

УДК 621.385.032

А.В. ЛОЯН, Е.П. СОЛОНИНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНОГО ПРОМЕЖУТКА В РЕЖИМЕ ОДНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В данной работе рассмотрена возможность определения активного сопротивления диодного промежутка при произвольной форме и крутизне фронтов задающего импульса, что необходимо для определения работы выхода поверхности методом полного тока. Предложена полная и эквивалентная электрические схемы устройства для испытания эмиттеров катодов электрореактивных двигателей (ЭРД). Дается математическая модель и метод ее решения. Приводятся результаты расчета и анализа. Показано, что при произвольном импульсе тестового напряжения истинные значения тока могут быть получены в случае известного значения емкостной составляющей устройства испытания эмиттеров и токопроводящей линии.

Ключевые слова: сопротивление диодного промежутка, эмиттер, импульс напряжения.

Введение

Для определения одного из важнейших параметров эмиссионного материала – работы выхода его поверхности, используют метод полного тока [1]. В этом случае для каждого значения приложенного напряжения измеряется значение тока. Для снижения влияния реактивного сопротивления цепи, рекомендуется проводить измерение только в случае приложения постоянного напряжения, т.е. на «полочке» тока и напряжения [2].

В этом случае за один импульс измеряется только одна точка вольт-амперной характеристики (ВАХ). Затем изменяют напряжение зондирующего импульса и проводят следующее измерение. Процесс повторяют до полного, поточечного определения ВАХ диодного промежутка. Обработывая полученную ВАХ можно получить искомое значение работы выхода поверхности материала для заданной температуры. Такой метод очень трудоемкий и длительный по времени. Возникает естественный вопрос: «возможно ли использовать результаты измерений, получаемые в одном импульсе?» Так, например, предложенный в [3] цифровой безынерционный измерительный комплекс позволяет надежно регистрировать полную длину импульса с хорошим временным разрешением. А вот вопрос обработки полученной информации остается открытым.

Восходящая ветвь импульса длиной порядка нескольких микросекунд применяется для определения ВАХ промежутка как эквивалент работы эмиттера в режиме «коротких» импульсов, а нисходящая ветвь длиной порядка миллисекунды ис-

пользуется для определения работы выхода в режиме «длинных» импульсов (или квазистационарном режиме). Это позволит в одном импульсе рассчитать параметр активации A [4] и затем спрогнозировать время активации для заданной температуры.

Однако, получаемые в [3] ВАХ не поддаются интерпретации, их вид даже отдаленно не похож на вид классической ВАХ вакуумного диодного промежутка.

1. Эквивалентная схема

Рассмотрим более детально электрическую схему системы измерений и коммутации представленной в [3]. При слабо меняющихся во времени напряжении и токе (или как в методе измерений на «полочке» импульса) влиянием реактивной составляющей цепи можно пренебречь. Однако при измерениях в полном импульсе скорость возрастания напряжения составляет 10^6 - 10^7 В/с и более [3]. Таким образом, влияние реактивности цепи может оказаться значительным.

Выделим следующие элементы, которые вносят вклад в активную и реактивную составляющую сопротивления цепи:

- 1) распределенная емкость и индуктивность токопроводящих проводов;
- 2) емкость между эмиттером и коллектором эмиттеров;
- 3) активное сопротивление проводов;
- 4) активное сопротивление эмиттер – коллектор;
- 5) паразитные активные сопротивления конст-

рукции.

В этом случае можно нарисовать эквивалентную электрическую схему устройства (рис. 1). Очевидно, что эту схему можно упростить, сгруппировав однотипные элементы (рис. 2)

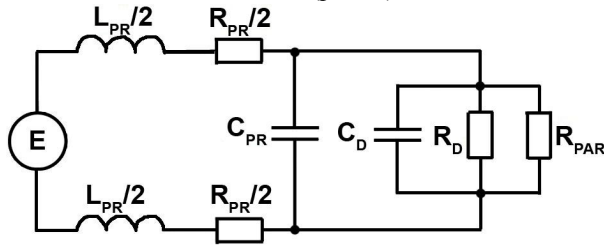


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема:

L_{PR} , C_{PR} , R_{PR} – индуктивность, емкость и активное сопротивление токопроводящей линии; C_D , R_D – емкость и активное сопротивление устройства испытания эмиттеров (УИЭ); R_{PAR} – паразитное сопротивление УИЭ; E – напряжение задающего импульса.

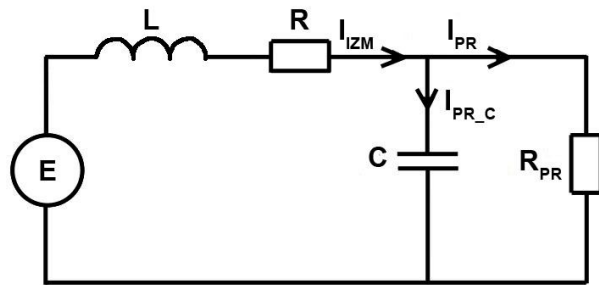


Рис. 2. Расчетная эквивалентная схема измерительной системы ВАХ:

L – общая индуктивность источника импульсного напряжения; R – общее активное сопротивление источника импульсного напряжения и проводов; C – емкость линии подачи напряжения; R_{PR} – активное сопротивление исследуемого диодного промежутка; E – напряжение задающего импульса; I_{IZM} – регистрируемый прибором ток цепи; I_{PR} – истинный ток через активное сопротивление промежутка; I_{PR_C} – ток через емкость разрядного промежутка.

Исходя из законов Кирхгофа для схемы, изображенной на рис. 2, можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} I_{IZM} = I_{PR_C} + I_{PR}; \\ R_{IZM} + L \frac{dI_{IZM}}{dt} + U_{IZM} = e; \\ U_{IZM} = R_{PR} \cdot I_{PR}; \\ I_{PR_C} = C \frac{dU_{IZM}}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Откуда можно записать систему линейных

дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dU_{IZM}}{dt} = -\frac{1}{R_{PR} \cdot C} \cdot U_{IZM} = e; \\ \frac{dI_{IZM}}{dt} = -\frac{1}{L} \cdot U_{IZM} - \frac{R}{L} \cdot I_{IZM} + \frac{1}{L} \cdot e. \end{cases} \quad (2)$$

Следует отметить, что сопротивление разрядного промежутка есть существенно не линейная функция напряжения, поэтому, система уравнений (2) не может быть решена в общем виде. Ее решение будем находить численно, используя для этого пакет прикладных подпрограмм языка FORTRAN.

2. Результаты моделирования

Для определения адекватности модели попробуем рассчитать полученные ВАХ по имеющимся экспериментальным данным. Для этого оценим величины составляющих в системе (2).

Для оценки емкости диодного промежутка используем выражение [5]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d}, \quad (3)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная вакуума;

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь пластины;

d – толщина диэлектрика.

Откуда оценка емкости диодного промежутка дает величину $C = 0,192$ пФ.

Величину активной составляющей оценим по величине падения напряжения при пропускании постоянного тока. Для этого вместо эквивалента нагрузки (диодного промежутка – емкости и сопротивления промежутка) подключим источник стабилизированного тока и измеряем полученное напряжение. Оценка полного сопротивления постоянному току дает значение 3,6 Ом.

Индуктивность контура измеряется RLC-метром Ф4320 на частоте 1 кГц. Однако важно отметить, что при длине «восходящей» части ВАХ в 5 мкс (что соответствует частотам около 200 кГц) такое измерение может дать существенную погрешность. Измерение индуктивности на частоте 1 кГц дает величину порядка 0,56 Гн.

Сопротивление диодного промежутка будем определять как U/I , где U , I – измеренные в эксперименте значения тока и напряжения, полученные как методом одиночных импульсов, так и на «спадающей» части ВАХ в режиме длительного импульса. На рис. 3 представлены для трех температур

эмиттера типичные зависимости $R_{PR} = f(U)$ и их аппроксимация по формуле:

$$y = A_1 + (A_2 - A_1) \left[\frac{p}{1 + 10^{(B_1 - X)h_1}} + \frac{1 - p}{1 + 10^{(B_2 - X)h_2}} \right], \quad (4)$$

где $A_1, A_2, p, B_1, B_2, h_1, h_2$ – коэффициенты, зависящие от температуры и свойств материала эмиттера; X – напряжение импульса.

Коэффициент корреляции расчета с экспериментальными данными не хуже $R=0,993$.

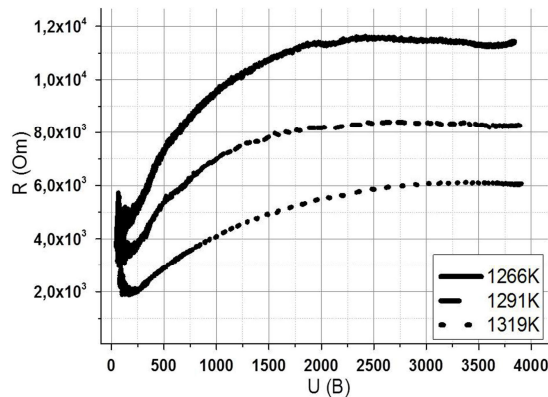


Рис. 3. Зависимость сопротивления промежутка от напряжения

Будем считать, что подаваемый импульс имеет вид, полученный при измерениях без нагрузки (рис. 4).

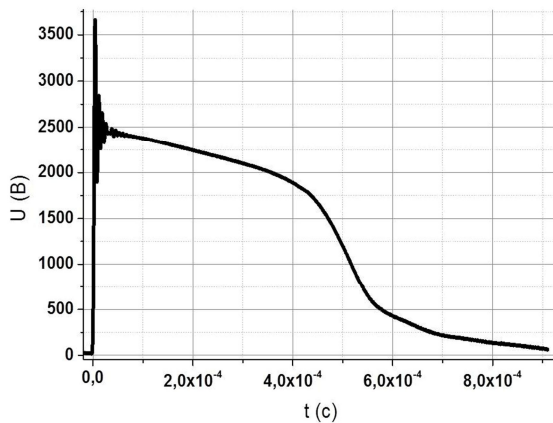


Рис. 4. Импульс напряжения без нагрузки

Для аппроксимации импульс напряжения был условно разбит на две части: первая – часть с возрастанием до максимума и концом колебаний напряжения (рис. 5), вторая – начало спадающей, гладкой части и до нуля напряжения (рис. 6).

Подставив полученные аппроксимации можно моделировать поведение системы (1). Однако качественного соответствия удалось достичь при других значениях L, R, C . Особенно это касалось индуктивного сопротивления цепи: вместо оценки в 0,56 Гн

нами были достигнуты наилучшие результаты при L на порядок меньше, т.е. около 0,05 Гн. Однако это был прогнозируемый результат, что только подтверждает правильность наших взглядов.

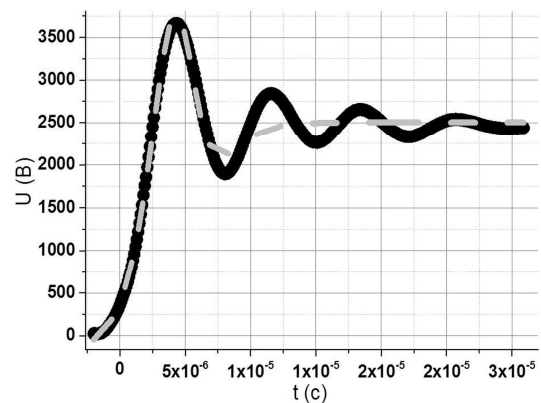


Рис. 5. Аппроксимация импульса напряжения по частям

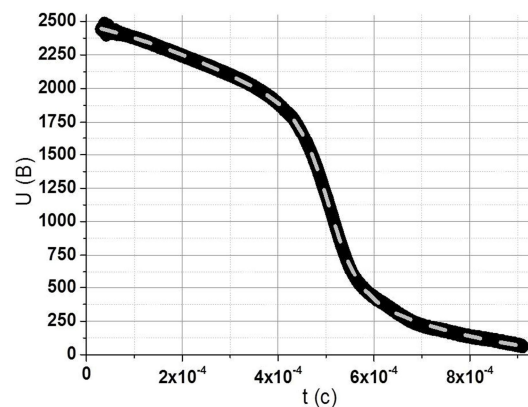


Рис. 6. Аппроксимация импульса напряжения по частям

Вторым этапом решения была задача определить возможность восстановления $R_{PR} = f(U)$ при заранее заданных величинах $L, R, C, \epsilon(\tau), U_{IZM}, I_{IZM}$.

Из системы (1) имеем:

$$\begin{cases} I_{PR} = I_{IZM} - I_{PR_C}; \\ R_{PR} = \frac{U_{IZM}}{I_{PR}}; \\ I_{PR_C} = C \frac{dU_{IZM}}{dt}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда:

$$R_{PR} = \frac{U_{IZM}}{I_{IZM} - C \frac{dU_{IZM}}{dt}}. \quad (6)$$

Таким образом, используя выражение (6) по измеренным значениям тока и напряжения можно определить истинное активное сопротивление вакуумного диодного промежутка и затем рассчитать работу выхода поверхности исследуемого образца.

3. Обсуждение результатов

Решение системы дифференциальных уравнений (2) является сложной функцией комплекса параметров L , C , R , где R – сопротивление, зависящее от температуры. Анализ каждого из факторов не входит в задачу настоящей работы. Однако рассмотрим результаты расчётов одного из вариантов для характерных значений $L=0,05$ мГн, $C=36$ пФ, $R=3,2$ Ом. Отметим, что контролируемыми параметрами были: напряжение задающего импульса и напряжение, измеряемое на диодном промежутке, измеряемый ток и ток диодного промежутка.

Временная развертка задающего импульса представлена на рис. 7. и аппроксимировалась кусочно-линейной функцией вида (4). На этом рисунке представлен график отображающий напряжение, которое можно измерять экспериментально. Очевидно, что наличие индуктивности цепи приводит к некоторой затяжке фронта импульса. Следствием емкости цепи является наличие пиков напряжения не имеющих на задающем импульсе. Важно обратить внимание, что отличие измеренного напряжения от задающего напряжения наблюдается только на начальных этапах быстропротекающих процессов и характеризуется временным интервалом до нескольких микросекунд. В дальнейшем отличий между тестовым и измеренным импульсом не наблюдается.

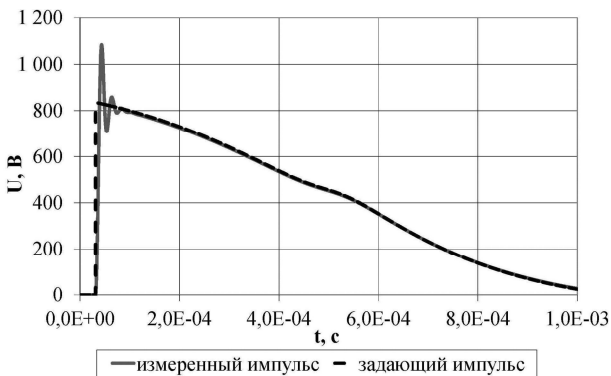


Рис. 7. Задающий и измеренный импульс напряжения

Аналогичное явление наблюдается и при рассмотрении графиков во времени, тока измеренного и истинного (рис. 8а).

В то же время имеются и существенные отличия, основным из которых является не только отличие по величине, но и сдвиг по фазе. Это хорошо можно увидеть на рис. 8б с большим временным разрешением. Именно это явление не позволяет использовать фронты импульсов для измерения ВАХ диодного промежутка и заставляет брать истинное только значение тока с «полочки» импульса.

Наиболее очевидно эти отличия проявляются при построении ВАХ промежутка по измеренным и истинным значениям тока (рис. 9). В этом случае существенные отличия наблюдаются только ВАХ, построенной при измерениях на восходящем быстропротекающем фронте импульса. Для спадающей части импульса, после завершения переходящих процессов обе ВАХ совпадают. Обращает на себя тот факт, что измеренная и истинная ВАХ имеют несколько общих точек, в которых градиент напряжения по времени равен нулю.

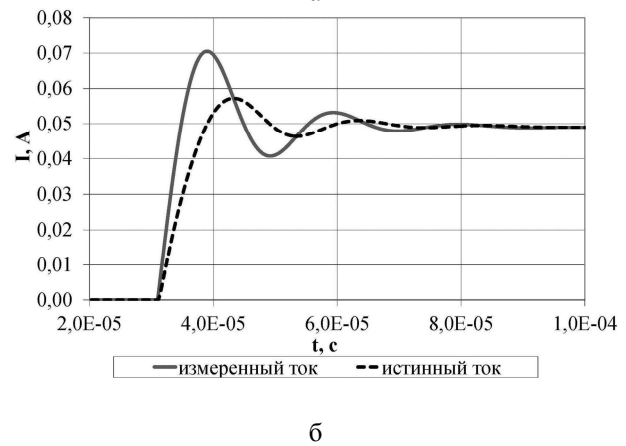
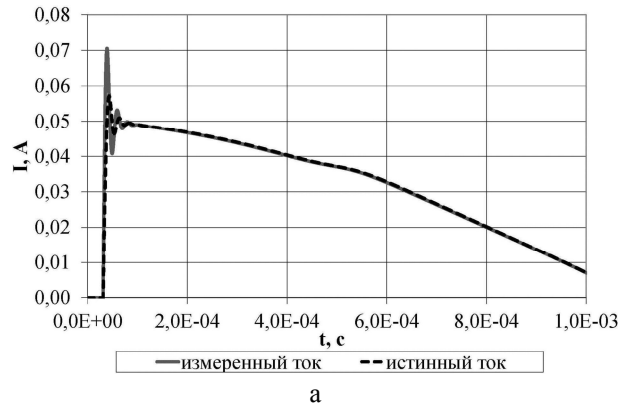


Рис. 8. Развертки импульса тока: а – полная развертка, б – начальная стадия развертки

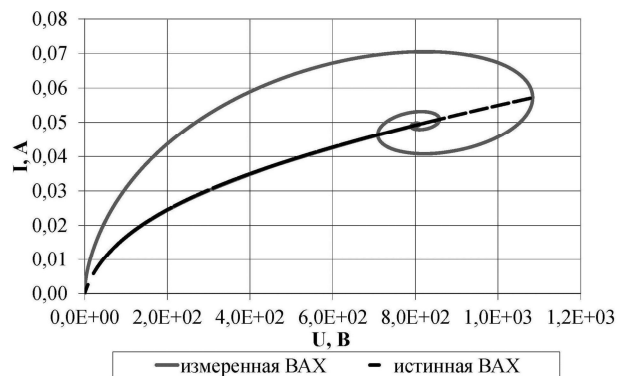


Рис. 9. Измеренная и истинная ВАХ диодного промежутка

Очевидно что:

$$I_{PR} = \frac{U_{IZM}}{R_{PR}}. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7) получаем:

$$I_{PR} = \frac{U_{IZM}}{\frac{U_{IZM}}{I_{IZM} - C \frac{dU_{IZM}}{dt}}} = I_{IZM} - C \frac{dU_{IZM}}{dt}. \quad (8)$$

Положим $dU_{IZM}/dt = 0$ и получим:

$$I_{PR} = I_{IZM}. \quad (9)$$

Этот результат позволяет сделать очень важный вывод, что в случае петлевых ВАХ для построения истинной ВАХ промежутка можно использовать точки с $dU/dt = 0$. При этом необходимость в знании параметров цепи отпадает.

Предварительные исследования системы (2) можно провести, изменяя сопротивление диодного промежутка. Согласно аппроксимации (4) для различных температур проведем расчет системы (2). Результаты представлены на рис. 10, где $T_1 < T_2 < T_3$. Очевиден вывод, что изменение температуры (и как следствие сопротивления диодного промежутка) приводит к трансформации измеренной ВАХ от циклоидоподобной до ВАХ с небольшим гистерезисом. При этом повышение температуры эмиттера (и соответственно снижение его активного сопротивления) приводит к существенному уменьшению влияния реактивной составляющей цепи и сближению измеренной и реальной ВАХ диодного промежутка.

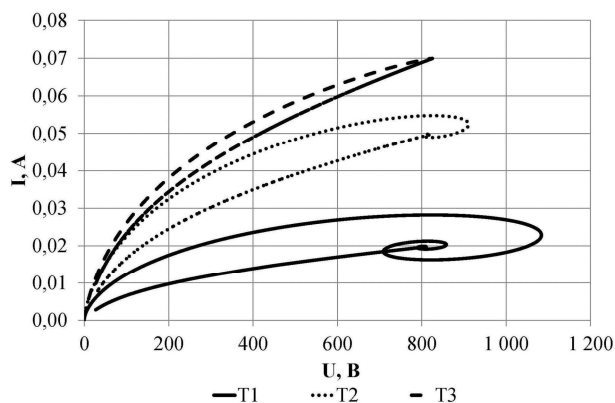


Рис. 10. Изменение измеренной ВАХ при различных температурах эмиттера

Необходимо подчеркнуть, что в системе (2) моделировался диодный промежуток с независимым от времени сопротивлением. В случае разогрева поверхности в течении импульса (как указывалось в

[6]) будет происходить изменение его сопротивления, что необходимо учитывать в расчетах.

Выводы

1. Предложенная в работе модель учитывает реактивную составляющую цепи и адекватным образом описывает измеренные ВАХ диодного промежутка при испытаниях эмиссионных материалов катодов ЭРД.

2. Отмечается существенное влияние реактивной составляющей цепи на измеренные ВАХ, особенно для низких температур эмиттера.

3. Для анализа измеренной ВАХ необходимо знать емкость диодного промежутка, при этом индуктивность контура не вносит погрешностей в расчет (см. формулу (8)).

4. Для построения истинной ВАХ можно использовать данные измеренной ВАХ в точках $dU/dt = 0$, без определения точного значения емкости токопроводящих цепей и устройства испытаний эмиттеров. Это существенно упрощает интерпретацию измеренных ВАХ.

Литература

1. Владимиров, Г.Г. Физическая электроника. Ч. 1. Термоэлектронная эмиссия [Текст] / Г.Г. Владимиров. – СПб: СПбГУ, 2007. – 187 с.
2. Демидов, Н.Ф. Методика одиночных импульсов для исследования эмиссионных свойств термокатодов [Текст] / Н.Ф. Демидов, А.Б. Киселев, И.С. Мазуров // Вопросы радиоэлектроники: Сер. 1. Электроника. – 1964. – № 4. – С. 111 – 119.
3. Солонинко, Е.П. Измерительный безынерционный комплекс для определения эмиссионных способностей эмиссионных материалов [Текст] / Е.П. Солонинко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 2(61). – С. 24–30.
4. Дудкин, В.Н. Активирование оксидных катодов отбором тока [текст] / В.Н. Дудкин, А.Б. Киселев // Электронная техника: Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1976. - №1. – С. 60 – 66.
5. Справочник по электролитическим конденсаторам [Текст] / М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др.; под общ. ред. И.И. Четверткова, В.Ф. Смирнова. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.
6. Кислицын, А.П. Распределение температуры в активном слое оксидного катода при непрерывном и импульсном токоотборах [Текст] / А.П. Кислицын, С.Ю. Подгорный, А.А. Таран // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3(90). – С. 47-55.

Поступила в редакцию 20.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры 401 А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**РОЗРАХУНОК ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІОДНОГО ПРОМІЖКУ
В РЕЖИМІ ОДНОГО ІМПУЛЬСУ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ КАТОДІВ
ЕЛЕКТРОРЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ**

А.В. Лоян, Є.П. Солонинко

У даній роботі розглянуто можливість визначення активного опору діодного проміжку при визначенні роботи виходу поверхні методом повного струму. Авторами запропоновано повну і еквівалентну електричні схеми пристрою для випробування емітерів катодів ЕРД. Надано математичну модель і метод її вирішення. Наведено результати розрахунку та аналізу. Показано, що при довільному імпульсі тестової напруги істинні значення струму можуть бути отримані у разі відомого значення ємнісної складової пристрою випробування емітерів і струмопровідної лінії.

Ключові слова: опір діодного проміжку, емітер, імпульс напруги.

**V-A CHARACTERISTIC CALCULATION OF DIODE GAP IN A SINGLE IMPULSE
DURING TESTS OF EMITTERS FOR ELECTRIC PROPULSION**

A.V. Loyan, E.P. Solonynko

In this paper we consider the possibility of determination of active resistance of diode gap for determination of surface work function by total current method. The authors propose a complete and equivalent electrical circuit of testing device of cathode emitters for electric propulsion. We give a mathematical model and a method for its solution. The results of calculations and analysis are presented. It is shown that for any impulse of test voltage the true current values can be received in the case of known value of the capacitance of the emitter test device and the conductance of electric line.

Key words: resistance of diode gap, emitter, voltage pulse.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Солонинко Евгений Павлович – аспирант каф. 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: solonynkoyevgen@gmail.com