

**АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ АН УКРАИНЫ**

На правах рукописи

УДК 621.373.01

621.384.644

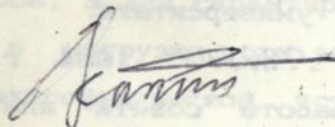
СОВКО Леонид Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ
ТРАНЗИСТОРНЫХ ВЧ ГЕНЕРАТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
В ТЕХНИКЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

(01.04.01 - техника физического
эксперимента, физика приборов, автоматиза-
ция исследований)

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук.**



Сумы - 1994





Ав 29.560

Работа выполнена в Институте прикладной физики
АН Украины, г. Сумы

Научный руководитель:

д. т. н. Савченко И. С., Институт прикладной
физики, г. Сумы.

Официальные оппоненты:

1. Д. ф. - м. н., профессор Репалов Н. С., Харьковс-
кий физико-технический институт, г. Харьков;
2. Д. т. н., профессор Володченко Г. С., Сумский
государственный университет, г. Сумы.

Ведущая организация: -НИИ электронной
микроскопии, г. Сумы.

Защита диссертации состоится "12" мая... 1994 г.
в 15⁰⁰ часов на заседании специализированного
совета К22.01.01 в Сумском государственном уни-
верситете в аудитории ЭТ-216.

Адрес: 244007, Сумы, ул. Римского-
Корсакова, 2, тел: 33-34-65

С диссертацией можно ознакомиться в библио-
теке Сумского государственного университета.

Автореферат разослан "08" апреля... 1994 г.

Просим принять участие в работе совета или
прислать отзыв в одном экземпляре, заверенном
печатью организации.

Ученый секретарь спецсовета

К22.01.01, к. ф. - м. н.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Флат А. Я.

В данной работе рассмотрены и исследованы вопросы применения в технике физического эксперимента мощных резервированных транзисторных ВЧ генераторов.

Актуальность темы. ВЧ генераторы являются одним из наиболее распространенных узлов электрофизических установок. Традиционно выходные каскады ВЧ генераторов выполнялись с применением ламп. В настоящее время достигнуты значительные успехи в конструировании мощных радиочастотных полупроводниковых приборов. Обладая рядом неоспоримых преимуществ перед электровакуумными приборами (надежность, стойкость к механическим воздействиям, мгновенная готовность к работе), они составляют ощутимую конкуренцию электровакуумным приборам, особенно для автономных систем ВЧ питания с жестким ограничением по весо-габаритным показателям. Для достижения уровней мощностей ВЧ колебаний 1...100 кВт используют суммирование мощностей отдельных транзисторных ВЧ генераторов, а для гарантированного обеспечения мощности в нагрузке, при заданной надежности работы электрофизической установки, необходимо избыточное количество M резервных генераторов. В ряде

случаев, например, в системе ВЧ питания линейного ускорителя ионов, требования к стабилизации амплитуды ВЧ поля в резонаторе очень высокие ($\sim 0,1\%$). Хотя схемотехническим реализациям перечисленных выше требований (стойкость к механическим воздействиям, суммирование мощностей, возможность резервирования, стабилизация выходных параметров, минимизация весо-габаритных показателей) посвящено большое количество работ, в настоящее время трудность разработки ВЧ генераторов для электрофизических установок состоит в том, что хорошо развитые способы суммирования мощностей ВЧ генераторов практически не решают вопросы их резервирования, и тем более стабилизации выходных параметров резервированной системы ВЧ генераторов.

Целью работы является совершенствование возможностей метода суммирования мощностей транзисторных ВЧ генераторов в общей резонансной нагрузке (резонатор линейного ускорителя). В связи с этим, программа исследований была ориентирована на решение следующих основных вопросов:

а) Теоретический анализ эквивалентной схемы согласования N основных и M резервных генераторов общей резонансной нагрузкой, определение условий оптимального согласования;

б) Оптимизация резервированной системы ВЧ

питания по весо-габаритным показателям введением начальной расстройки общей резонансной нагрузки;

в) Анализ поведения резервированной системы ВЧ при отказах генераторов;

г) Численное моделирование переходных процессов при отработке ступенчатого возмущения релейной системой авторегулирования с синфазно/противофазной коммутацией дополнительной ВЧ мощности;

д) Разработка и конструирование базового варианта транзисторного ВЧ генератора;

е) Экспериментальное подтверждение полученных теоретических результатов.

Методика исследования состоит в теоретическом анализе эквивалентной схемы мощного резервированного транзисторного ВЧ генератора, применении численного моделирования для анализа переходных процессов и экспериментальной проверки результатов анализа.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Получены аналитические выражения для условий оптимального согласования резервированного транзисторного ВЧ генератора с общей резонансной нагрузкой.

2. Показано, что при введении начальной рас-

стройки резонатора гарантированно обеспечивается мощность в нагрузке при минимальном количестве резервных генераторов. Получено ее аналитическое выражение.

3. Получено теоретическое обоснование возможности обеспечения прецизионной точности ($\sim 0,1\%$) стабилизации амплитуды ВЧ полей в резонаторе линейного ускорителя ионов путем синфазно/противофазной коммутации мощности резервных транзисторных ВЧ генераторов.

Практическая ценность заключается в разработке и конструкторско-технологической проработке базового образца транзисторного ВЧ генератора, позволяющей использовать его в качестве исходного элемента для дальнейшего наращивания мощностей. Применение полученных аналитических выражений для условий оптимального согласования и вводимой начальной расстройки резонатора позволит разработчику и исследователю использовать меньшее количество избыточных генераторов для гарантированного обеспечения требуемого уровня мощности в нагрузке при заданной надежности. По результатам теоретических расчетов и выполненных в диссертации экспериментов сделаны конкретные выводы о применимости мощных резервированных транзисторных ВЧ генераторов в технике физи-

ческого эксперимента.

Апробация работы. Апробация материалов диссертации проведена на научно-технической конференции в Сухумском физико-техническом институте в 1988г., на Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям заряженных частиц в г. Харькове в 1989г. и на научных семинарах в Институте прикладной физики АН Украины (г. Сумы).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах (одна статья и четыре авторских свидетельства на изобретения).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка цитируемой литературы, включающего 85 наименований работ. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунок и 9 таблиц.

Основные положения, представляемые к защите.
Автор защищает результаты работ по теоретическому и экспериментальному исследованию мощного резервированного транзисторного ВЧ генератора:

1. Аналитические выражения для условий оптимального согласования N транзисторных ВЧ генераторов при работе на общую резонансную нагрузку.

2. Аналитическое выражение для начальной расстройки резонансной нагрузки, вводимой с

целью уменьшения количества резервных генераторов для гарантированного обеспечения требуемого уровня мощности в нагрузке.

3. Способ резервирования транзисторных ВЧ генераторов при их работе на общую резонансную нагрузку, обеспечивающий меньшее количество избыточных генераторов.

4. Возможность обеспечения прецизионных точностей стабилизации амплитуды ВЧ полей в резонаторе линейного ускорителя ионов ($\sim 0.1\%$) при синфазно/противофазной коммутации избыточно установленной (резервной) мощности транзисторных генераторов.

5. Конструкцию базового образца транзисторного ВЧ генератора и результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретический анализ.

Содержание работы. На основе анализа современного состояния полупроводниковой элементной базы проведена конструкторская и технологическая проработка модуля транзисторного ВЧ генератора, отвечающего требованиям минимизации весо-габаритных показателей при дальнейшем суммировании мощностей ВЧ генераторов. При разработке мощных транзисторных ВЧ генераторов, применяемых в технике физического эксперимента, предлагается

использовать N основных и M резервных идентичных генераторов, суммирование мощностей которых производится в общей резонансной нагрузке (например, в резонаторе линейного ускорителя).

Особенностью анализируемой схемы является отсутствие явно выраженных избирательных цепей в коллекторах ВЧ генераторов. Пересчитанные к выходному сечению транзистора импедансы всех остальных $(N+M-1)$ ВЧ генераторов, представляют собой резонансную нагрузку на рабочей частоте для каждого генератора.

В этом случае, при комплексно-сопряженном согласовании сопротивлений для сечений, в которых $Jm[Z]=0$, а $Re[Z]=r$, определены условия оптимального согласования (передача максимальной мощности) N ВЧ генераторов при работе на общую резонансную нагрузку:

$$W \operatorname{tg} \theta = X - \frac{NRX}{n^2 r}; \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{n^2 X}{NRr} - \frac{X}{r^2} - \frac{1}{X}, \quad \text{где:}$$

$W, \operatorname{tg} \theta$ - волновое сопротивление и электрическая длина согласующей линии;

r - внутреннее сопротивление единичного генератора;

X - реактивное сопротивление выходной емкости транзистора;

R - шунтовое сопротивление нагрузки на резонансной частоте;

n - коэффициент трансформации.

Мощность в нагрузке при выполнении вышеприведенных условий оптимального согласования для N генераторов равна NP_1 .

В автономных системах необходимая мощность NP_1 должна быть обеспечена в нагрузке с учетом требований по надежности, предъявляемых к системе ВЧ питания (наработка на отказ, время безотказной работы и т. п.). То есть, автономная система ВЧ питания должна обладать избытком (M) генераторов.

Качественный анализ показывает, что при настройке всех $N+M$ генераторов на режим отдачи максимальной мощности, после отказа M генераторов из-за рассогласования, мощность в нагрузке окажется ниже уровня NP_1 .

Очевидно, что при таком подходе, для гарантированного обеспечения требуемого уровня мощности, при отказе M ВЧ генераторов, потребуется их избыток $M^* > M$, что приведет к ухудшению весогабаритных показателей системы ВЧ питания.

Исключить это противоречие предлагается предварительной расстройкой резонансной нагрузки с таким расчетом, чтобы при отказе M ВЧ генераторов оставшееся количество работающих N генера-

торов оказались в режиме отдачи максимальной мощности в нагрузку.

Вводимая начальная обобщенная расстройка общей резонансной нагрузки ξ определяется из условия компенсации вносимого сопротивления $Z(M)$ со стороны неисправных M генераторов:

$$\xi = \frac{R}{Z(M)} = \frac{MR(1 + X \operatorname{tg} \theta / W)}{n^2 (W \operatorname{tg} \theta - X)}$$

Для анализа зависимости мощности в нагрузке от числа неисправных генераторов "m", в эквивалентной схеме подключения работающих $(N + M - m)$ генераторов со стороны резонансной нагрузки с помощью классической матрицы передачи, связывающей выходные величины U_n, I_n с входными E_1, I_1 , определяется напряжение на нагрузке:

$$U_n = E_1 / (a_{11} + a_{12} / Z_n), \text{ где:}$$

$$Z_n = Z_p Z(m) / [Z_p + Z(m)] = R / \{1 + j[R/Z(m) - \xi]\};$$

$$Z(m) = \frac{n^2 (W \operatorname{tg} \theta - X)}{m(1 + X \operatorname{tg} \theta / W)}$$

и мощность в нагрузке $P_n = NP_1 \bar{p}(M, m)$,

где: $\bar{p}(M, m) = P_n / NP_1$

показывает изменение мощности в нагрузке относительно заданного уровня NP_1 , в зависимости от количества резервных и неисправных генераторов.

По результатам численного математического моделирования зависимости $\bar{p}(M, m)$, делается вывод

о том, что при введении начальной расстройки ξ система ВЧ питания, состоящая из N основных и M резервных генераторов, обеспечивает заданный уровень мощности NP_1 в нагрузке при большем числе отказов генераторов по сравнению со случаем, когда $\xi = 0$.

Экспериментальная проверка рассмотренной выше схемы суммирования мощностей проведена при работе 4-х идентичных транзисторных ВЧ генераторов на общий резонатор ускорителя ($N=2$, $M=2$) с продольным Н-полем. Генераторы выполнены на биполярных транзисторах 2Т980А с базовыми и коллекторными согласующими цепями в виде отрезков симметричных полосковых линий. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей мощности в нагрузке от числа неисправных генераторов $m = 0, 1, \dots, 4$. Величина отклонения составляет не более 10 %.

Высокие требования к стабильности электромагнитных полей линейных ускорителей с одной стороны, а с другой - широкое распространение в технике релейных принципов автоматического регулирования, характеризующихся простотой реализации и высоким быстродействием, делают актуальным исследование возможностей применения таких принципов для стабилизации ВЧ полей в высокодоброт-

ных резонаторах.

Появление разнообразных возможностей создания релейных элементов на новых принципах, не требующих контактных устройств, придает релейным системам новые свойства.

Релейное авторегулирование амплитуды ВЧ поля резервированной системы может быть основано на дискретном изменении вводимой в резонатор мощности, например, за счет синфазно/противофазной коммутации избыточных M резервных генераторов по отношению к основным N генераторам, обеспечивающим в нагрузке необходимый уровень мощности NP_1 .

Анализ показывает, что исследование автоколебаний, присущих релейному регулированию и модулирующих амплитуду высокочастотного поля в резонаторе линейного ускорителя ионов, можно выполнить с помощью эквивалентной схемы возбуждения резонатора ускорителя, в которой приведена нормировка параметров относительно уровня поля, обеспечиваемого основными усилителями, а эквивалентные параметры генераторов приведены к резонатору, исходя из условия их полного согласования. При этом вводятся следующие обозначения:

ζ - отношение коммутируемой и основной мощностей;
 $e_N(t) = (1 - e^{-\alpha_N t}) \cos(\omega t + \varphi_N)$ - эквивалентный генератор напряжения с экспоненциальным законом включения, моделирующий суммарное воздействие N основных ВЧ генераторов;

$e_M(t)$ - эквивалентный коммутируемый генератор напряжения, моделирующий суммарное воздействие M резервных ВЧ генераторов.

Переходная характеристика генератора $e_M(t)$ определяется способом коммутации мощности. Так, при синфазно/противофазных переключениях в моменты времени t_i :

$$e_M(t) = (1 - e^{-\alpha_N t} + 2 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i [1 - e^{-\alpha_M (t-t_i)}] U(t-t_i)) \times \cos(\omega t - \varphi_N),$$

$i_B(t) = \Delta I U(t-t_B) \cos(\omega t - \varphi_B)$ - возмущающий генератор тока со ступенчатой переходной характеристикой;

t_B - момент включения генератора тока;

ΔI - амплитуда генератора тока, равная коэффициенту нагрузки резонатора по мощности;

$U(t-t_i)$ - единичная функция с запаздывающим аргументом;

$\varphi_N, \varphi_M, \varphi_B$ - начальные фазы эквивалентных генераторов $e_N(t), e_M(t)$ и $i_B(t)$ соответственно;

α_N, α_M - коэффициенты затухания эквивалентных контуров генераторов.

Переходные процессы в резонаторе при релейном

авторегулировании описываются уравнением:

$$\frac{dU_P(t)}{dt} = 4\alpha_P U_P(t) + \omega_P^2 \int_0^t U_P(t) dt = \frac{4\alpha_P}{\sqrt{1+\xi}} [e_N(t) + \xi e_M(t)] - 2\alpha_P \frac{1}{V} (t), \text{ где:}$$

$U_P(t)$ - мгновенное значение напряжения на эквивалентном резонансном контуре;

α_P, ω_P - затухание и резонансная частота контура.

Решение приведенного уравнения, полученное с учетом преобразования Лапласа, для нормированной комплексной амплитуды в функции от периодов высокой частоты $U_P(t)$, описывает процесс нарастания поля в резонаторе при включении генераторов, установление автоколебаний и отработку возмущений амплитуды, при этом, моменты переключения фазы соответствуют точкам пересечения переходной характеристики с номинальным уровнем, задаваемым опорным напряжением в цепи авторегулирования.

Проведен анализ примеров численного моделирования по формуле переходных процессов в резонаторе ускорителя с $Q \approx 10^4$ при различной величине возмущений ΔI . Их характер существенным образом зависит от запаздывания сигнала в цепи авторегулирования:

1) $\tau_{\text{зап}} = 0$ - колебания амплитуды носят затухающий характер;

2) $\tau_{\text{зап}} \neq 0$ - возникают незатухающие колебания, причина которых зависит от соотношения мощностей M и N генераторов примерно линейно (при $\tau_{\text{зап}} = 20$ периодов ВЧ размах автоколебаний достиг примерно 0,3 %).

Быстрые возмущения подавляются примерно в 10 раз, а статический коэффициент стабилизации по напряжению уровню поля превышает 100. Работу системы авторегулирования ухудшают автоколебания: для уменьшения автоколебаний, с целью расширения динамического диапазона, сопровождается снижением точности стабилизации.

Анализ результатов моделирования переходных процессов, иллюстрирующих различные способы появления автоколебаний, показывают, что:

1) при внешней модуляции опорного уровня трехфазным сигналом с амплитудой и периодом, удовлетворяющими условиям захватывания, в системе возникают вынужденные колебания с частотой внешнего воздействия и значительно меньшей амплитудой (уменьшение в 3 - 6 раз);

2) примерно такой же эффект подавления автоколебаний дает форсирование по производной за счет введения к управляющему воздействию в систему авторегулирования сигнала, пропорционального его

производной;

- Опережающее регулирование можно осуществить также, если форсирование производить постоянным по величине, но переменным по знаку сигналом, причем изменение знака форсирования происходит в момент изменения знака производной от регулируемой величины. Увеличение амплитуды сигнала сокращает время установления вынужденных колебаний, однако при этом возможны неустраняемые изменения амплитуды.

Переходные процессы в резонаторе, при включении возмущающего тока, подтверждают примерно одинаковую эффективность рассматриваемых систем при устранении быстрых возмущений: спады поля на фронте 10% возмущающего импульса составляют примерно 0,2%. Однако, для внешней модуляции при стационарном возмущении появляется статическая ошибка, а для импульсной модуляции затягивается процесс установления автоколебаний.

Таким образом, релейные принципы регулирования позволяют достигать прецизионной точности (примерно 0,1%) стабилизации амплитуды ВЧ полей в резонаторах с характерной для линейных ускорителей добротностью ($\sim 10^4$).

Основные результаты работы:

1. Получены аналитические выражения для условий оптимального согласования N транзисторных

ВЧ генераторов с общей резонансной нагрузкой (резонатор линейного ускорителя);

2. Показано, что при введении начальной расстройки резонатора для гарантированного обеспечения требуемого уровня мощности в нагрузке NP_1 (при заданной надежности работы системы ВЧ питания), количество резервных генераторов $M < M^*$, необходимых в случае, если расстройка $\xi = 0$.

3. Проанализирован и предложен способ использования избыточной установленной мощности (MP_1) резервированной транзисторной системы ВЧ питания, с целью получения прецизионной точности стабилизации амплитуды ВЧ полей в резонаторах линейных ускорителей ионов ($\sim 0.1\%$), при синфазно/противофазной коммутации резервных транзисторных ВЧ генераторов. Исследована зависимость точности стабилизации и возникающих автоколебаний от параметров резонатора, ВЧ генераторов и запаздывания в цепи авторегулирования.

4. Проведена конструкторская и технологическая проработка модуля транзисторного ВЧ генератора, отвечающего требованиям минимизации несогabarитных показателей при дальнейшем суммировании мощностей.

5. На основе теоретических исследований, численного моделирования и анализа полученных экспериментальных данных показано, что использо-

вание мощных транзисторных ВЧ генераторов в технике физического эксперимента в ряде случаев более эффективно по сравнению с ламповыми.

Таким образом, применение мощных транзисторных ВЧ генераторов в системах ВЧ питания линейных ускорителей, при использовании предложенных методов их оптимального согласования, резервирования и стабилизации вых одных параметров, позволяет более эффективно проводить физические исследования на современных электрофизических установках, а в ряде случаев (автономное функционирование и жесткие требования по весо-габаритным показателям) делает их единственным инструментом в руках исследователя.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах:

1. Савченко И. С. , Собко Л. А. , Федукон Ю. Д. /Дискретное регулирование амплитуды ВЧ поля в резонаторе//ВАНТ N10 (18)1990.
2. Савченко И. С. , Собко Л. А. , Федукон Ю. Д. А. с. 1443218 (СССР). Резервированный усилитель.
3. Савченко И. С. , Собко Л. А. , Федукон Ю. Д. А. с. 259835 (СССР). Устройство возбуждения и стабилизации ВЧ поля в резонаторе.
4. Савченко И. С. , Собко Л. А. , Федукон Ю. Д. А. с. 291393 (СССР). Устройство возбуждения и стабилизации ВЧ поля в резонаторе.

461711

AB 29.560

ЛНБ ім.В. Стефанія
АН України