

21. A hands-on approach to advanced undergraduate instruction in control and circuitry in power electronics / A. T. Avestruz, C. Wilson, R. W. Cox, S. Campbell, S. B. Leeb // Proc. of the Power Electronics Education

Workshop. 2007. P. 1–8. URL: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/137655/2/PEEW-032007.pdf> (дата обращения 29.10.2020).

---

V. K. Manukyan

*Moscow Institute of Physics and Technology*

## SOFTWARE APPLICATIONS IN MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN RADIO ENGINEERING AND ELECTRONICS IN THE CONTEXT OF DISTANCE LEARNING

*Software applications to create electronic circuits, which will help to evaluate the entire circuit according to the specified parameters. The main goal is to develop system, that will be capable of generating electronic circuits with accessible and simple assembly instructions based on the description of the desired circuit functions. Based on TAC applications and the Arduino library, projects and instructions for creating and testing electronic circuits were developed. The analysis of the capabilities and efficiency of the application for testing and developing new electronic circuits with an assessment of the simplicity of the interface and user parameters close to real conditions. Using the TAC application makes it possible to generate several alternate schematics that may fit from the list of components. The results of program approbation showed that using the application for creating prototypes of microcircuits significantly speeds up the learning process and helps to use circuits than using methods. These applications can be adapted for professional use for the computer schemes of technical universities as practical and creative tasks.*

**Electronic circuit prototypes, circuits engineering, microelectronics, virtual circuits**

---

УДК 621.793.18:536.2.083 537.877

В. А. Павлов, В. И. Шаповалов, Д. С. Шестаков,  
А. В. Кочин, А. В. Рудаков, А. Е. Шабалин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Сокращение продолжительности наблюдения за кинетикой нагревания подложки при магнетронном распылении медной мишени

*Исследованы тепловые процессы кинетики нагревания и остывания подложки при магнетронном распылении медной мишени. Для изучения кинетики тепловых процессов на подложках использован терморезистивный датчик с чувствительным элементом в виде медного диска. Установлено, что кинетическая зависимость нагревания носит экспоненциальный характер. Для сокращения продолжительности наблюдения за этим процессом может применяться метод экстраполяции кинетической зависимости в область стационарного состояния. В качестве критерия выбора сокращенного интервала наблюдений использована относительная погрешность экстраполяции. Предложена методика сокращения продолжительности эксперимента. Она носит универсальный характер для установок, схожих по своему типу и устройству с той, которая была использована в данном исследовании. Для ее применения в каждом практическом случае необходимо выполнить один продолжительный эксперимент, в котором процесс нагревания подложки достигает стационарного состояния.*

**Магнетрон, мишень, подложка, распыление, тепловой процесс**

Нагревание подложки при осаждении металлической пленки методом магнетронного распыления является самостоятельной физической за-

дачей. Внимание к ней обусловлено влиянием температуры подложки на кристаллическую структуру, химический состав и, в конечном ито-

ге, на свойства пленки [1]. В течение 8...10 мин температура подложки может возрасти до 200 °С [2]. Эту задачу на протяжении многих лет решали разные авторы. В одной из первых работ [3] опубликованы результаты измерения кинетики нагревания и остывания подложек, полученные с помощью термопарного датчика при магнетронном распылении металлов. Интерес к этой задаче сохранился до последнего времени [4]–[9].

При планировании эксперимента, целью которого служит изучение влияния нескольких независимых переменных на кинетику нагревания подложки, важен выбор продолжительности одиночного эксперимента. Ожидание выхода процесса в стационарный режим может привести к неоправданным потерям времени, которых можно избежать, сокращая его продолжительность.

Целью данной статьи является разработка корректной методики сокращения продолжительности измерения кинетики тепловых процессов на подложке. Методика разработана на основе экспериментальных результатов, полученных при распылении металлических мишеней из разных металлов. Иллюстрация выполнена на примере медной мишени.

Эксперименты выполнялись на установке с вакуумной камерой объемом  $7.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ , в которой остаточное давление было не выше  $1 \cdot 10^{-2}$  мторр ( $1 \text{ торр} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ). В камере был установлен плоский магнетрон диаметром 160 мм с холодной медной мишенью, работающий на постоянном токе. Распыление проводили в среде аргона при давлении 3...9 мторр и токе 5...20 А. Для изучения кинетики тепловых процессов на подложках использован термопарный датчик с чувствительным элементом в виде медного диска площадью  $1 \text{ см}^2$  и толщиной 1 мм. Диск был закреплен на спае термопары типа хромель–копель. Проводники

пары имели длину 500 мм и диаметр 0.3 мм. В каждом эксперименте при заданных значениях независимых переменных измеряли изменение температуры чувствительного элемента при работающем магнетроне. В каждое измерение входили стадии нагревания сенсора при включенном магнетроне и его остывания при выключенном. В каждом случае продолжительность работы магнетрона была достаточна для выхода в стационарный режим процессов нагревания и остывания сенсора. При анализе результатов измерений начальное значение температуры в дальнейшем будет принято равным 0 К.

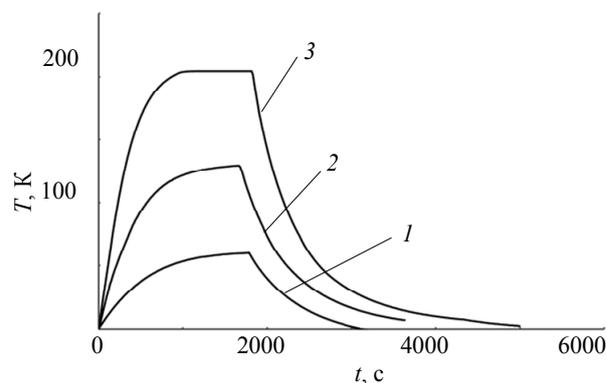


Рис. 1

Кинетические кривые, измеренные при токах разряда 1.0, 2.0 и 4.0 А, на рис. 1 обозначены цифрами 1, 2 и 3 соответственно. Результаты каждого из экспериментов, представленные на рисунке, которые назовем полными, были подвергнуты анализу. Для иллюстрации методики сокращения продолжительности измерения кинетики тепловых процессов на подложке используем измерения, выполненные при токе разряда 1 А и давлении 3 мторр (рис. 2, а, кривые 1 и 2). Числами на рис. 2 указаны значения времени в секундах, соответствующие черным точкам на осях. Как видно из рис. 2, а, измерение кинетической кривой нагревания 1 выполнено в течение 1600 с.

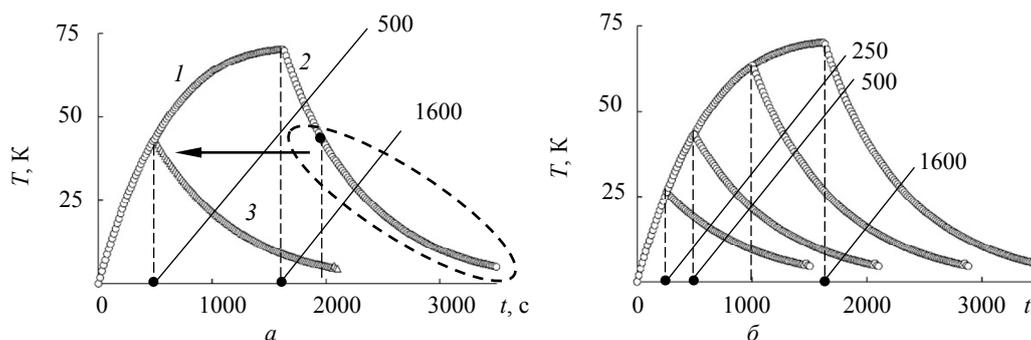


Рис. 2

Далее проведем анализ экспериментальных результатов, направленный на изучение возможности сокращения продолжительности эксперимента по нагреванию подложки. Его суть состоит в следующем:

1. Представим полный эксперимент по нагреванию в виде нескольких сокращенных, выполненных на более коротких интервалах времени  $[0, t_i]$  ( $i = 1, 2, 3$ ). В качестве  $t_i$  были выбраны значения 250, 500 и 1000 с. Осуществив такой выбор, предполагаем, что трех значений  $t_i$  вполне достаточно для установления основных закономерностей при последующих вычислениях. При необходимости в дальнейшем количество сокращенных интервалов может быть увеличено. На рис. 2, а показан пример формирования кинетической кривой для нагревания в эксперименте, сокращенном до 500 с. Она представлена частью кривой 1 на интервале от 0 до 500 с. Для этого эксперимента в качестве кривой остывания 3 в сокращенном эксперименте взят соответствующий участок реальной кривой остывания 2, начало которого отмечено на рисунке черной точкой. Аналогичным способом сформированы кинетические кривые еще для двух экспериментов, сокращенных до 250 и 1000 с. Результаты выполнения этих процедур представлены на рис. 2, б кинетическими кривыми для всех выбранных интервалов наблюдения.

2. Определим аналитические описания (модели) всех экспериментов, аппроксимируя их в общем виде с помощью экспоненты

$$T_i(t) \approx T_0 + T_{i\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ih}}\right) \right], \quad (1)$$

где  $T_0$  – постоянная составляющая, которую, как указано ранее, принимаем равной нулю;  $T_{i\infty}$  – стационарная температура для  $i$ -го интервала;  $\tau_{ih}$  – постоянная времени нагревания;

3. Выполним экстраполяцию по модели, построенной на каждом интервале, в область стационарного состояния процесса.

4. Оценим ошибки, возникшие при экстраполяции, сравнивая модельные зависимости сокращенных и полного экспериментов. Оценку относительной погрешности  $\delta_T(t)$  предсказания стационарной температуры определим в виде

$$\delta_T(t) = \frac{|T_\infty(t) - T_{f\infty}|}{T_{f\infty}}, \quad (2)$$

где  $t$  – продолжительность сокращенного эксперимента;  $T_\infty(t)$  и  $T_{f\infty}$  – стационарные температуры, полученные по модели (1) для интервала наблюдения длительностью  $t$  и полного эксперимента соответственно. Относительное изменение постоянной времени  $\delta_T(t)$  при уменьшении продолжительности эксперимента до  $t$  зададим аналогично выражению (2):

$$\delta_\tau(t) = \frac{|\tau(t) - \tau_f|}{\tau_f}, \quad (3)$$

где  $\tau(t)$  и  $\tau_f$  – постоянные времени в модели (1) для интервала наблюдения длительностью  $t$  и полного эксперимента соответственно.

В табл. 1 представлены значения параметров модели (1) для всех интервалов наблюдения, вычисленные методом наименьших квадратов. Кинетические кривые 1–3 на рис. 3, построенные по выражению (1) с параметрами из табл. 1, содержат по два участка, границы между которыми отмечены точками. Левее каждой точки расположены аппроксимирующие, правее – экстраполирующие части (full – кривая полного эксперимента). Из табл. 1 видно, что по мере уменьшения длительности интервала наблюдения погрешность экстраполяции стационарной температуры возрастает. Такое же влияние сокращения времени эксперимента на погрешность можно увидеть на рис. 4, где представлены зависимости скорости нагревания подложки от температуры для экспериментов с разной продолжительностью. На рис. 4 отчетливо видно, что при длительности опыта 250 с зависимость отклонилась гораздо сильнее, чем при экспериментах на больших временных интервалах. При этом изменяется и постоянная времени нагревания  $\tau$ . Эти изменения показаны точками на рис. 5.

Таблица 1

$i$	$t_i$ , с	$T_{i\infty}$ , К	$\tau_{ih}$ , с
1	250	97	805
2	500	88	720
3	1000	81	632
full	1600	77	563

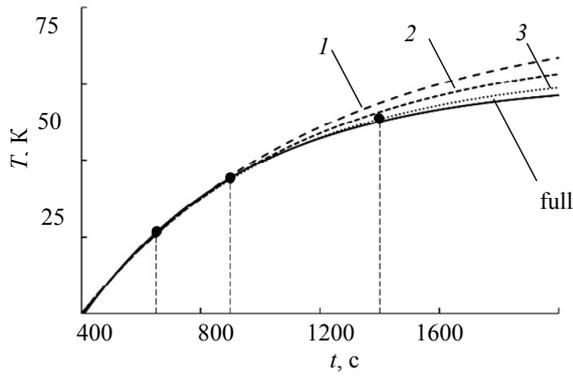


Рис. 3

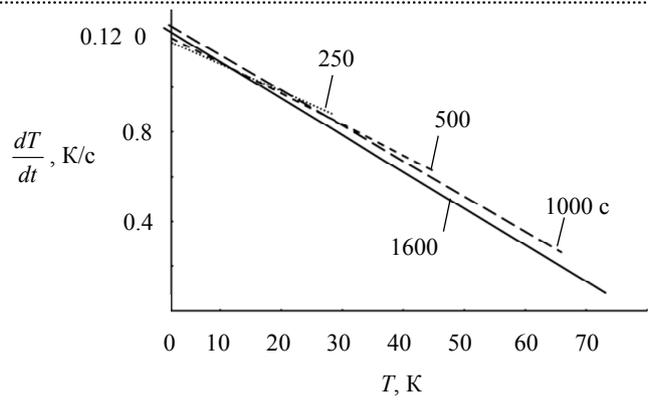
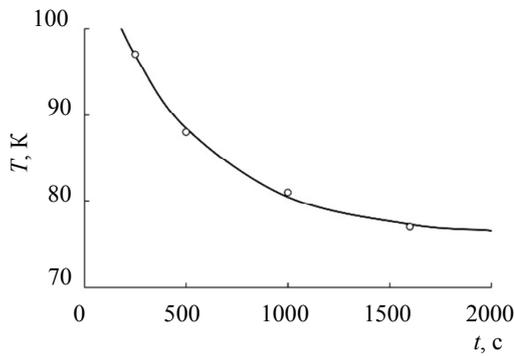
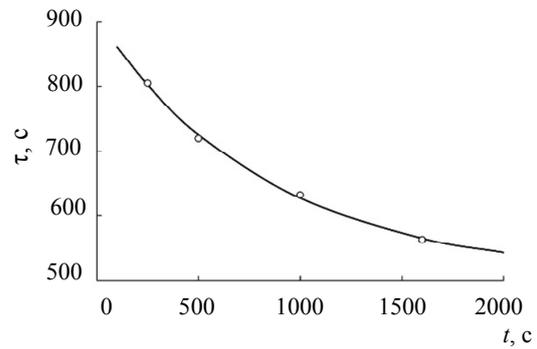


Рис. 4



а



б

Рис. 5

Экспериментальные зависимости, представленные линиями на рис. 5, с достоверностью 0.99 описывают экспоненты

$$T_{\infty}(t) \approx 76 + 34.9 \exp\left(-\frac{t}{486}\right); \quad (4)$$

$$\tau(t) \approx 507 + 400 \exp\left(-\frac{t}{830}\right). \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) используем для определения относительных изменений параметров модели (1).

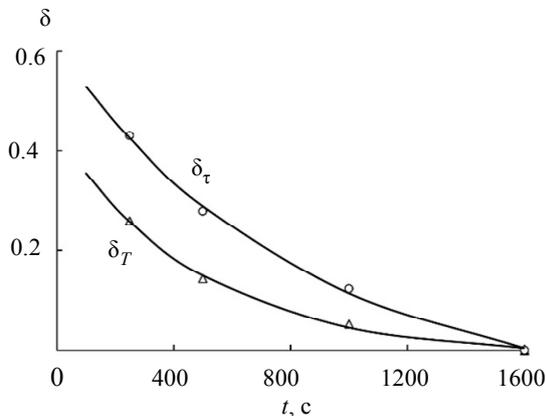


Рис. 6

На рис. 6 значками показаны экспериментальные зависимости, построенные по выражениям (2) и (3). Аппроксимация (линии на рисунке) была проведена с помощью экспоненциальных функций типа (4) и (5):

$$\delta_T(t) \approx -0.013 + 0.453 \exp\left(-\frac{t}{486}\right); \quad (6)$$

$$\delta_{\tau}(t) \approx -0.1 + 0.71 \exp\left(-\frac{t}{830}\right). \quad (7)$$

Отметим, что постоянные времена в (4) и (6), а также в (5) и (7) одинаковы. Выражение (6) может быть использовано для выбора длительности наблюдения за кинетикой нагревания подложки при заданной погрешности. Для этого удобнее преобразовать (6) в функцию  $t = f(\delta_T)$ , которая изображена на рис. 7 (значки – эксперимент; линия – аппроксимация). Аппроксимирующее выражение функции  $t = f(\delta_T)$  имеет вид

$$t \approx 148 + 1500 \exp\left(-\frac{\delta_T}{0.099}\right). \quad (8)$$

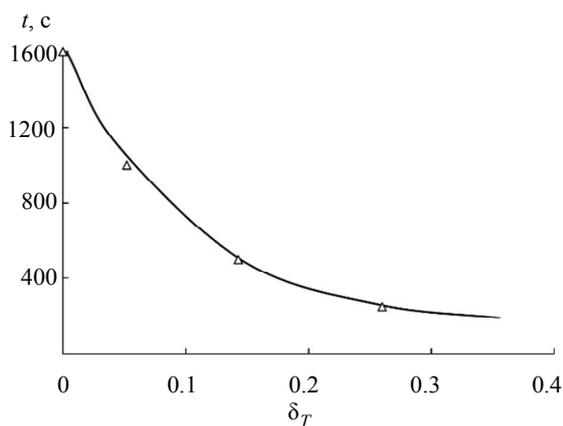


Рис. 7

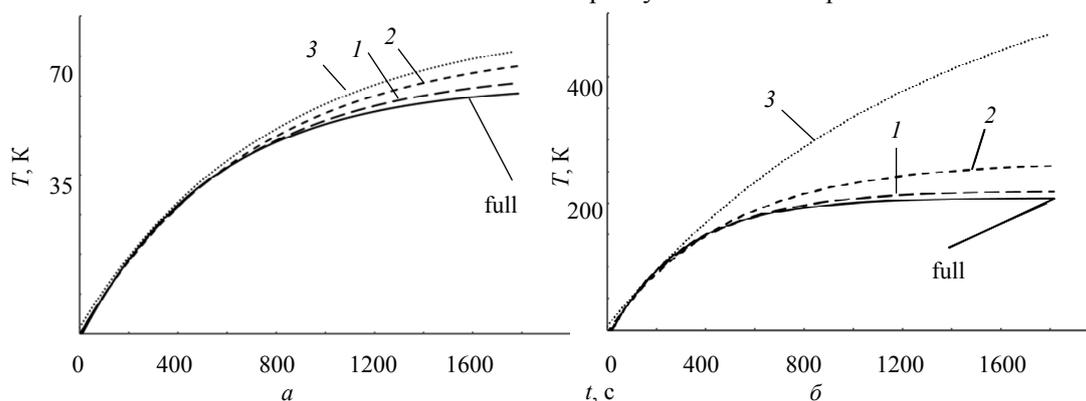


Рис. 8

При исследовании экспериментов с другими материалами и в условиях разных токов разряда данная методика показала схожие результаты.

Из рис. 8 видно, что эксперимент, смоделированный на отрезке 250 с при токах разряда как 1 (рис. 8, а), так и 4 А (рис. 8, б), сильно отличается от полного эксперимента (кривые full). Связано это с тем, что погрешность при снятии оказала существенное влияние на результат сокращенного опыта. Цифры 1, 2 и 3 на рис. 8 соответствуют интервалам наблюдения 250, 500 и 1000 с. Данный факт указывает на увеличение соотношения ошибочных и достоверных данных при уменьшении времени наблюдения. Очевидно, что времен-

ной промежуток для проведения опыта и дальнейших расчетов нельзя выбирать слишком малым. Принятие решения о продолжительности эксперимента может быть основано на заданной погрешности.

Из рис. 7 видно, что относительную погрешность, например менее 0.1, обеспечивает наблюдение за нагреванием подложки в течение  $\sim 700$  с и более. Учитывая, что полный интервал наблюдения в данной работе составлял  $\sim 1600$  с, и используя предложенную методику для одиночного эксперимента, можно получить более чем двукратную экономию времени.

Таким образом, предложенная методика сокращения продолжительности эксперимента носит универсальный характер для установок, схожих по своему типу и устройству с использованной в данном опыте. Для ее применения в каждом практическом случае необходимо выполнить один продолжительный эксперимент, в котором процесс нагревания подложки достигает стационарного состояния.

Статья рекомендована к опубликованию Оргкомитетом 27-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (ВГТ-2020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahn H., Lee D., Um Y. Substrate temperature effects on DC sputtered Mo thin film // Appl. Sci. Converg. Technol. 2017. Vol. 26. P. 11–15.

2. Influence of argon pressure and current density on substrate temperature during magnetron sputtering of hot titanium target / A. A. Komlev, E. A. Minzhulina, V. V. Smirnov, V. I. Shapovalov // Appl. Phys. A. 2018. Vol. 124. P. 48.

3. Thornton J. A. Substrate heating in cylindrical magnetron sputtering sources // Thin Solid Films. 1978. Vol. 54. P. 23–31.

4. Characterization of the energy flux toward the substrate during magnetron sputter deposition of ZnO thin films / S. Bornholdt, N. Itagaki, K. Kuwahara, H. Wulff, M. Shiratani, H. Kersten // Plasma Sour. Sci. Technol. 2013. Vol. 22. P. 025019.

5. Measuring the energy flux at the substrate position during magnetron sputter deposition processes / P. A. Cormier, A. Balhamri, A.-L. Thomann, R. Dussart, N. Semmar, J. Mathias, R. Snyders, S. Konstantinidis // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. P. 1–8.

6. Energy influx measurements with an active thermal probe in plasma-technological processes / R. Wiese, H. Kersten, G. Wiese, R. Bartsch // EPJ Techniq. Instrum. 2015. Vol. 2. P. 1–10.

7. Substrate heating and cooling during magnetron sputtering of copper target / V. I. Shapovalov, A. E. Komlev, A. S. Bondarenko, P. B. Baykov, V. V. Karzin // Phys. Lett. A. 2016. Vol. 380, № 7–8. P. 882–885.

8. Thermal processes during reactive sputtering of hot titanium target / E. A. Minzhulina, V. I. Shapovalov, V. V. Smirnov, A. V. Zav'aylov, V. S. Levitskiy // J. Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. 857. P. 1–4

9. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A. Studying heating of magnetron target based on measurement of substrate temperature // Vacuum. 2019. Vol. 161. P. 324–327.

V. A. Pavlov, V. I. Shapovalov, D. S. Shestakov, A. V. Kochyn, A. V. Rudakov, A. E. Shabalin  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## SHORTENING THE DURATION OF OBSERVATION OF THE SUBSTRATE HEATING KINETICS DURING MAGNETRON SPUTTERING OF A COPPER TARGET

*The kinetics of heating and cooling of the substrate during magnetron sputtering of a copper target has been investigated. A thermocouple sensor with a sensitive element in the form of a copper disk is used to study the kinetics of thermal processes on substrates. It was found that the kinetic dependence of heating is exponential. To reduce the duration of observation of this process, it is proposed to use the extrapolation of the kinetic dependence to the stationary state region. The relative extrapolation error was used as a criterion for choosing a shortened observation interval. A technique for reducing the duration of the experiment is proposed. It is universal in nature for installations similar in type and structure to the one used in this work. For its application in each practical case, it is necessary to carry out one long-term experiment in which the process of heating the substrate reaches a steady state.*

**Magnetron, target, substrate, sputtering, thermal process**

УДК 533.59

А. Н. Соколов, М. З. Щедринский, К. В. Рыбас, М. Г. Воробьев,  
В. А. Синькова, А. И. Колдыба  
Филиал АО «Корпорация „Комета“» – «НПЦ ОЭКН»

Л. Н. Розанов, М. П. Ларин  
ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого

## Стенд для исследования тепловых режимов фотоприемных устройств космического применения

*Представлено описание конструкции термовакуумного стенда для исследований тепловых режимов фотоприемных устройств. Приведены параметры применяемых измерительных приборов, вакуумная и электрическая схемы стенда. Термовакуумный стенд позволяет экспериментально моделировать различные тепловые воздействия в широком интервале температур на крупноформатные фотоприемные устройства космического применения различных типов при имитации штатных условий эксплуатации бортовой аппаратуры в части вакуумных и температурных воздействий. Термовакуумный стенд позволяет определять температуры в заданных точках конструкции фотоприемного устройства в диапазоне от 83 до 350 К, теплоприток от фоточувствительного элемента и корпуса фотоприемного устройства с учетом влияния конструкции оптической системы, давление и спектр масс газов внутри вакуумной камеры стенда в реальном времени.*

**Термовакуумный стенд, тепловой режим, фотоприемное устройство**

В составе бортовой аппаратуры космического назначения широко применяются различные ти-

пы крупноформатных фотоприемных устройств [1]. Крупноформатные фотоприемные устрой-