

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.385.6

### ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НА СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МНОГОЛУЧЕВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ МОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ

© 2020 г. Д. А. Комаров<sup>а</sup>, С. П. Масленников<sup>б</sup>, Е. П. Якушкин<sup>а</sup>, Ю. Н. Парамонов<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup>Научно-производственное предприятие “Торий”,  
ул. Обручева, 52, Москва, 117393 Российская Федерация

<sup>б</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Российская Федерация

\*E-mail: npp@toriy.ru

Поступила в редакцию 22.06.2018 г.

После доработки 15.07.2018 г.

Принята к публикации 14.08.2018 г.

Рассмотрены вопросы влияния внешних электрических цепей на работу области коллектора с нестационарным интенсивным электронным потоком. Показано, что наличие емкости коллектора и индуктивности внешней цепи при определенных условиях могут приводить к появлению больших тормозящих значений напряжения и к ухудшению выходных параметров клистрона. Представлены результаты экспериментальных исследований.

DOI: 10.31857/S0033849420030080

#### ВВЕДЕНИЕ

Нестационарные процессы в коллекторах мощных внешних электрических цепей СВЧ (ЭВП СВЧ) анализировались во многих работах (см., например, [1–3]). При рассмотрении нестационарного движения сгруппированного электронного потока в коллекторной области с учетом поля объемного заряда основным исходным допущением математических моделей являлось задание на границе области постоянного во времени распределения электростатического потенциала. Однако в соответствии с теоремой Шоки–Рамо [4] при движении заряда в эквипотенциальном пространстве на электродах возникают наведенные токи, а поскольку любая конфигурация электродов в электростатическом поле характеризуется электрической емкостью, то наряду с переносом заряда в вакууме наблюдается зарядка электростатической емкости наведенными токами. Это означает, что условие постоянства потенциалов, принятое в рассматриваемых моделях, имеет точное физическое условие выполнимости: время релаксации наведенного напряжения должно быть меньше, чем период следования сгустков. В то же время выполнение этого условия совсем не очевидно при наличии индуктивности внешней цепи питания и емкости самого коллектора и требует дополнительного исследования, которое не было проведено до настоящего времени.

Вместе с тем сколь-нибудь существенное влияние подобных эффектов должно наблюдаться

для сильноточных систем, поэтому цель данной работы – провести такие исследования для многолучевых клистронов.

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим две основные задачи, связанные с взаимодействием электронного потока в коллекторной области:

1) взаимодействие одиночного сгустка в пространстве резонаторный блок–коллектор с учетом омического сопротивления внешней цепи и с учетом собственной индуктивности коллектора и внешних цепей,

2) взаимодействие системы сгустков в условиях тех же цепей питания.

Предположим, что сгусток является точечным объектом, т.е. принимается, что длительность сгустка много меньше периода следования. Влияние наведенного напряжения на динамику сгустка не рассматривается. Используя теорему Шоки–Рамо, запишем наведенный ток точечного заряда, создаваемый сгустком, движущимся в пространстве между резонаторным блоком и коллектором с постоянной скоростью в виде

$$i_{\text{нав}}(t) = \frac{qv}{d}(\eta(t) - \eta(t - \tau)), \quad (1)$$

где  $q$ ,  $v$  – заряд и скорость сгустка,  $d$ ,  $\tau$  – длина и время пролета соответственно, а функция  $\eta(t)$  есть функция Хевисайда. Первый множитель в (1)

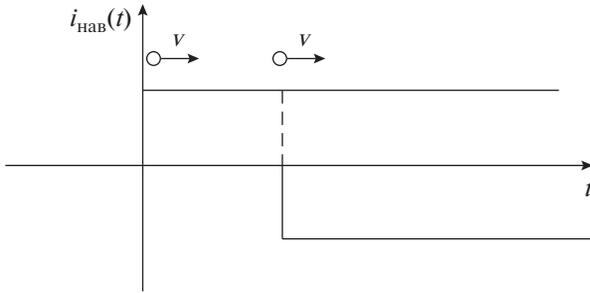


Рис. 1. Наведенный ток в цепи коллектора.

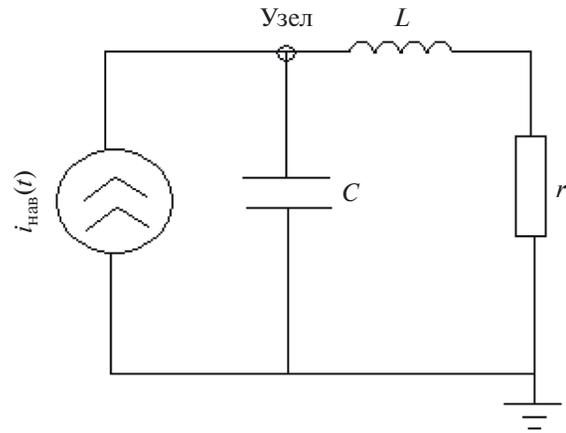


Рис. 2. Эквивалентная схема коллектора.

определяет некоторый постоянный ток сгустка  $I_0$ , а функция Хевисайда определяет появление импульса наведенного тока в момент времени влета сгустка в коллектор (он принимается нулевым моментом) и окончание импульса наведенного тока в момент времени, когда сгусток достигает коллектора (рис. 1).

Перейдем от оригинала (1) к изображению по Лапласу в плоскости комплексного переменного:

$$I(s) = \int_0^{\infty} i_{\text{наб}}(t) \exp(-st) dt. \quad (2)$$

Тогда после подстановки (1) в (2) и интегрирования изображение наведенного тока будет иметь вид

$$I(s) = I_0 \frac{1 - \exp(-st)}{s}. \quad (3)$$

Пролет сгустком емкостного зазора с учетом внешней цепи питания может быть легко представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 2). Для потенциала узла в пространстве изображений справедливо уравнение

$$\varphi_1(s) \left( sC + \frac{1}{r + sL} \right) = I(s). \quad (4)$$

Изображение напряжения на зазоре в произвольный момент времени можно записать в следующем виде:

$$U(s) = I_0 \frac{r + sL}{s(LCs^2 + rCs + 1)} - I_0 \frac{r + sL}{s(LCs^2 + rCs + 1)} \exp(-st). \quad (5)$$

Используя теорему разложения и теорему записывания, легко определить оригинал выражения (5) во временной области:

$$u(t) = u_1(t) - u_1(t - \tau), \quad (6)$$

где  $U_1(s) = I_0 \frac{r + sL}{s(LCs^2 + rCs + 1)}$ .

После элементарных преобразований выражение, определяющее наведенное напряжение на зазоре коллектора, запишем в следующем виде:

$$u_1(t) = \sum_{i=1}^3 I_0 \operatorname{Re} s(U_1(s), s_i) \exp(s_i t),$$

$$s_1 = 0,$$

$$s_{2,3} = \frac{-rc \pm \sqrt{r^2 C^2 - 4LC}}{2LC},$$

$$\operatorname{Re} s(U_1(s), s_1) = \frac{r}{LCs_3 s_2}, \quad (7)$$

$$\operatorname{Re} s(U_1(s), s_2) = \frac{r + s_2 L}{LCs_2 (s_2 - s_3)},$$

$$\operatorname{Re} s(U_1(s), s_3) = \frac{r + s_3 L}{LCs_3 (s_3 - s_2)}.$$

Окончательно оригинал напряжения на коллекторе имеет вид

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 I_0 \operatorname{Re} s(U_1(s), s_i) \exp(s_i t), & 0 \leq t < \tau \\ I_0 \operatorname{Re} s(U_1(s), s_2) \exp(s_2 t) (1 - \exp(-s_2 \tau)) + \\ + I_0 \operatorname{Re} s(U_1(s), s_3) \exp(s_3 t) (1 - \exp(-s_3 \tau_0)), & \tau \leq t. \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотрим возбуждение коллектора последовательностью точечных сгустков. Очевидно, что необходимо только найти аналитическую функцию тока и ее изображение, а соотношения (4) для наведенных напряжений сохранятся. Будем считать, что сгустки поступают в зазор с некоторой постоянной времени следования  $T_c$ , которая в общем случае находится в произвольном отношении к времени пролета.

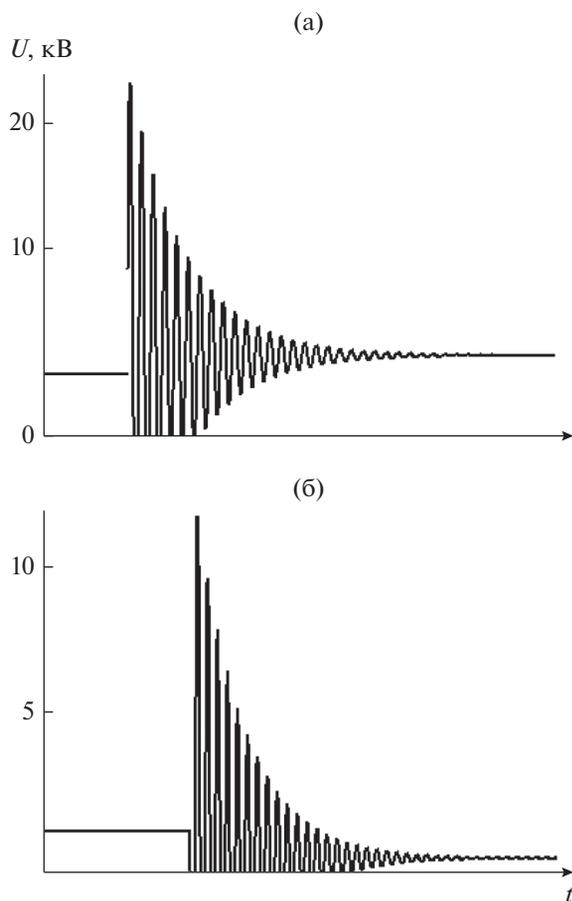


Рис. 3. Наведенное напряжение на коллекторе в статическом режиме при токе 150 (а) и 90 А (б).

Чтобы получить общую временную картину, не рассматривая конкретные интервалы времени, преобразуем соотношение (8) к следующему виду:

$$u(t) = u_1(t)\eta(t) - u_1(t - \tau)\eta(t - \tau). \quad (9)$$

Формула (9) дает общий вид зависимости в любой временной точке. Как видим, результат воздействия сгустка есть суперпозиция двух напряжений, возникших под действием единичного наведенного тока, сдвинутых во времени на  $\tau$ . Тогда можно сразу же написать выражение для наведенного напряжения системой зарядов в виде

$$u(t) = \sum_{i=1}^N (u_1(t - (i-1)T_s)\eta(t - (i-1)T_s) - u_1(t - (i-1)T_s - \tau)\eta(t - (i-1)T_s - \tau)),$$

где  $u_1(t)$  определяется соотношениями (6).

Рассмотрим возбуждение коллектора в статическом режиме с учетом индуктивности внешней цепи, т.е. возбуждение импульсом тока катода в отсутствие модуляции по плотности. Отличительной особенностью данной задачи от предыдущей состоит в том, что здесь нет необходимости учиты-

вать наведенный ток (время пролета сгустка много меньше длительности импульса  $\tau_{\text{имп}}$ ), а временной постоянной является сама длительность токового импульса. Решение может быть представлено в следующем виде:

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 I_{\text{имп}} \operatorname{Re} s(U_1(s), s_i) \exp(s_i t), & 0 \leq t < \tau_{\text{имп}} \\ I_{\text{имп}} \operatorname{Re} s(U_1(s), s_2) \exp(s_2 t) \times \\ \times (1 - \exp(-s_2 \tau_{\text{имп}})) + I_{\text{имп}} \operatorname{Re} s(U_1(s), s_3) \times \\ \times \exp(s_3 t) (1 - \exp(-s_3 \tau_{\text{имп}})), & \tau_{\text{имп}} \leq t. \end{cases}$$

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала рассмотрим возбуждение коллектора импульсом тока в статическом режиме при емкости коллектора 30 пФ.

Характерной особенностью статического режима работы, как показали расчеты, являлся так называемый “дребезг” на фронте импульса, связанный с возбуждением колебательного контура. Время затухания этого “дребезга” полностью определено сопротивлением и индуктивностью цепи. С учетом малого сопротивления заземляющих элементов это время составило до  $0.15\tau_{\text{имп}}$ . Амплитуда выбросов полностью определена емкостью коллектора. На рис. 3а представлены результаты расчета статического режима при токе 150 А. Анализ рис. 3а показал, что величина первоначальных выбросов на фронте импульса составляла свыше 25 кВ. Значение напряжения на полке импульса определено током в импульсе и сопротивлением внешней цепи.

Очевидно, что подобные выбросы должны приводить к пробоям в цепи коллектора и нестабильности работы прибора в статическом режиме. Очевидным улучшением ситуации должно быть увеличение емкости коллектора до значения 700 пФ. При этом, как следовало из расчетов, выбросы напряжения уменьшились до 5...6 кВ.

Интересно проследить зависимость наведенного напряжения от величины тока. При токе катода, равном 90 А, даже при значении емкости 10 пФ, максимальные выбросы напряжения не превышали 12 кВ (рис. 3б), и небольшое увеличение емкости полностью снимало “дребезг” цепи коллектора. Критической величиной тока катода при емкостях 10...40 пФ являлось значение 100 А.

Исходными данными для расчета наведенных напряжений в динамическом режиме работы прибора являлись: импульсный ток клистрона  $I$ , частота следования сгустков  $f_g$ , длительность импульса тока  $\tau_i$ , скорость зарядов  $v$ , время пролета  $\tau$  и параметры цепи питания.

Суммарный заряд в импульсе определялся соотношением  $Q = I\tau_i$ , а заряд одного сгустка – соотношением  $q = Q/N$  ( $N$  – число сгустков в токовом импульсе, определяемое частотой следования). Скорость зарядов определена напряжением катода  $U_k$  и равна

$$v = \sqrt{\frac{2eU_k}{m_e}}$$

На рис. 4 представлена иллюстрация процесса возбуждения коллектора одиночным сгустком, параметры цепи составляли 30 пФ, 1 мкГн и 10 Ом.

За время пролета сгустка наведенное напряжение (2.5 кВ) не претерпевало никаких изменений, что являлось следствием инерционного действия индуктивного элемента. Затухающие колебания внешней цепи имели существенно больший период (рис. 4а). Таким образом, следующий сгусток, влетевший в коллекторную область, наводил ровно такую же величину напряжения относительно первичного.

Из анализа рис. 4б следует, что суммирование напряжений может приводить к катастрофическому увеличению напряжения на коллекторе. Расчеты показали, что наблюдались характерные уступы напряжения, обусловленные с влетом каждого следующего сгустка в наведенное поле предыдущих сгустков, а максимальное наведенное напряжение после пролета 100 сгустков составляло 45 кВ (см. рис. 4б). Установившееся значение напряжение релаксировало к 42 кВ после пролета 500 сгустков. Очевидно, что такие уровни напряжений создавали потенциальный барьер для сгустков и фактически образовывали область виртуального катода, отражение от которого приводило к появлению обратных электронов и ухудшению выходных характеристик клистрона. Как и в предыдущем случае, существенное улучшение ситуации достигалось за счет увеличения емкости коллектора до значений более 500 пФ.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние внешней цепи питания и действие наведенного тока в коллекторной области было обнаружено экспериментально на клистроне КИУ-271, параметры которого следующие: напряжение катода 45 кВ, ток катода (импульсный) 150 А, длительность импульса 7 мкс, режим питания – анодная модуляция, тип источника питания – модулятор на формирующей линии. Непосредственное измерение емкости коллектора измерителем иммитансов Е7-20 дало значение 34 пФ, индуктивность внешней цепи заземления составила 2 мкГн.

В статическом режиме работы прибора было зафиксировано резкое искажение импульса мо-

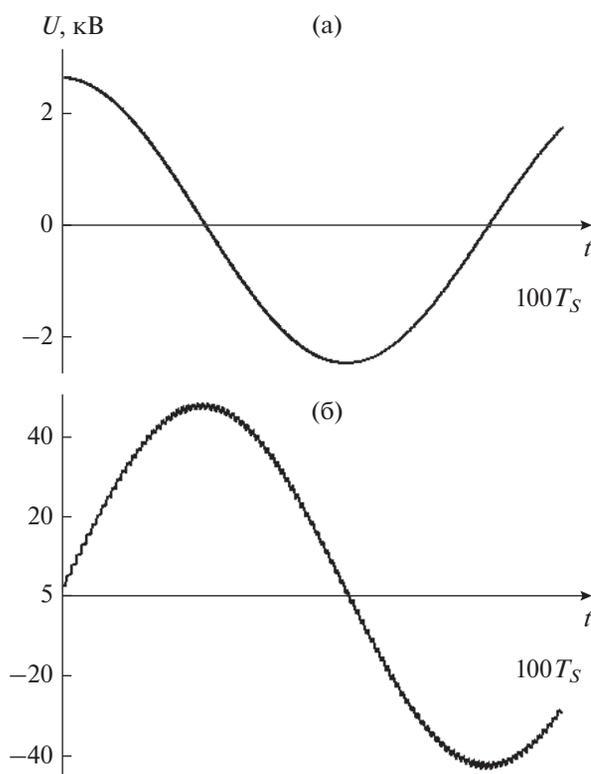


Рис. 4. Наведенное напряжение при пролете одного сгустка (100 периодов следования) (а) и при пролете системы сгустков (б).

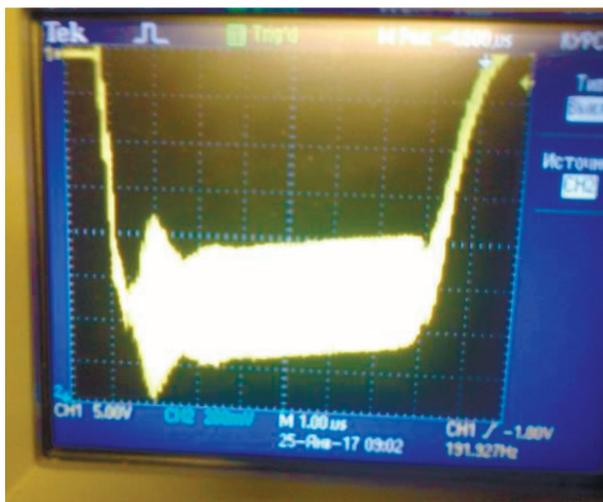
дулятора (рис. 5а) и горение разряда в области изолятора коллектора между резонаторным блоком и коллектором, находящимися под потенциалом земли.

Наиболее очевидным влиянием наведенного напряжения в коллекторной области являлось резкое снижение коллекторного тока при превышении тока катода более 100 А, что связано с отражением электронов от потенциального барьера.

На рис. 6 представлена зависимость токопрохождения от приведенной емкости коллектора. Увеличение емкости в эксперименте осуществляли с помощью конденсаторов КВИ-3 номиналом 470 пФ, подключенных между резонаторным блоком и коллектором. При этом следует отметить, что улучшение токопрохождения вплоть до 90% обеспечивалось без всякой дополнительной юстировки прибора. Косвенными данными улучшения режима работы прибора являлось отсутствие искрений в области изолятора коллектора, а также отсутствие искажений модулирующего импульса (рис. 5б).

Полученные экспериментальные данные хорошо соответствовали теоретическим выводам.

(a)



(б)

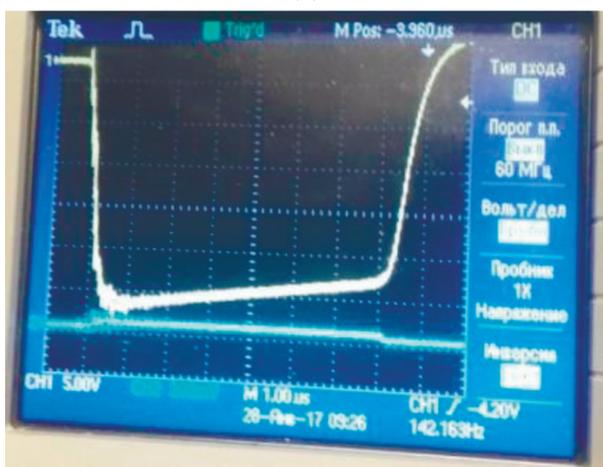


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на модуляторе до увеличения емкости (а) и после (б).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые рассмотрено влияние внешних электрических цепей на выходные параметры мощных клистронов. На основании полученных экспериментальных данных сделан вывод, что предельно достижимые параметры приборов могут быть существенно ограничены обнаруженным эффектом воздействия внешней цепи. Тем

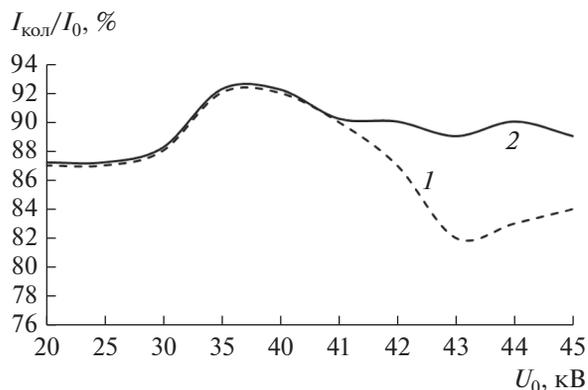


Рис. 6. Зависимость токопрохождения от приведенной емкости коллектора: 1 – без емкостей, 2 – с емкостями.

самым, это фактически усложняет решение задачи электромагнитной совместности ЭВП СВЧ и аппаратуры.

Сопоставление результатов анализа взаимодействия сильноточного электронного пучка в коллекторной области с учетом внешних цепей и экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

1) проектирование коллектора многолучевых клистронов целесообразно проводить на основе нестационарной и самосогласованной математической модели коллектора с учетом влияния на режим работы индуктивности и емкости как самого коллектора, так и внешней цепи питания;

2) для устойчивой работы многолучевого клистроны нецелесообразно уменьшать величину емкости коллектора ниже 500 пФ при суммарных токах катода в импульсе, превышающих 90 А.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И. и др. // Изв. РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
2. Филатов Р.А., Храмов А.Е., Трубецков Д.И. // Электрон. волны и электромагнитные системы. 2007. Т. 10. № 12. С. 20.
3. Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 12. С. 80.
4. Герштейн Г.М. Моделирование полей методом электростатической индукции. М.: Наука, 1970.