
УДК 621.039.55.001.4:621.3.014.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ СБОРОК ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ УТЕЧЕК ТОКА

© 2019 г. В. В. Синявский*

*Публичное акционерное общество Ракетно-космическая корпорация “Энергия”
им. С.П. Королева, Королев, Россия*

**e-mail: Viktor.Sinyavsky@rscf.ru*

Поступила в редакцию 11.09.2019 г.

После доработки 21.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

Приведены примеры появления при экспериментальных исследованиях многоэлементных термоэмиссионных электрогенерирующих сборок утечек тока между эмиттером и коллектором отдельных элементов в сборке и с коллектора через коллекторную изоляцию на корпус (массу). Выполнено моделирование распределения температур эмиттера, плотности тока и напряжения в отдельных электрогенерирующих элементах сборки при появлении утечек тока. Показано, что распределение указанных параметров зависит от номера элемента, в котором возникли утечки тока. При возникновении утечек тока необходимо определить место утечки и оценить температуры эмиттера для продолжения исследований сборки.

Ключевые слова: термоэмиссионная сборка, утечки тока, коллекторный пакет, вольт-амперные характеристики, температура эмиттера

DOI: 10.1134/S0002331019050133

В процессе проведения экспериментальных исследований многоэлементных термоэмиссионных электрогенерирующих сборок (ЭГС), называемых также электрогенерирующими каналами (ЭГК), наблюдаются обратимые и необратимые изменения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при постоянных внешних параметрах (тепловая мощность Q , давление пара цезия p_{Cs} и т.д.).

К основным причинам изменения ВАХ относятся [1]:

– внешний (относительно ЭГС) разряд в паре цезия, например, между изолированным токовыводом и массой. Он может быть объемным, поверхностным (например, по поверхности гермоввода) и в виде пробоя изоляции токовывода;

– короткое замыкание электродов (эмиттера и коллектора) отдельных электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) в ЭГС как в результате деформации эмиттерной оболочки при распухании топливного сердечника, так и в результате возникновения электро-тепловых мостиков между электродами отдельных ЭГЭ в ЭГС;

– внутренний аномальный низковольтный разряд электронного тока с коллектора или с коммутационной перемычки на эмиттер;

– снижение электрического сопротивления коллекторного пакета (КП – металл–изоляция (в паре цезия)–металл) в результате нарушения ее свойств или электрического пробоя.

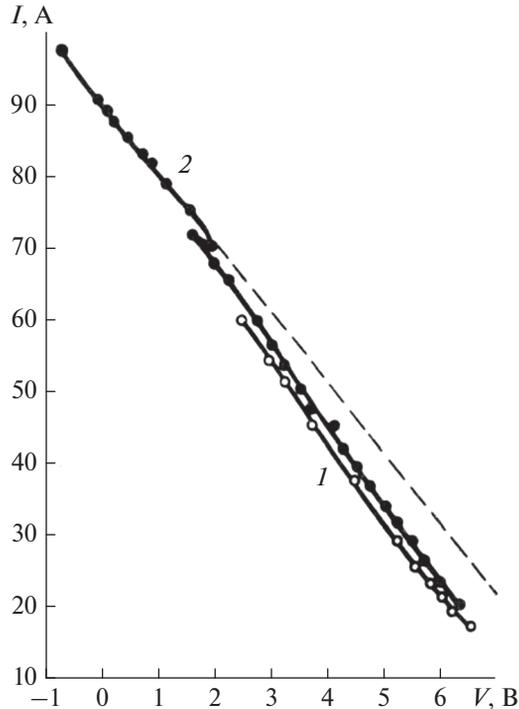


Рис. 1. Экспериментальная ВАХ ЭГС при наличии внешнего разряда: 1 – ВАХ при проведении ресурсных исследований; 2 – ВАХ, снятая до тока короткого замыкания; пунктир – восстановленная “истинная” ВАХ ЭГС [1].

ОБРАТИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Внешние, а также аномальные разряды условно можно отнести к обратимым явлениям, они могут возникать неоднократно, и задачей исследователей должна быть их идентификация и разработка предложений по их исключению или корректировке программы исследований.

Так, например, при проведении испытаний многоэлементной ЭГС в примерно оптимальной точке при напряжении $V \sim V^{\text{опт}}$ без снятия достаточно протяженной ВАХ нельзя быть уверенным, что регистрируемые рабочие напряжения V и ток I (или даже небольшой участок ВАХ вблизи рабочей точки) являются ее “истинными” характеристиками, а не некоторой “суммарной” характеристикой ее и какого-либо “паразитного” разряда. В качестве примера на рис. 1 [1] приведена ВАХ 1, т.е. типичный участок характеристики, снимаемой при проведении ресурсных испытаний, причем она снималась в интервале $V_1 < V < V_2$, где $V_1 > 0$, а $V_2 < V_{\text{х.х}}$ (напряжения холостого хода). Чтобы убедиться в том, является ли она участком “истинной” ВАХ ЭГС, необходимо снять ее до примерно тока короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$ ($V \sim 0$) или даже до $I > I_{\text{к.з}}$ ($V < 0$). Так как все внешние разряды зажимаются при приложенных напряжениях, то с большой вероятностью при $V \sim 0$ эти разряды должны погаснуть, во всяком случае внешние. Как видно из рис. 1, съем следующей ВАХ 2 до $I_{\text{к.з}}$ показал, что ВАХ 1 являлась характеристикой ЭГС, искаженной внешним разрядом. “Истинная” ВАХ при проведении этих испытаний показана штриховой линией. Соответственно, характеристики

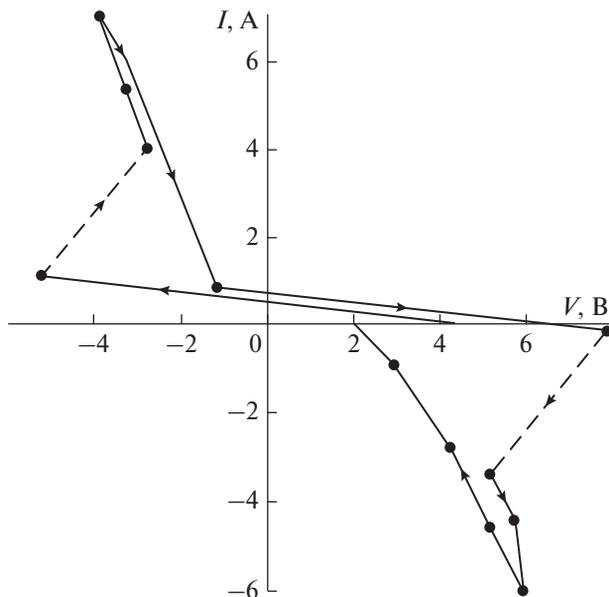


Рис. 2. Экспериментальная ВАХ многоэлементной ЭГС, снятая для идентификации разряда в паре цезия между изолированным токовыводом и массой ($T_{\text{Cs}} = 290^\circ\text{C}$; $T_{\text{н.т}} = 600\text{--}800^\circ\text{C}$). Стрелками показано направление сьема ВАХ.

исследуемой ЭГС, включая значение максимальной температуры эмиттера, должны быть оценены по “истинной” ВАХ.

Появление при $V < 0$ ($I > I_{\text{к.з}}$) разрядов, примерно симметричных относительно точки ВАХ с $V = 0$, может свидетельствовать о том, что это внешний разряд между токовыводом и массой или между коллектором и корпусом ЭГС (рис. 2).

Если напряжения поджига $V_{\text{п}}$ при положительном и отрицательном напряжениях $V_{\text{п}}^+$ и $V_{\text{п}}^-$ примерно равны, то можно говорить о близких температурах электродов, между которыми загорается разряд (при одинаковых материалах электродов). Для конкретизации вида разряда желательно получение разрядных характеристик при достаточно широком изменении p_{Cs} и температур несущей трубки (корпуса) $T_{\text{н.т}}$ ЭГС, а также и других узлов петлевого канала. Обычно расстояние между токовыводом, например, эмиттерной шиной и массой, относительно большое, равное по крайней мере нескольким миллиметрам, поэтому в соответствии с кривой Пашена будет наблюдаться возрастающая зависимость $V_{\text{п}}(p_{\text{Cs}})$, и при больших p_{Cs} разряд может не загораться даже при повышенных напряжениях.

Внутренний аномальный низковольтный разряд электронного тока с коллектора (или с коммутационной перемычки, электрически соединяющей коллектор с эмиттером соседнего ЭГЭ) на эмиттер наблюдался на начальных этапах исследований многоэлементных ЭГС с повышенной плотностью электрической мощностью [2, 3]. Из-за не отработанной технологии коллекторного пакета (КП – металл–изоляция–металл [5]) в результате термокачек термическое сопротивление КП увеличивалось и при неизменной $T_{\text{н.т}}$ температура коллектора $T_{\text{к}}$ неконтролируемо повышалась, что и приводило к аномальным разрядам (рис. 3), физика которых описана в [4].

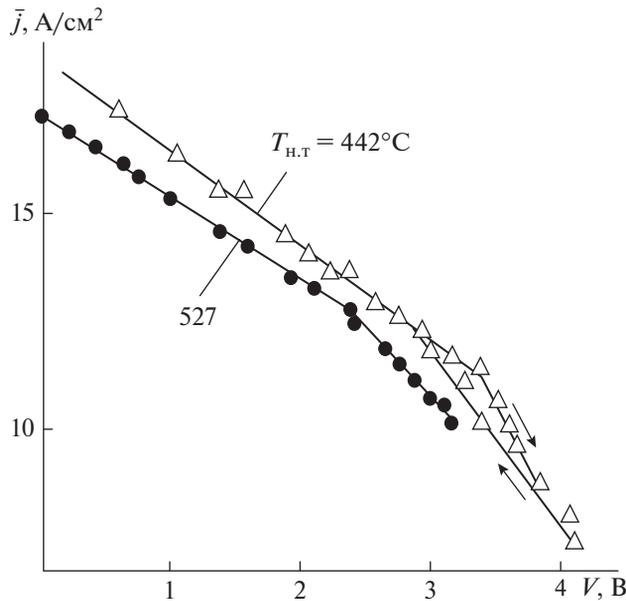


Рис. 3. Статическая ВАХ шестиэлементной ЭГС ($q = 63 \text{ Вт/см}^2$; $T_{\text{CS}} = 360^\circ\text{C}$) при появлении в одном из ЭГЭ аномальных разрядов электронного тока с коллектора на эмиттер. Стрелками показано направление сдвига ВАХ.

НЕОБРАТИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Короткие замыкания электродов и образование электротепловых мостиков между электродами отдельных ЭГЭ, а также нарушение свойств коллекторной изоляции в большинстве случаев являются необратимыми, приводящими к образованию дополнительных путей протекания тока и, следовательно, к уменьшению полезной электрической мощности на нагрузке [1, 6]. Эти явления идентифицируются из анализа вида ВАХ, прежде всего наклона статических ВАХ, и сравнением их с расчетными характеристиками (рис. 4). Однако, в каком из ЭГЭ произошло короткое замыкание и каковы характеристики остальных работоспособных ЭГЭ определить удается не всегда.

Изменение свойств изоляции КП в виде микропробоя характеризуется другой относительно рассмотренной выше зависимостью $V_{\text{п}}(p_{\text{CS}})$. Толщина коллекторной изоляции составляет обычно несколько долей миллиметра, поэтому при наличии дефекта в изоляции низкое значение $V_{\text{п}}$ (равное 2–4 В) может регистрироваться и при $p_{\text{CS}} \sim p_{\text{CS}}^{\text{опт}}$. При нахождении вблизи минимума кривой Пашена в достаточно широком диапазоне изменения может не наблюдаться зависимость $V_{\text{п}}$ от p_{CS} , а при $T_{\text{к}} > 500^\circ\text{C}$ и слабая зависимость от $T_{\text{к}}$. Кроме того, при ограниченных размерах поры или трещины в изоляции, через которую осуществляется утечка тока на массу, возможно ограничение полного тока разряда. В результате при абсолютном снижении тока на нагрузке наклон ВАХ ЭГС может почти восстановиться. Изменение статической ВАХ при появлении разряда через КП показано на рис. 5.

В связи с относительно малыми плотностями тока через дефекты изоляции часто могут отсутствовать ярко выраженные участки поджига, а появление разряда через коллекторную изоляцию будет регистрироваться через изменение наклона ВАХ. Так,

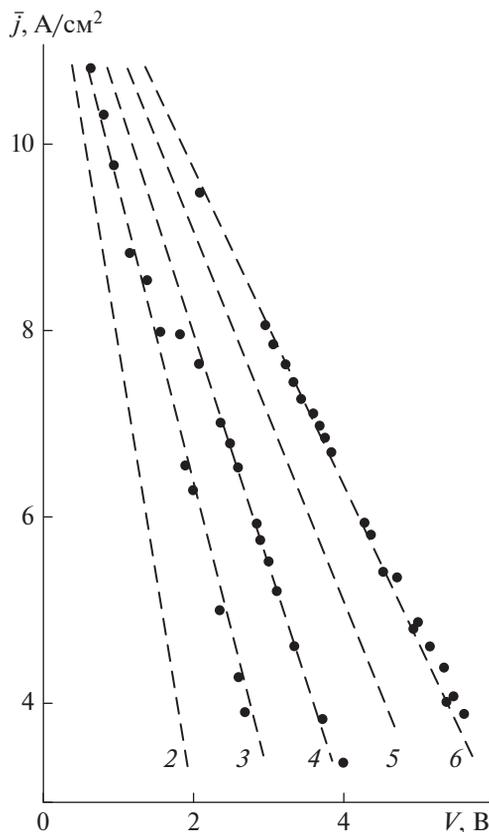


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (пунктир) статические ВАХ шестиэлементной ЭГС (цифры у кривых – число работоспособных ЭГЭ в ЭГС).

на рис. 5 показана ВАХ (кривая 3), которая при неизменных контролируемых параметрах ($Q_{\text{ЭГС}}$, p_{Cs} , $T_{\text{к}}$) стала отличаться от предыдущей ВАХ (кривая 1). Некоторое снижение тепловой мощности, а также сьем ВАХ с прямым и обратным ходом (кривая 2) с заходом в область $V < 0$ позволили определить наличие разряда. Постепенное восстановление наклона ВАХ (кривая 2) при $V = 3-4$ В позволило предположить наличие разряда через КП. Локализация места разряда осуществлялась из анализа температурных полей системы теплосброса и всех других узлов ПК, вблизи места горения разряда наблюдалось локальное повышение температуры.

В результате образования утечек тока между электродами или через коллекторную изоляцию в ЭГС реализуется различное тепловое и электрическое состояние отдельных ЭГЭ в ЭГС. В этом случае необходимо определить температуры эмиттеров всех ЭГЭ в ЭГС для обнаружения наиболее температурно-напряженного ЭГЭ, так как перегрев эмиттеров в ЭГЭ может привести к их разрушению и усугублению ситуации. С целью вывода ЭГС в безопасную область ВАХ необходимо знать тенденцию изменения распределений температуры эмиттера $T_{\text{E}}(z)$, тока $I(z)$, напряжения $U(z)$ вдоль ВАХ при различных типах утечек тока.

Причина изменения крутизны ВАХ ЭГС и место образования утечки тока определяются косвенными методами, например, по наблюдениям температурного поля корпуса ЭГС [1]. Величина сопротивления утечки оценивается из физических соображе-

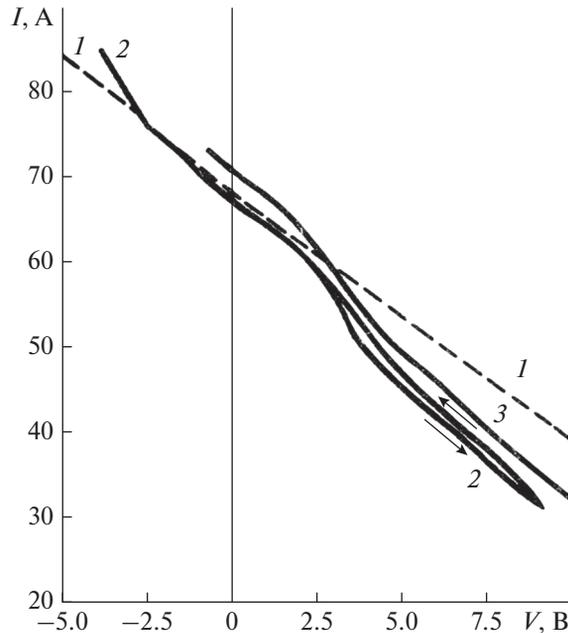


Рис. 5. Экспериментальные статические ВАХ ($T_{CS} = 360^\circ\text{C}$, $T_{HT} = 600^\circ\text{C}$) после микропробоя коллекторной изоляции: 1 – ВАХ до пробоя; 2 – ВАХ после микропробоя; 3 – ВАХ 2, снятая при более высокой тепловой мощности [1].

ний с учетом коэффициентов наклона ВАХ до и после возникновения утечки тока. Однако температуру эмиттера при проведении испытаний ЭГК непосредственно измерить невозможно, и $T_E(z)$ может быть определено лишь с помощью математического моделирования.

Необходимость проведения специального моделирования $T_E(z)$, $I(z)$ и $U(z)$ в отдельных ЭГЭ вдоль ЭГС в зависимости от координат и типа утечки тока была связана с результатами одного из исследований пятиэлементной ЭГС типа, описанной в [7]. Этим испытаниям предшествовало хранение ПК с ЭГС в вертикальном положении в течение более года в условиях, когда ПК с ЭГС был заполнен аргоном, но не был герметизирован. Вакуумное обезгаживание прошло нормально, однако после подачи пара цезия в течение примерно 100 ч происходило постепенное закорачивание отдельных ЭГЭ в ЭГС, что хорошо диагностировалось по изменению наклона статических ВАХ. С помощью нейтронной радиографии [8] был обнаружен ранее не наблюдавшийся выход через газоотводное устройство в виде трубочки с жиклером и заполнение пространства между торцами соседних ЭГЭ материалом, содержащим соединения урана.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СБОРКИ

Для моделирования распределения температур эмиттера, плотности тока и напряжений между электродами вдоль каждого ЭГЭ была использована математическая модель ЭГС, приведенная в работе [9], модернизированная для расчета характеристик с учетом утечек тока между эмиттером и коллектором и через коллекторную изоляцию.

Было выполнено исследование по влиянию утечек тока на тепловое и электрическое состояние отдельных ЭГЭ для модельного ЭГК со следующими параметрами:

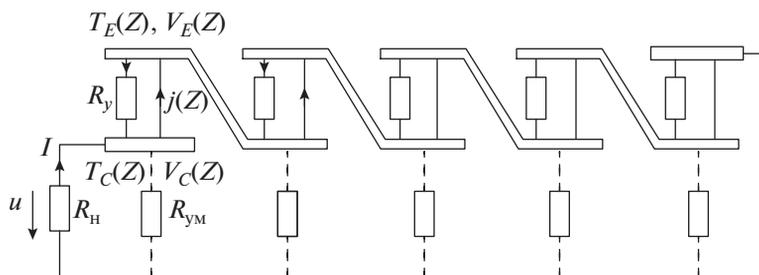


Рис. 6. Расчетная схема пятиэлементной ЭГС для моделирования температурных и электрических полей при наличии токов утечки.

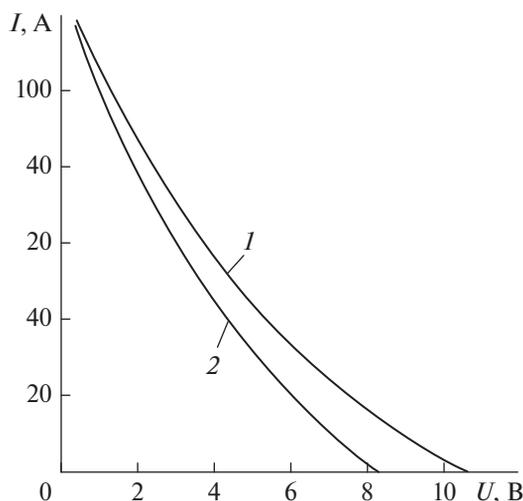


Рис. 7. Влияние появления утечки тока типа эмиттер-коллектор на ВАХ пятиэлементной сборки: 1 – исходная ВАХ; 2 – ВАХ при появлении утечки тока в третьем ЭГЭ с $R_{y3} = 0.01$ Ом.

число ЭГЭ в ЭГС $n = 5$, длина эмиттера $l_E = 30$ мм, радиус эмиттера $r_E = 5$ мм, межэлектродный зазор 0.25 мм. Распределение энерговыделения по высоте ЭГС — равномерное.

Моделирование утечек выполнялось изменением электрического сопротивления утечек между электродами R_y и через коллекторную изоляцию на массу R_{ym} в отдельном ЭГЭ в соответствии с упрощенной расчетной схемой ЭГС, приведенной на рис. 6.

ВАХ ЭГС, полученные при различных значениях сопротивления утечек R_y , представлены на рис. 7, из которого видно, что изменение R_y приводит в основном к изменению наклона интегральной ВАХ.

Полученные распределения температурного и потенциального полей до и после образования утечек тока в середине ЭГС (ЭГЭ № 3) для двух величин сопротивления нагрузки R_H , соответствующих области холостого хода и короткого замыкания, приведены на рис. 8.

При постоянном тепловыделении $q_v(z) = \text{const}$ все ЭГЭ без утечек тока работают практически в одинаковых условиях, то есть температурные и потенциальные поля отдельных ЭГЭ для соответствующих величин внешней нагрузки R_H практически совпадают.

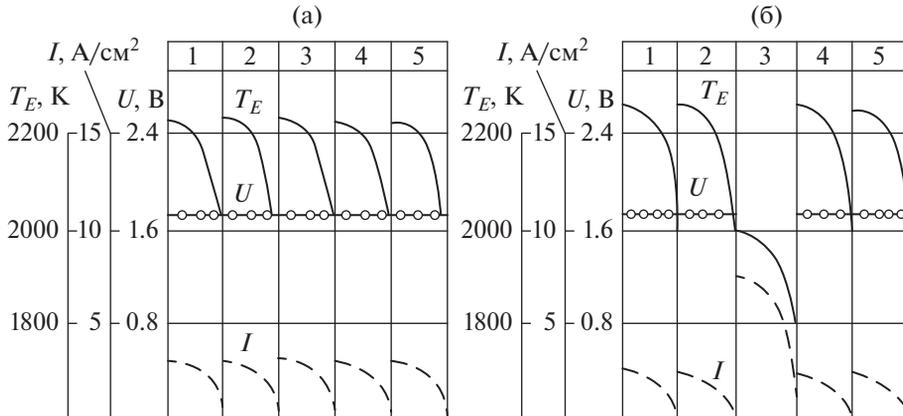


Рис. 8. Состояние пятиэлементной ЭГС в режиме холостого хода без токов утечки (а) и при сопротивлении эмиттер-коллектор в ЭГЭ № 3 $R_{y3} = 0.02$ Ом (б).

Распределения $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ в ЭГЭ при наличии утечек тока зависят от величины генерируемого напряжения. Это хорошо видно на рисунках 8 и 9, на которых изображены $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ для точек ВАХ, расположенных в области короткого замыкания ($R_H = 0.01$ Ом) и вблизи холостого хода ($R_H = 0.5$ Ом) при появлении утечки тока в третьем ЭГЭ с $R_{y3} = 0.02$ Ом. Если при $R_H = 0.01$ Ом $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ для всех ЭГЭ в ЭГС приблизительно одинаковы, то при $R_H = 0.5$ Ом наблюдается существенная неравномерность температур эмиттеров отдельных ЭГЭ в ЭГС. Это объясняется тем, что величины токов утечек зависят от напряжений, генерируемых ЭГЭ, которые в области холостого хода принимают максимальное значение. Возникновение электропроводящих мостиков между электродами приводит к снижению напряжений $U(z)$, увеличению уровня распределений $I(z)$ и, как следствие этого, уменьшению уровня $T_E(z)$ в подкороченных ЭГЭ. В остальных ЭГЭ наблюдается некоторый рост температур эмиттера, связанный со снижением тока, проходящего через нагрузку.

Обобщающие зависимости средних значений температуры эмиттера, плотности тока и напряжения ЭГЭ от сопротивления утечки тока типа эмиттер-коллектор для области холостого хода и короткого замыкания приведены на рис. 10.

Анализ рисунков показывает, что в области короткого замыкания изменение R_y слабо влияет на тепловое и электрическое состояние ЭГЭ. В области холостого хода возникновение в одном из ЭГЭ утечки тока с $R_y = 0.01$ Ом (что соизмеримо с внутренним сопротивлением ЭГЭ) приводит к снижению температуры эмиттера этого ЭГЭ примерно на 300 К, уменьшению напряжения ЭГС на 1.6 В и увеличению тока на 10 А. Повышение температуры эмиттера в остальных ЭГЭ (в связи с уменьшением общего генерируемого тока) незначительно и составляет 20...30 К.

ВЛИЯНИЕ УТЕЧЕК ТОКА ЧЕРЕЗ КОЛЛЕКТОРНУЮ ИЗОЛЯЦИЮ НА ВИД ВАХ ЭГС И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$

Рассмотрим влияние утечек тока через коллекторную изоляцию на вид ВАХ ЭГС и распределения $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$. На рис. 11 представлены ВАХ ЭГС при возникновении утечек тока по элементам ЭГС для $R_{ym} = 0.02$ Ом. Анализ графиков показывает, что наибольшее влияние на крутизну ВАХ оказывает разрушение коллекторной изоляции в области первого относительно изолированного токовывода ЭГЭ. Это связано с тем,

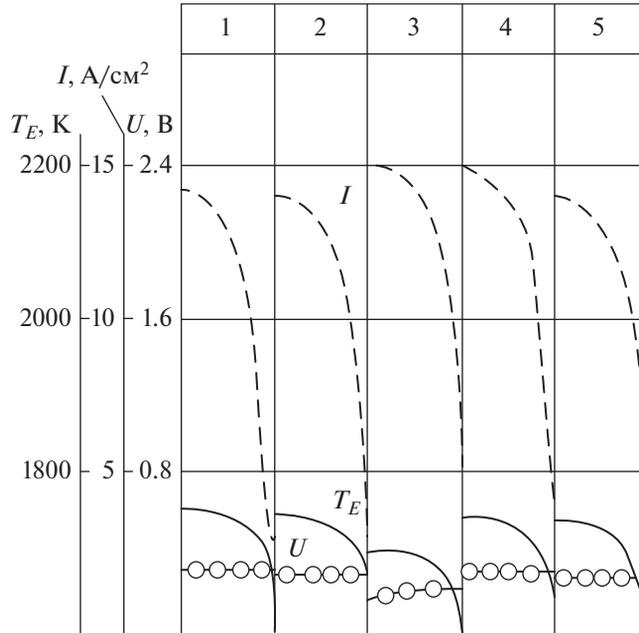


Рис. 9. Состояние пятиэлементной ЭГС в режиме короткого замыкания при сопротивлении эмиттер-коллектор в ЭГЭ № 3 $R_{y3} = 0.02$ Ом.

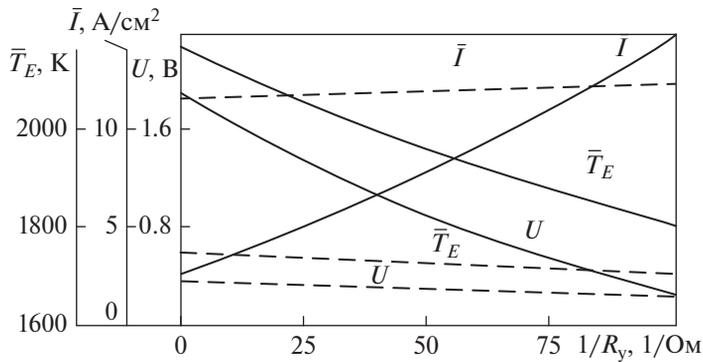


Рис. 10. Средние значения температуры эмиттера, плотности тока и напряжения от сопротивления утечки в режиме холостого хода (сплошные линии) и короткого замыкания (пунктирные линии).

что потенциал коллектора первого ЭГЭ имеет наибольшее значение в ЭГС. Разрушение коллекторной изоляции в последующих ЭГЭ в меньшей степени влияет на крутизну ВАХ ЭГС.

Распределение $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ по отдельным ЭГЭ при различных местах разрушения коллекторной изоляции для $R_H = 0.01$ Ом (область короткого замыкания) представлены на рис. 12 (а, б, в, г).

Анализ $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ в области холостого хода показывает, что они существенно зависят от места разрушения (пробоя) коллекторной изоляции. Если разрушение изоляции произошло в первом ЭГЭ, то во всех ЭГЭ наблюдается резкий рост $I(z)$, сниже-

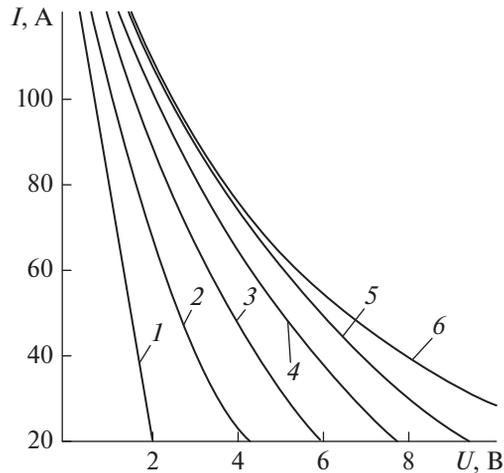


Рис. 11. Результаты моделирования влияния утечек тока с коллектора на несущую трубку (массу) на ВАХ ЭГС с одним изолированным токовыводом: 1–5 – номера ЭГЭ, где произошла утечка тока; 6 – исходное состояние.

ние $U(z)$ и $T_E(z)$. Это связано с тем, что основной ток, генерируемый ЭГС, проходит через сопротивление $R_{ум}$, и лишь небольшая его часть проходит через R_n . Уровень и форма распределений $I(z)$, $U(z)$ во всех ЭГЭ практически одинаковы, так как разрушение коллекторной изоляции в первом ЭГЭ фактически эквивалентно уменьшению сопротивления нагрузки. Разрушение изоляции в остальных ЭГЭ приводит к другим результатам, характерной особенностью которых является существенное отличие $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ по отдельным ЭГЭ в ЭГС до и после места разрушения. Так, например, при разрушенной коллекторной изоляции в третьем ЭГЭ (рис. 12в) первые два ЭГЭ работают при температурах, несколько превышающих исходный уровень, а последние три – при существенно более низких $T_E(z)$. Аналогичные результаты наблюдаются при уменьшении сопротивления коллекторной изоляции в остальных ЭГЭ.

Анализ распределений $T_E(z)$, $I(z)$, $U(z)$ в области короткого замыкания показывает, что здесь наблюдаются аналогичные явления, но более сглаженные.

Таким образом, принципиальным отличием возникновения утечек тока из-за нарушения электрических свойств КП является не только зависимость ВАХ ЭГС от места разрушения изоляции, но и одновременное существенное изменение теплового и электрического состояния всех ЭГЭ в ЭГС, что необходимо учитывать при проведении исследований и испытаний многоэлементных ЭГС. Так, образование утечки тока во втором ЭГЭ приводит к максимальному повышению температуры эмиттера над исходным уровнем и составляет примерно 100 К как в режиме холостого хода, так и в режиме короткого замыкания. Максимальная величина генерируемой плотности тока примерно в 5–6 раз превышает исходный уровень при возникновении утечки тока в первом ЭГЭ.

Обобщающим результатом проведенных исследований являются зависимости средних (или максимальных) температур эмиттера от величины сопротивления нагрузки R_n для оцененного значения $R_{ум}$. На рис. 13 приведен такой график для модельной пятиэлементной ЭГС при $R_{ум} = 0.02$ Ом.

Согласно этому рисунку для того, чтобы максимальная температура эмиттера не превышала, например, исходный уровень 2200 К ($R_n = 0.4$ Ом), при возникновении

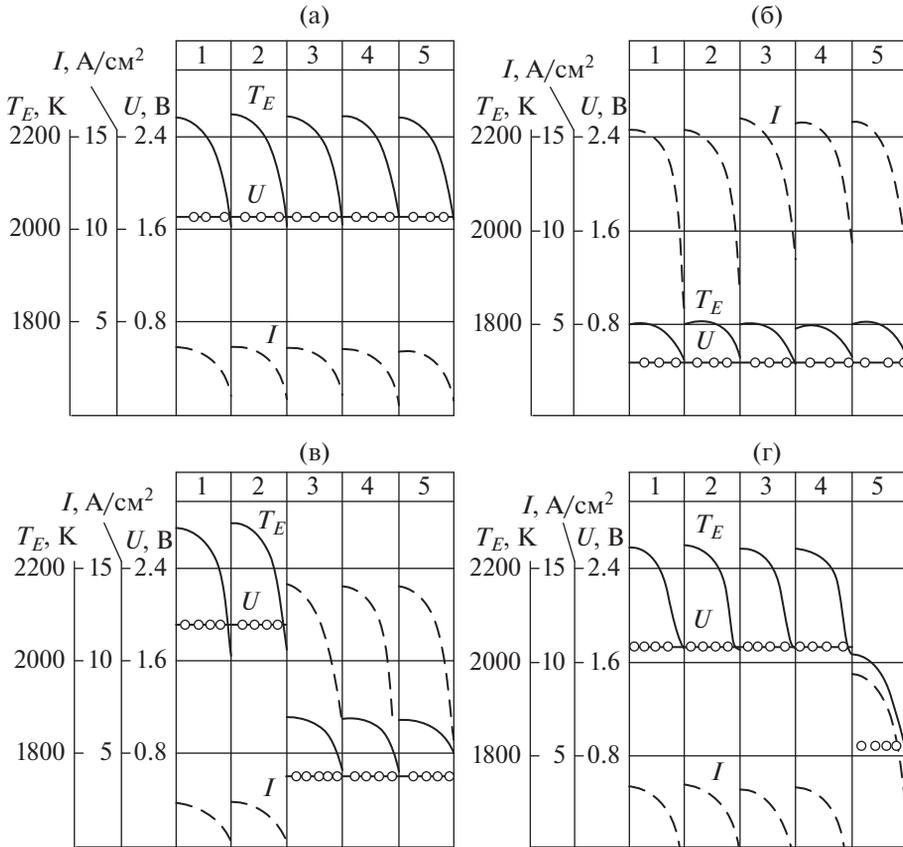


Рис. 12. Распределение температуры эмиттера, плотности тока и напряжения в пятиэлементной сборке в исходном состоянии (а) и при наличии утечки с коллектора на массу сопротивлением $R_{\text{ум}} = 0.02$ Ом в первом (б), в третьем (в) и пятом (г) ЭГЭ относительно изолированного токовывода.

утечки тока типа коллектор-масса необходимо уменьшить $R_{\text{н}}$ до 0.175 Ом. При этом произойдет перераспределение генерируемого тока между сопротивлением нагрузки и сопротивлением утечки на массу. В результате повышения тока, проходящего по ЭГС, его температурное поле снизится.

Таким образом, результаты моделирования теплового и электрического состояния ЭГС при возникновении утечек тока тина эмиттер-коллектор и коллектор-масса показывают, что для гарантированного исключения перегрева эмиттеров необходимо его перевести в область больших токов.

В заключение следует отметить, что расчеты, результаты которых приведены выше, были выполнены, к сожалению, рано ушедшим из жизни, доцентом Томского политехнического университета, кандидатом технических наук Ю.В. Бабушкиным, который является автором ряда работ по моделированию и исследованию термоэмиссионных сборок [9–13] и по существу должен быть соавтором и настоящей статьи.

ВЫВОДЫ

1. При исследованиях многоэлементных термоэмиссионных электрогенерирующих сборок имели место как появление утечек тока между эмиттером и коллектором от-

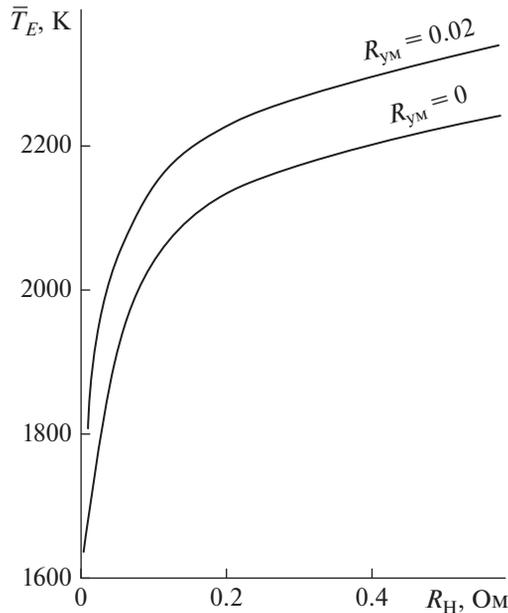


Рис. 13. Зависимость средней температуры эмиттеров ЭГС от сопротивления нагрузки R_H при отсутствии утечки на массу ($R_{ум} = 0$) и при наличии утечки с сопротивлением $R_{ум} = 0.02$ Ом.

дельных элементов в сборке, так и с коллектора через коллекторную изоляцию на корпус (массу). Приведены примеры влияния появления таких утечек на экспериментальные вольт-амперные характеристики исследуемых сборок.

2. Выполнено моделирование поведения распределения температур эмиттера, плотности тока и напряжения в отдельных электрогенерирующих элементах сборки при появлении рассмотренных утечек тока. Показано, что распределение указанных параметров зависит от номера элемента, в котором возникли утечки тока.

3. С целью возможности продолжения экспериментальных исследований сборок при возникновении утечек тока необходимо определение места утечки тока и затем расчетная оценка температуры эмиттера с целью корректировки программы для обеспечения продолжения ресурсных исследований сборок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиявский В.В. Методы определения характеристик термоэмиссионных ТВЭЛов. М.: Энергоиздат, 1990.
2. Бержатый В.И., Дружинин В.А., Коротенко М.Н., Карагозян Р.М., Каландаришвили А.Г., Карнаухов А.С., Кривонос В.Д., Менабде Н.Е., Мельников М.В., Морозов В.А., Никонов А.В., Рубанов Ю.К., Селиванов В.В., Сиявский В.В., Цецхладзе Д.Л. Реакторные испытания термоэмиссионного электрогенерирующего канала с высокой плотностью электрической мощности // Ракетно-космическая техника. Труды РКК "Энергия". Сер. 12. 1995. Вып. 3–4. С. 106–114.
3. Бержатый В.И., Карнаухов А.С., Сиявский В.В., Соболев Ю.А., Титков А.С. Реакторная отработка энергонапряженных многоэлементных электрогенерирующих каналов термоэмиссионного реактора-преобразователя космических ЯЭУ большой мощности // Ракетно-космическая техника. Ракетные двигатели и энергетические установки. М.: Изд. НИИТП. 1993. Вып. 3 (141). С. 73–86.
4. Сиявский В.В., Карнаухов А.С., Бекмухамбетов Е.С., Бержатый В.И., Джаймурзин А.А., Кузнецов И.М., Маевский В.А., Морозов В.К. Аномальные вольт-амперные характеристики,

- наблюдаемые при реакторных испытаниях многоэлементных термоэмиссионных сборок // Журнал технической физики. 1976. Т. 46. Вып. 9. С. 1895–1900.
5. Рыжков А.Н., Савлов Н.А., Альмамбетов А.К., Великанович Р.И., Иевлева Ж.И., Куцова Г.А., Прилежайева И.Н., Трещалин М.А., Ларионов Ю.П., Сinyaевский В.В. Разработка и исследование коллекторного пакета энергонапряженных высоковольтных термоэмиссионных сборок // Ракетно-космическая техника. Труды РКК “Энергия”. Сер. 12. 2003. Вып. 1–2. С. 197–210.
 6. Ярыгин В.И. Петлевые испытания термоэмиссионных электрогенерирующих каналов в реакторе АМ // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2014. № 4. С. 21–30.
 7. Сinyaевский В.В., Цецхладзе Д.Л., Бекмухамбетов Е.С., Карагозян Р.М., Карнаухов А.С., Кривоносов С.Д., Менабде Н.Е. Разработка, создание и реакторные испытания электрогенерирующих сборок с жесткими габаритными ограничениями для термоэмиссионного реактора-преобразователя на быстрых нейтронах с высокой плотностью электрической мощности // Ракетно-космическая техника: Труды РКК “Энергия”. Сер. 12. 1995. Вып. 3–4. С. 96–105.
 8. Бекмухамбетов Е.С., Карнаухов А.С., Корнилов В.А., Сатпаев К.К., Сinyaевский В.В. Нейтронографические исследования термоэмиссионных ЭГК при петлевых реакторных испытаниях тока // Ракетно-космическая техника: Труды. Сер. XII. Вып. 2–3. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем / Под ред. Сinyaевского В.В. Калининград, Моск. обл.: РКК “Энергия”, ОНТИ, 1996. С. 113–131.
 9. Бабушкин Ю.В., Мендельбаум М.А., Савинов А.П., Сinyaевский В.В. Алгоритм расчета кинетических характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1981. № 2. С. 115–122.
 10. Бабушкин Ю.В., Сinyaевский В.В. Численное моделирование температурных и электрических полей электрогенерирующих каналов при возникновении утечек тока // Ракетно-космическая техника: Труды. Сер. XII. Вып. 3–4. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем / Под ред. Сinyaевского В.В. Калининград, Моск. обл.: РКК “Энергия”, ОНТИ, 1995. С. 136–144.
 11. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П., Сinyaевский В.В. Моделирующая система КОРТЕС для исследования тепловых и электрических процессов в термоэмиссионных системах преобразования энергии // Ракетно-космическая техника: Труды. Сер. XII. Вып. 1–2. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем / Под ред. Сinyaевского В.В. Калининград, Моск. обл.: РКК “Энергия”, ОНТИ, 1998. С. 60–78.
 12. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Математическое обеспечение программного комплекса для моделирования термоэмиссионных систем // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 1. С. 51–55.
 13. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Методы расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 2. С. 135–139.

Simulating Thermal and Electrical Fields of Multielement Thermionic Power-Generating Assemblies Arising from Current Leakages

V. V. Sinyavskiy*

Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

**e-mail: Viktor.Sinyavsky@rscs.ru*

The paper cites examples of occurrences of current leakages between the emitter and the collector of individual elements in the assembly and from the collector through the collector insulation to the chassis during experimental reactor studies of multi-element thermionic power-generating assemblies. Simulations were run of the distributions of emitter temperatures, current density, and voltages in individual power-generating elements of the assembly resulting from occurrences of current leakage. It was demonstrated that the distribution of the above parameters depends on the number of the element where the current leakages occurred. When current leakages occur it is necessary to find the location of the leakage point and evaluate the temperatures of the element emitters in order to continue the studies of the assemblies.

Keywords: Thermionic assembly, current leakages, collector pack, current-voltage characteristics, emitter temperature