first, introduction, it is told about the device of electronic vacuum devices in a general form, describes the main elements that make up a typical device, and briefly covered issues of production and operation. The second section, the classification, gives us to understand that there are a great many vacuum electronic devices, most of which are listed in the section as a list, and for some the authors decided to focus on special attention. In particular, attention was paid to electron tubes, as well as their subspecies: diode, triode, tetrode, pentode. Given their conventional graphics, and formulas that give an idea of their basic parameters, such as slope and internal resistance. The third section focuses on the currently popular variety of electronic vacuum devices, vacuum relays. The question of their application is covered, examples show areas in which devices have found a place for themselves. A review of manufacturing companies and their product list is given. In the fourth section, the conclusion, conclusions are drawn on everything said in this article.

Keywords: vacuum, electron, device, electrode, anode, cathode, lamp.

Введение

Вакуумные электронные приборы являются разновидностью электровacuумных приборов [1]. Основным их отличием является движение электронов в безвоздушной среде (вакууме). Их конструкция достаточно проста. Такие приборы представляют из себя герметично запааянные сосуды из самых разных материалов (стекло, металл, керамика), из которых, насколько это возможно, удаляется весь воздух, тем самым создавая искомый вакуум. Внутри сосуда располагаются электроды, имеющие связь с внешними контактами прибора путем использования стеклянных или керамических изоляторов. В процессе откачки воздуха из сосуда его внутренняя поверхность и находящиеся там компоненты прогреваются в целях максимально полного удаления абсорбированных газов, так как экспериментально проверено и подтверждено, что чем больше газов останется внутри, тем меньший срок службы будет у вакуумного прибора.

Выше было сказано об электродах, находящихся внутри сосуда, каждый вакуумный прибор несет их в себе. Количество электродов может варьироваться от прибора к прибору, однако основных электродов всегда два. Одним из них является катод с прямым или косвенным нагревом (однако встречаются и холодные, без нагрева), часто покрываемый специальным составом для лучшей эмис-

сии электронов к рабочей зоне, а также анод, второй электрод, принимающий отработанные электроны. Нетрудно догадаться, что рабочим веществом всех приборов подобного типа является поток электронов, летящих в вакууме от катода к аноду и вступающих на своем пути во взаимодействие с простыми и сложными электродами.

Классификация

Вакуумные электронные приборы подразделяются на несколько основных классов:

1. Электронные лампы (диоды, триоды, тетроды, пентоды).
2. Вакуумные приборы СВЧ (магнетроны, клистроны, лампы бегущей и обратной волн) [2].
3. Электронно-лучевые приборы (электронно-лучевые трубки, кинескопы).
4. Ускорители заряженных частиц (рентгеновские трубки).
5. Фотоэлектронные приборы (фотоэлектронный умножитель, вакуумные фотоэлементы, электронно-оптический преобразователь).

6. Вакуумные индикаторы (магический глаз, вакуумно-люминесцентные индикаторы).

Остановимся на некоторых из них поподробнее.

Электронные лампы. Данный тип представляет из себя электровакуумный прибор, обладающий термоэлектронным катодом и электростатическим управлением потоком электронов [3]. Все вместе обеспечивают определение, генерацию и преобразование электрических сигналов. Для контроля электронного потока применяется разное количество электродов. Те, что не являются препятствием для потока электронов, именуют сетками. Число электродов и определяет конкретный подтип электронной лампы. Различают диоды, триоды, тетроды, пентоды и др.

Диод – вакуумный прибор, имеющий строго два электрода, анод и катод (рис. 1). Основной особенностью диода является то, что он способен проводить ток только в одном направлении, от катода к аноду, и применяется для преобразования переменного тока в постоянный. Испускаемые катодом электроны создают пространственный заряд между анодом и катодом [4]. В случае присутствия на аноде положительного потенциала, отрицательный барьер объемного заряда преодолевают самые быстрые электроны, создающие анодный ток во внешней цепи. Ток анода находится в жесткой зависимости от его напряжения, а также от катодного тока эмиссии. В процессе роста напряжения на аноде, возникают электроны, без труда преодолевающие отрицательный потенциал электронного заряда. В данных обстоятельствах ток эмиссии значительно превосходит ток анода. Важнейшими параметрами диода являются крутизна

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$$

и внутреннее сопротивление лампы

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S},$$

являющееся величиной, обратной крутизне. В режиме пространственного заряда анодный ток растет в соответствии с законом степени трех вторых:

$$I_a = gU_a^{3/2},$$

где g – постоянная диода, зависящая исключительно от типа диода и размера его электродов [5, 6].

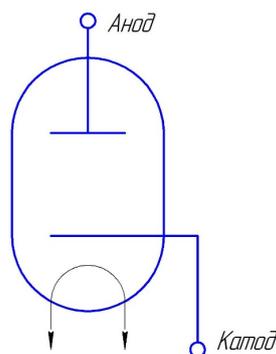


Рис. 1. Условное обозначение вакуумного диода

Триод – прибор, представляющий собой вакуумную лампу с тремя электродами, в центре которой, между анодом и катодом, располагается управляющая сетка (рис. 2).

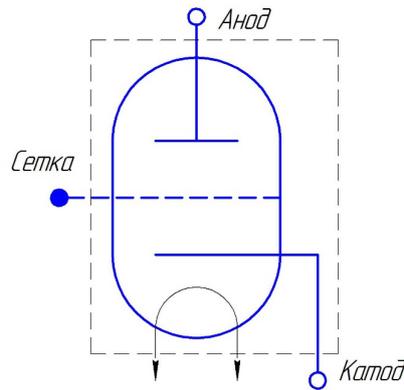


Рис. 2. Условное обозначение вакуумного триода

Значением тока анода в триоде возможно управлять, меняя значение потенциала сетки. Данная сетка делает возможным применение триодов в качестве усилителя или генератора электромагнитных колебаний. Основными параметрами триода можно назвать:

- 1) крутизну

$$S = \left. \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right|_{U_a = \text{const}} ;$$

- 2) внутренне сопротивление

$$R_i = \left. \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right|_{U_c = \text{const}} ;$$

- 3) статический коэффициент усиления

$$\mu = \left. \frac{\partial \Gamma_a}{\partial U_c} \right|_{U_c = \text{const}} .$$

Соотношение между параметрами принимает вид $SR_i = \mu$.

Параметры S , R_i , μ определяют влияние напряжений электродов на анодный ток. Ток катода зависит от проницаемости лампы $D = \left. \frac{\partial U_c}{\partial U_a} \right|_{I_k = \text{const}} .$

Основным недостатком триода можно назвать небольшой коэффициент усиления и слишком большую проходную емкость, формирующую обратную связь между входом и выходом лампы [7]. Падение характеристик обусловлено самовозбуждением в определенный период времени. Данного недостатка лишены тетроды и пентоды, у которых присутствуют дополнительные сетки, берущие на себя управление потоком электронов.

Тетрод – электровакуумная лампа, имеющая четыре электрода, одним из которых является вторая экранная сетка C_2 , дающая возможность снижения проходной емкости (рис. 3).

Если тетрод находится в усилительной цепи, экранная сетка принимает на себя положительное постоянное напряжение. Электроны, проходящие через нее, отчасти перехватываются ею, формируя ток [8, 9]. Принимая это во внимание, стоит учитывать, что при этом может на два порядка уменьшиться проходная емкость лампы и увеличиться статический коэффициент усиления. При создании потока электронов в ленточной форме благодаря увеличению плотности пространственного заряда около анода образуется маленький потенциальный барьер, отражающий выпускаемые анодом вторичные электроны, что в свою очередь дает возможность не использовать еще одну, третью, сетку. Такой тип конструкции называют лучевым тетродом.

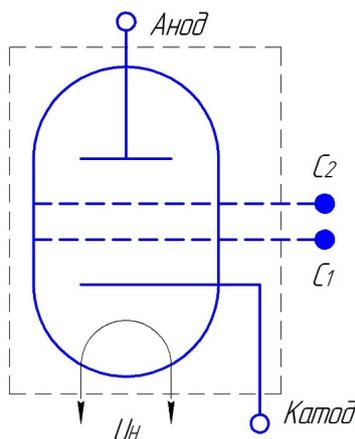


Рис. 3. Условное обозначение вакуумного тетрода

Говоря более конкретно, к тетродам можно отнести нувистор – небольшую приемно-усилительную лампу с цилиндрически расположенными электродами, состоящую из металлокерамического материала. Использование данного материала и такой конструкции дает повышенную стойкость к вибрациям и термическому воздействию.

Пентод имеет уже пять электродов (рис. 4). Благодаря наличию защитной сетки C_3 , располагающейся между анодом и сеткой, служащей экраном, образуется поле, делающее невозможным попадание вторичных электронов на сетку C_2 . Данная особенность минимизирует количество электронов, проникающих от анода к экранной сетке. Присутствующий у тетродов провал на анодной характеристике у пентода отсутствует.

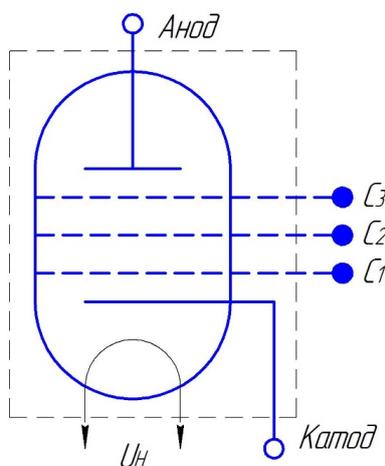


Рис. 4. Условное обозначение вакуумного пентода

На этом обзор электронных ламп можно завершить, переключившись на более востребованный в наши дни вакуумный прибор, вакуумный переключатель, или вакуумное реле.

Вакуумное реле

Вакуумное реле – прибор, рассчитанный в первую очередь на применение в электрических цепях с высоким напряжением [10]. Своим названием он обязан особому типу используемой конструкции, представляющей из себя вакуумную камеру, за счет наличия которой становится возможным мгновенное гашение электрической дуги. Применяется также название «вакуумные высокочастотные коммутрующие устройства» (ВВКУ).

В основе принципа действия реле лежат физические свойства газа, располагающегося внутри корпуса прибора в разряженном состоянии. В данных обстоятельствах электрическая прочность газа, являющаяся одним из основных его свойств, заметно увеличивается [11].

Ток, протекающий по контактам устройства в момент разрыва, формирует дугу, электрический разряд. Высокая температура внутри запускает процесс ионизации паров металла, что неизбежно вызывает горение дуги. Ток не прекращает течь от контакта к контакту по образовавшейся плазме, пока он не перейдет к нулевой шине. В момент наступления этого перехода электрическая дуга гаснет, причем весь процесс занимает не больше 10 микросекунд [12, 13].

Ведущими производителями вакуумных переключателей по всему миру являются несколько компаний. В США это «Jennings Technology», «Kilovac Corporation» и «Gigavac», в Германии «Siemens», в России же АО «НИИЭМП» (г. Пенза), на нем и сосредоточим свое внимание [14].

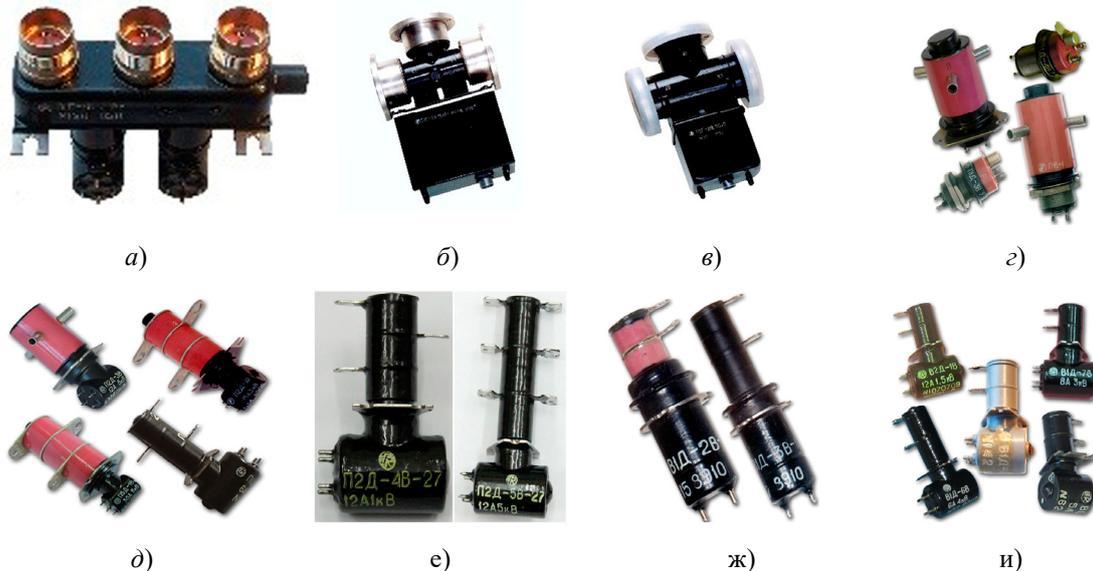


Рис. 5. Вакуумные реле, выпускаемые АО «НИИЭМП»

Номенклатура не сказать, что очень широка, но и скудной ее назвать сложно. Пройдемся по ней в виде списка:

1) вакуумные коаксиальные реле однополюсные на два направления П1Г-1В (рис. 5,а). Применяются при бестоковой коммутации высокочастотных цепей с волновым сопротивлением 75 Ом. Диапазон частот колеблется от 1,5 до 800 МГц;

2) вакуумные коаксиальные реле однополюсные на два направления П4Г-2В (рис. 5,б). Применяются при бестоковой коммутации высокочастотных цепей с волновым сопротивлением 50 Ом при прохождении через них непрерывно генерируемой мощности и мощности импульсного типа. Диапазон рабочих частот от 30 до 600 МГц;

3) вакуумные коаксиальные реле однополюсные на два направления П5Г-2В (рис. 5,в). Применяются при бестоковой коммутации высокочастотных цепей с волновым сопротивлением 75 Ом в технических устройствах КВ и УКВ диапазона, обладающих большой мощностью. Рабочая частота от 1,5 до 500 МГц;

4) вакуумные реле однополюсные на два направления (рис. 5,г). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Диапазон частот от 1 до 80 МГц;

5) вакуумные реле однополюсные на два направления поляризованные (рис. 5,д). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Частота варьируется от 0,15 до 80 МГц;

6) вакуумные реле однополюсные на два направления поляризованные П1Д-5В, П2Д-4В-12, П2Д-4В-27, П2Д-5В-12, П2Д-5В-27 (рис. 5,е). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Диапазон частот от 1,5 до 120 МГц;

7) вакуумные реле однополюсные на одно направление (рис. 5,ж). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Работают на частоте 2–80 МГц;

8) вакуумные реле однополюсные на одно направление поляризованные (рис. 5,и). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Диапазон частот от 1,5 до 120 МГц.

Представленная номенклатура выпускаемой АО «НИИЭМП» продукции практически полностью покрывает потребности радиотехнической отрасли в вакуумных переключателях.

Заключение

В заключение стоит сказать, что хоть история вакуумных приборов насчитывает уже не один десяток лет, но, несмотря на переход электронной промышленности к миниатюризации радиотехники, вакуумные приборы (в частности переключатели) до сих пор не потеряли своей актуальности. Не изобрели пока прибора, который мог бы потягаться с ними в надежности, точности и скорости работы. Возможно, когда-нибудь это и произойдет и промышленность забудет такое понятие, как «вакуумное реле», но это явно перспектива очень далекого будущего. А до тех пор, пока этого не случилось, такие предприятия, как АО «НИИЭМП», «Kilovac Corporation», «Siemens» и другие, всегда будут иметь заказы на производство таких комплектующих.

Библиографический список

1. Зоркин, А. Я. Парциальные давления газовой фазы при наличии оксидов и карбидов в вакуумных электронных приборах / А. Я. Зоркин, С. В. Семенов, Н. А. Вавилина // Перспективы развития технических наук : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационный центр развития образования и науки». – Челябинск, 2016. – С. 6–10.
2. Лебедев, И. В. Механизмы преобразования энергии в твердотельных и вакуумных СВЧ-приборах / И. В. Лебедев // Радиотехника. – 2017. – № 3. – С. 13–26.
3. Зоркин, А. Я. Газовыделение углерода и кислорода в вакуумных электронных приборах / А. Я. Зоркин, С. В. Семенов, Н. А. Вавилина, К. А. Ильин // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке : сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Махачкала, 2017. – С. 13–15.
4. Влияние геометрии катодов на усиление электрического поля в вакуумных приборах холодной эмиссии / А. А. Голишников, А. В. Емельянов, В. А. Жигалов, А. Ю. Красюков, В. А. Петухов, М. Г. Путря // Интеллектуальные системы и микросистемная техника : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Нальчик, 2018. – С. 112–119.
5. Попов, А. А. Структурная оптимизация нечетких регрессионных моделей с минимизацией ошибки прогноза на обучающей и тестовой выборке / А. А. Попов, А. А. Холдонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 5–17.
6. Металлопористый катод вакуумного электронного прибора магнетронного типа с повышенной долговечностью и мгновенной готовностью / О. Д. Тищенко, А. Я. Зоркин, И. В. Родионов, И. В. Белова, А. А. Тищенко, С. В. Семенов // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 3. – С. 18–23.
7. Лукша, О. И. Исследование влияния неоднородности эмиссии с катода на качество электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона / О. И. Лукша, П. А. Трофимов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – № 1 (1). – С. 165–169.
8. Структура и схмотехническая реализация модуля автоматической накачки азота / А. А. Акимов, Д. В. Дерябин, В. П. Буц, Н. В. Горячев, Г. П. Разживина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 72–78.
9. Вакуумная электроника: ренессанс или стагнация / А. Григорьев, А. Иванов, В. Ильин, В. Лучинин // Наноиндустрия. – 2018. – Т. 11, № 5 (84). – С. 356–368.
10. Ольховой, А. А. Средства испытания на износостойкость вакуумных реле / А. А. Ольховой, А. Н. Винчаков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 360–362.
11. Штейзель, А. С. Вакуумная микроэлектроника: преимущества, проблемы, перспективы / А. С. Штейзель, И. Н. Карманов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 9. – С. 19–24.
12. Федотов, А. Ю. Моделирование процессов образования и свойств наноструктур и нанопленок, сформированных в газовой среде / А. Ю. Федотов // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 230–249.
13. Смирнов, Э. Н. Вакуумные емкостные делители высоких напряжений : монография / Э. Н. Смирнов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 312 с.
14. АО «НИИЭМП». Официальный сайт. – URL: <http://niiemp.ru/> (дата обращения 19.12.2018).

References

1. Zorkin A. Ya., Semenov S. V., Vavilina N. A. *Perspektivy razvitiya tekhnicheskikh nauk: sb. nauch. tr. po itogam Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Innovatsionnyy tsentr razvitiya obrazovaniya i nauki»* [Prospects for the development of technical Sciences : collection of scientific works. Tr. on the results of international. science.-prakt. conf. "Innovation center of education and science development"]. Chelyabinsk, 2016, pp. 6–10. [In Russian]
2. Lebedev I. V. *Radiotekhnika* [Radiotechnics]. 2017, no. 3, pp. 13–26. [In Russian]

3. Zorkin A. Ya., Semenov S. V., Vavilina N. A., Il'in K. A. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki v 21 veke: sb. materialov XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of modern science in the 21st century : proceedings of the XIV Intern. science.-prakt. conf.]. Makhachkala, 2017, pp. 13–15. [In Russian]
4. Golishnikov A. A., Emel'yanov A. V., Zhigalov V. A., Krasnyukov A. Yu., Petukhov V. A., Putrya M. G. *Intellektual'nye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Intelligent systems and Microsystem technology : sat. Tr. International. science.-prakt. conf.]. Nalchik, 2018, pp. 112–119. [In Russian]
5. Popov A. A., Kholdonov A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2018, no. 2 (46), pp. 5–17. [In Russian]
6. Tishchenko O. D., Zorkin A. Ya., Rodionov I. V., Belova I. V., Tishchenko A. A., Semenov S. V. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study]. 2018, no. 3, pp. 18–23. [In Russian]
7. Luksha O. I., Trofimov P. A. *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Electronics and microelectronics microwave]. 2018, no. 1 (1), pp. 165–169. [In Russian]
8. Akimov A. A., Deryabin D. V., Buts V. P., Goryachev N. V., Razzhivina G. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 72–78. [In Russian]
9. Grigor'ev A., Ivanov A., Il'in V., Luchinin V. *Nanoindustriya* [Vacuum electronics: Renaissance or stagnation]. 2018, vol. 11, no. 5 (84), pp. 356–368. [In Russian]
10. Ol'khovoy A. A., Vinchakov A. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 360–362. [In Russian]
11. Shteyzel' A. S., Karmanov I. N. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2018, vol. 9, pp. 19–24. [In Russian]
12. Fedotov A. Yu. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy]. 2017, vol. 19, no. 2, pp. 230–249. [In Russian]
13. Smirnov E. N. *Vakuumnye emkostnye deliteli vysokikh napryazheniy: monografiya* [High voltage vacuum capacitance dividers : monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, 312 p. [In Russian]
14. АО «НИИМП». *Ofitsial'nyy sayt* [JSC "НИИМП". Official site]. Available at: <http://niiemp.ru/> (accessed Dec. 19, 2018). [In Russian]

Акимов Александр Александрович

генеральный директор,
Пензенский научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niiemp.ru

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Дерябин Денис Викторович

заместитель генерального директора,
Пензенский научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niiemp.ru

Прошин Алексей Анатольевич

аспирант, инженер,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: engineer.psu@yandex.ru

Akimov Aleksandr Aleksandrovich

director general,
Penza Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440000, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Derjabin Denis Viktorovich

deputy general director,
Penza Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440000, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Proshin Alexey Anatolevich

postgraduate student, engineer,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Рыжов Александр Алексеевич

кандидат технических наук, начальник НПК-1,
Пензенский научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: pgufr@mail.ru

Ryzhov Alexander Alekseevich

candidate of technical sciences, head of NPK-1,
Penza Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440000, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

УДК 621.385

Проблемы применения вакуумных электронных приборов / А. А. Акимов, Н. В. Горячев,
Д. В. Дерябин, А. А. Прошин, А. А. Рыжов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. –
№ 1 (25). – С. 62–69. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-7.