

*The exception of 700—800 °C temperature anneal, considered necessary for precipitate nuclei formation and stabilization, does not influence neither common falling of interstitial oxygen concentration during all cycle nor on a general picture of a getter. This makes it possible and in our conditions to start on manufacture of devices of wafers, past only one high-temperature anneal. The reduction of time of 1150 °C annealing from six hours to five minutes does not essentially influence the common falling of interstitial oxygen concentration during all cycle and on a general picture of a getter, but strongly changes near-surface area of wafers.*

УДК 533.9

## Формирование мощных высоковольтных импульсов тока коротковолнового радиодиапазона

В. А. Алмазов, Э. Ф. Бурцев

ГУП "Всероссийский электротехнический институт имени В. И. Ленина",  
Москва, Россия

*Экспериментально исследованы гармонические затухающие колебания импульсов тока и напряжения высокой частоты (~20—30 МГц) при заряде электрического конденсатора высоковольтными (ВВ) импульсами напряжения (~22 кВ) с высокими скоростями нарастания ( $dU/dt \approx 1,3 \cdot 10^{12}$  В/с). Показано, что методами квантования электрической и магнитной энергии при частотах в десятки мегагерц обеспечивается перевод ВВ-обмотки в автотрансформаторный режим работы с многократным увеличением значений выходного напряжения. На этой основе проведен анализ опытов Н. Тесла по беспроводной передаче электрической энергии на дальние расстояния.*

### Постановка задачи. Направления исследований

Одной из важных задач электротехники является передача электрической энергии на дальние расстояния с минимальными потерями. Традиционно электроэнергия передается по проводникам токами электронной проводимости [1, 2].

Больших успехов в передаче электроэнергии без проводов (токами смещения) добился своими опытами в конце XIX века Н. Тесла [3—5]. На расстоянии 42 км от передающего устройства в нагрузке засветили 200 ламп накаливания мощностью по 50 Вт каждая (~10 кВт)\*.

В настоящее время разрабатываются и испытываются устройства по передаче электроэнергии по одному проводу (второй провод — земля) [6]. (Информация о доле тока проводимости и тока смещения в подобных системах отсутствует.)

Основная задача работы — разработка и исследование ВВ высокочастотного (ВЧ) генератора импульсов

тока на взаимосвязанных резонансных контурах по типу трансформатора Тесла.

При разработке ВВ-генератора представляет интерес принцип заряда конденсатора непосредственно от мощного генератора синусоидальных импульсов [1]. Импульс тока заряда опережает импульс напряжения на время  $t = 1/4T$ , где  $T$  — период колебаний. Проблема состоит в изготовлении задающего генератора на токи в десятки—сотни ампер при амплитудных значениях напряжения несколько сотен киловольт и  $T \approx 5—50$  нс.

ВЧ-колебания тока и напряжения  $f \approx 20—30$  МГц отмечены при заряде конденсатора  $C \approx 5—30$  пФ [7—9]. Генератор работал по принципу разряда накопительного конденсатора в RLC-контуре. Выходные ВВ-импульсы напряжения с амплитудным значением  $U_a \approx 1—22$  кВ и  $t_{im} \approx 6$  мкс от генератора прикладывались к конденсатору. ВЧ-гармонические затухающие колебания тока ( $I_{amp,max} \approx 1,5$  А при работе генератора в режиме  $U_{out} = const$ ) наблюдались в течение 400 нс с момента начала электрического пробоя на изоляционных барьерах конструкции конденсатора (металл—диэлектрик—металл — М—Д—М) при  $dU/dt \approx 27$  кВ/мкс [8]. При  $dU/dt \geq 10^6$  В/мкс колебания тока и

\* Сообщения в литературе о повторении подобных опытов отсутствуют.

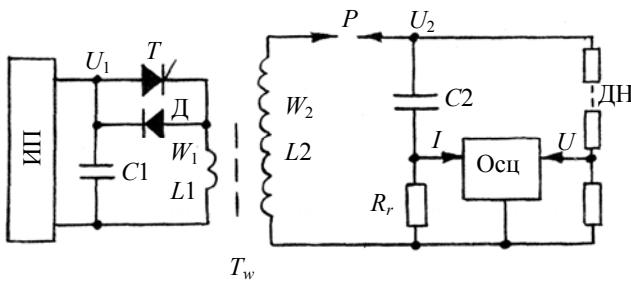
напряжения регистрировались с момента приложения импульса напряжения  $U_a \approx 22$  кВ в течение 400 нс [7, 9].

Определены следующие направления исследований:

- изготовление макета генератора на взаимосвязанных резонансных контурах по типу трансформатора Тесла [3, 4];
- экспериментальное исследование ВЧ-колебаний тока и напряжения при  $U_a \approx 22$  кВ и  $dU/dt \approx 1,3 \cdot 10^6$  В/мкс;
- проведение анализа ВЧ-колебаний тока и напряжения в диапазоне времени  $T \approx$  единицы—десятки наносекунд;
- анализ известных конструктивных данных и электрических характеристик устройства Тесла по беспроводной передаче электрической энергии на дальние расстояния [3—6].

### Методика эксперимента

Трансформатор  $T_w$  (рисунок) выполнен на тороидальном соленоиде с сердечником из тонкой ленты пермаллоя площадью  $S \approx 0,8$  см<sup>2</sup>. Вначале на сердечник намотана ВВ-обмотка с повышенной изоляцией между слоями ( $W_2 = 670$  витков, длина провода намотки  $\approx 40$  м). Первичная обмотка уложена сверху обмотки  $W_2$  равномерно по всей площади ( $W_1$  — единицы витков). Значения емкостей накопительного разрядного С1 и высоковольтного зарядного С2 конденсаторов составляют, соответственно, единицы микрофард и единицы—десятки пикофард.



#### Блок-схема экспериментальной установки:

$T_w$  — силовой трансформатор на взаимосвязанных резонансных контурах; ИП — источник питания;  $P$  — разрядный промежуток в среде воздуха ( $\leq 10$  мм);  $R_r$  — шунт тока; ДН — высоковольтный делитель напряжения;  $T$  — коммутирующий тиристор;  $D$  — шунтирующий диод

В качестве шунта тока  $R_r$  использованы безындуктивные резисторы с объемным проводящим слоем ( $R_r \approx$  единицы—десятки Ом). Напряжение измерялось составным резистивным делителем с емкостной коррекцией ДН ( $K = 1000:1$ ). В качестве опорного резистора использован резистор с объемным проводящим слоем.

При разряде конденсатора С1 ( $U_{1\max} \approx 310$  В) в замкнутом колебательном контуре  $L1C1$  собственная частота

затухающих колебаний составляла  $f_1 \approx 20$  кГц. На стороне высокого напряжения ( $U_{2\max} \approx 22$  кВ) в контуре  $L2C2$  регистрировались два периода вынужденных затухающих колебаний с  $f_2 = f_1$ . При искровом разряде ( $P$ ) падение напряжения на дуге не превышало  $\sim(60—70)$  В.

Частота повторения импульсов заряд—разряд конденсатора С1 составляла  $f_w = 50$  Гц. Это позволяло снизить требования по рассеиваемой мощности шунта тока и делителя напряжения, хорошо регистрировать переходные процессы с помощью измерительного осциллографа при максимальном разрешении электронно-лучевой трубки по времени (1 см развертки = 20 нс), производить исследования при допустимых нормах радиоизлучения без специальных мер защиты.

### Результаты экспериментальных исследований

Основное внимание было направлено на изучение процесса заряда электрического конденсатора (С2) при приложении к его обкладкам ВВ-импульсов напряжения с высокой скоростью нарастания ( $dU/dt \approx 1 \cdot 10^6$  В/мкс). Конденсаторы прижимной конструкции были изготовлены на основе изоляционных материалов с разными значениями коэффициентов диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Диаметр внешних электродов из медной фольги во всех опытах был равен 28 мм. Размеры изоляционных пластин по площади исключали электрические разряды по торцу диэлектрика. После пробоя разрядного промежутка ( $P$ ) потенциал  $U_a \approx 22$  кВ прикладывался к испытываемому конденсатору с фронтом  $t_{fr} \approx 15$  нс ( $dU/dt \approx 1,3 \cdot 10^6$  В/мкс). ВВ ВЧ-гармонические затухающие колебания тока и напряжения регистрировались относительно нулевой отметки временной развертки осциллографа в течение  $\sim 400$  нс. Импульс тока опережал импульс напряжения на время  $t = 1/4T$ , где  $T$  — период колебаний (десятки наносекунд). Экспериментальные максимальные амплитудные значения импульсов тока заряда конденсатора —  $I_{\max}$ , напряжения на конденсаторе —  $U_{\max}$  (эксперимент, расчет) и результаты экспериментальной оценки частоты колебаний в случае воздействия больших  $dU/dt$  —  $f$  приведены в табл. 1.

Максимальное амплитудное значение импульса тока составляло  $I_{\max} \approx 10$  А (изолятор — тонкое стекло) и ограничивалось внутренним сопротивлением генератора импульсов напряжения (расчетное значение  $I_{\max} = C \cdot dU/dt \approx 40$  А). Максимальные амплитудные значения импульсов напряжения на обкладках конденсатора С2 были в пределах  $\sim(140—200)$  кВ при начальном выходном напряжении на обмотке  $W_2$   $U \approx 22$  кВ.

Таблица 1

Материал диэлектрика	Толщина пластины изолятора, мм	$I_{\max}$ , А	$f$ , МГц	$U_{\max}$ , кВ	
				эксперим.	расчетн.
Стекло тонкое	1,3	10,0	~20	~145	110
Стекло оконное	4,0	10,0	~22	~150	130
Плексиглас	3,0	6,5	~25	~160	154
Фторопласт	5,0	3,65	~30	~175	176

Увеличенные значения импульса напряжения в RLC-контуре связываются с резонансом напряжений, когда емкостное и индуктивное реактивные сопротивления при определенной резонансной частоте сравниваются и взаимно уничтожаются [1, 2]. Тогда ток в цепи контура определяется только активным сопротивлением. Это имеет место в диапазоне промышленных частот и длинноволновом радиодиапазоне (единицы герц—сотни килогерц).

В данном конкретном случае в диапазоне частот  $f \geq 10$  МГц рост напряжения можно объяснить эффективностью процессов перемагничивания в обмотке  $W_2$ . В процессе заряда ВВ-конденсатора С2 принимает участие не вся обмотка  $W_2$ , а только ее часть, связанная с изменением электрического поля во времени. На этом участке протекает электрический ток и идет накопление магнитной энергии. Скорость распространения возмущения электрического поля соответствует скорости света [10]. Длина участка обмотки  $W_2$ , пропорциональная числу витков и участвующая в накоплении магнитной энергии,  $l_{W_2} = cT/2$ , где  $c$  — скорость света ( $30 \text{ см}/1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ),  $T$  — период ВЧ-электромагнитных колебаний (единицы — десятки)  $\cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Начальное напряжение на выходе обмотки  $W_2$  равно  $U_2 \approx 22 \text{ кВ}$ . В момент, когда ток заряда становится равным нулю, магнитный поток в соленоиде пересекает все витки обмотки  $W_2$  и наводит на ее выводах ЭДС величиной  $U_2' = U_2 L_{W_2} / l_{W_2}$ , где  $L_{W_2}$  — длина обмотки  $W_2$ . Таким образом, вторичная обмотка трансформатора  $W_2$  работает в режиме автотрансформатора, опорный участок которого ( $l_{W_2}$ ) определяется частотой ВЧ-колебаний  $f_3$  [11]. Подпитка колебательного процесса энергией осуществляется со стороны магнитного поля в соленоиде трансформатора, наведенного разрядом в контуре L1C1.

Измерительная погрешность при проведении исследований не превышала 10 %. Основные отклонения экспериментальных и расчетных данных (см. табл. 1) можно объяснить методической погрешностью вследствие использования в установке многослойного тороидального трансформатора с магнитным сердечником. Для конкретного случая трансформатор должен быть изготовлен по типу трансформатора Тесла.

Рассмотрим токи, протекаемые в контуре L2C2. Так, по соединительным проводам, шунту тока и по включенному участку обмотки  $W_{2m}$  протекает ток электронной проводимости. Параллельно не включенному участку ВВ-обмотки при высоких значениях  $dU/dt$  протекают токи смещения межвитковых и межслойных емкостей обмотки  $W_2$ . На участке электрического ис-

крового разряда протекают электронная и ионная составляющие тока переноса.

При заряде конденсатора С2 между его обкладками протекает ток смещения, равный по форме и амплитудному значению току во внешней цепи [2]. Ток смещения определяется безынерционным ( $\leq 10^{-12} \text{ с}$ ) и инерционным ( $\geq 10^{-10}$ ) токами поляризации [12], которые образуются движением связанных зарядов материала диэлектрика. Длительность импульсов тока заряда при амплитудном значении  $I_{\max} \approx 10 \text{ А}$  составляла (единицы—десятки)  $\cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ .

Рабочие частоты экспериментальной установки:

$f_w$  — частота запуска; частота следования рабочих циклов установки ( $f_w = 50 \text{ Гц}$ );

$f_1$  — собственная частота замкнутого колебательно-го контура L1C1 ( $f_1 = 20 \text{ кГц}$ );

$f_2$  — вынужденная частота колебательного контура L2C2 ( $f_2 = f_1$ );

$f_3$  — частота ВЧ-колебаний импульсов тока и напряжения при заряде конденсатора С2 ВВ-импульсами напряжения при высоких значениях  $dU/dt$  ( $f_3 = 20\text{—}30 \text{ МГц}$ ).

#### Анализ опытов Н. Тесла

Результаты экспериментов Н. Тесла по беспроводной передаче электрической энергии на дальние расстояния, проведенные в 1899—1900 гг. в Колорадо-Спрингсе, все еще не достигнуты никем [3—5]. Имеется описание результатов опытов ученого, их условий и применявшейся аппаратуры, но не освещен способ, которым пользовался великий изобретатель [5].

Проведен анализ технических данных и электрических характеристик установки Н. Тесла с позиций полученных результатов исследований в настоящей работе.

Трансформатор системы Тесла имел первичную обмотку из нескольких витков толстого провода на ограде диаметром 24,4 м и размещенную внутри нее с большим воздушным зазором многослойную однослойную вторичную обмотку на цилиндре из диэлектрика [3, 4]. Первичная обмотка вместе с конденсатором, индукционной катушкой и искровым промежутком образовывала колебательный контур — преобразователь частоты. Над трансформатором возвышалась деревянная башня, увенчанная на высоте 60 м большим медным шаром. Один конец выхода трансформатора соединялся с этим шаром, другой — заземлялся. Все устройство питалось от отдельной динамо-машины мощностью в 300 л.с. В устройстве возбуждались электромагнитные колебания частотой 150 кГц, при этом рабочее напряжение в высоковольтной цепи составляло 30 кВ, а резонирующий

потенциал в шаре достигал 100 МВ, что и вызывало искусственные молнии.

Индукционная катушка, по всей видимости, была установлена в качестве элемента развязки между источником питания и колебательным контуром L1C1 — искровой промежуток. Частота 150 кГц являлась рабочей частотой устройства —  $f_w = 150$  кГц. Собственная частота контура L1C1—искровой промежуток, можно предположить, составляла  $f_1 \approx 500$  кГц ( $T \approx 2$  мкс), чтобы к следующему рабочему циклу ( $T_w \approx 7$  мкс) восстановились запорные свойства искрового промежутка.

В описании опытов Н. Тесла отсутствует ВВ-зарядный конденсатор С2, который формирует кванты электрической энергии. Анализ показал, что эти функции выполняют межвитковые емкости катушки  $W_2$ . При намотке ВВ-обмотки на каркас из диэлектрика, в случае укладки витков в пазы, значения межвитковых емкостей увеличиваются в  $\epsilon_0 \epsilon$  раз, где  $\epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала изолятора.

Оценки показывают, что значение емкости между витками при длине витка  $\sim 60$  м может достигать  $\approx 7 \cdot 10^{-9}$  Ф. В этом случае значение емкости между крайними витками катушки при  $W_2 \approx 150$  витков составит  $C2 \approx 50 \cdot 10^{-12}$  Ф.

При скорости нарастания напряжения на выходе трансформатора  $dU/dt < 0,1 \cdot 10^{12}$  В/с  $U_{W_2} = 30$  кВ, при  $dU/dt > 0,4 \cdot 10^{12}$  В/с обмотка трансформатора  $W_2$  переходит в автотрансформаторный режим работы. В ВВ-цепи появляются ВЧ-колебания импульсов тока и напряжения с  $f_3 \approx$  десятки мегагерц, и  $U_{out}$  возрастает до 100 МВ ( $K = 100$  МВ/30 кВ  $\approx 3300$ ). Далее ВВ-коротковолновые радиоволны поступают к электродам антенна—земля и излучаются в атмосферу. Оценочные расчеты показали, что, например, при  $f_3 \approx 50$  МГц  $l_{W_2} \approx 3$  м,  $L_{W_2} \approx 1 \cdot 10^4$  м,  $W_2 \approx 140$  витков ( $\Phi_{W_2} \approx 22$  м),  $W_1 \approx 4$  витка (при  $U_{C1} \approx 1$  кВ). Значение напряжения на один виток ВВ-обмотки трансформатора составляет  $\approx 0,7 \cdot 10^6$  В/виток.

Чтобы наглядно представить принцип многократного преобразования электрической энергии в установке Н. Тесла, в табл. 2 приведен порядок основных электрических параметров рабочих контуров. В целом дан-

ная проблема заслуживает дальнейшего экспериментального и теоретического анализа.

## Выводы

1. Экспериментально показано, что катушка индуктивности включается не мгновенно по длине обмотки, а в лучшем случае при высоких скоростях нарастания напряжения со скоростью света. Методами квантования электрической и магнитной энергии путем заряда электрического конденсатора и накопления магнитной энергии на включенном участке катушки можно обеспечить работу индуктивности в автотрансформаторном режиме.

2. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают возможность разработки мощного ВВ-квантового мазера на взаимосвязанных резонансных контурах. Подобные генераторы могут найти применение в технике радиолокации и устройствах передачи электрической энергии на дальние расстояния без проводов.

3. Анализ технических данных и электрических характеристик устройства Н. Тесла, а именно, большие геометрические размеры трансформатора, наличие однослойной ВВ-обмотки  $W_2$ , значение потенциалов  $U_{W_2} = 30$  кВ,  $U_{aerial-earth} \approx 100$  МВ, учет работы межвитковых емкостей ВВ-обмотки при больших значениях скорости нарастания импульсов напряжения ( $dU/dt$ ) — позволяет сделать вывод, что передача электрической энергии в опытах Н. Тесла осуществлялась пакетами мощных ВВ-импульсов тока радиодиапазона (20—60) МГц при частоте следования  $f_w = 150$  кГц.

Представляет интерес дальнейшее изучение вопросов накопления, преобразования, передачи, приема, использования электрической энергии, экологической безопасности, электрической прочности изоляционных промежутков в наносекундных интервалах времени и др.

Таблица 2

Рабочий контур	Электрический параметр			
	Частота	Напряжение	Ток	$dU/dt$
L1C1	$f_{1w} = 150$ кГц	1—3 кВ (зарядное)	~ сотни А	—
L2C2	$f_2 \approx 500$ кГц	30 кВ	~ десятки А	$< 0,1 \cdot 10^{12}$ В/с
L2 <sub>ин</sub> C2	$f_3 \approx 10—60$ МГц	100 МВ	~ десятки мА	$> 0,4 \cdot 10^{12}$ В/с

## Л и т е р а т у р а

1. Мансуров Н. Н., Попов В. С. Теоретическая электротехника. — М.: Энергия. 1968. Изд. 10. — 576 с.
2. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. В двух томах. — М.—Л.: Энергия, 1966. Т. 1. — 522 с.; Т. 2. — 407 с.
3. Аликханов Л. И. Вместо проводов — земной шар// Техника — молодежи. 1980. № 11. С. 36—39.
4. О'Нейл Дж. Электрический Прометей: Пер. с англ.// В журнале "Изобретатель и рационализатор". 1979. № 4—11.
5. Nikola Tesla. Colorado Springs Notes 1899—1900. Published by Nolit. Beograd, 1978. — 437 p.

Стребков Д. С., Некрасов А. И. Резонансные методы передачи электрической энергии. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004. — 188 с.

7. Бурцев Э. Ф. Емкостные токи в приборах, аппаратах и устройствах силовой электроники// Прикладная физика. 2001. № 5. С. 69—73.

8. Бурцев Э. Ф. Экспериментальные исследования физических процессов частичных электрических разрядов (ЧР) в силовой электротехнике. "Электротехника 2010": VII симпозиум// Сб. докл. Август. — М.: ВЭИ-ТРАВЭК, 2003. Т. 3. С. 88—92.

9. Алмазов В. А., Бурцев Э. Ф., Васильев В. Р., Кручинин Н. В. Высоочастотные импульсные электрические разряды на изоляционных барьерах (частичные разряды) в силовой электротех-

нике// Прикладная физика. 2004. № 4. С. 60—66.

10. Элементарный учебник физики/ Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. 2. Изд. второе. — М.: ГИФМЛ, 1958. — 448 с.

11. Бурцев Э. Ф. Возможность разработки мощного высоковольтного генератора импульсов тока радиодиапазона. "Электротехника 2010": VIII Симпозиум// Сб. докл. Май. — М., 2005. № 1. 20. С. 57.

12. Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А. и др. Теория диэлектриков. — М.: Энергия, 1965. — 344 с.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2005 г.

## Forming the powerful high-voltage current pulses of the short-wave radio-frequency range

V. A. Almazov, E. F. Burtsev  
All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*Investigated have been experimentally the relaxation harmonic oscillations of current and voltage pulses of a high frequency (~20—30 MHz) at charging the electrical condenser by high-voltage pulses (~22 kV) with high speeds of increase ( $dU/dt \approx 1,3 \cdot 10^{12}$  V/s). It is shown that the methods of quantization of electrical and magnetic energy at frequencies of tens of MHz have ensure the translocation of a high-voltage winding in the autotransformer mode with multiple magnification of voltage output. On this basis, the analysis has been made for Nicola Tesla experiments on off-wire transfer of electrical energy over long distances.*

УДК 621.3.038.625

## Высокочастотная ускоряющая система CUSTOMS циклотрона

А. А. Глазов, Г. А. Карамышева, О. Е. Лисенкова  
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

*Представлены результаты расчетов параметров высокочастотной ускоряющей системы CUSTOMS циклотрона, предназначенного для обнаружения взрывчатых веществ на базе гамма-резонансного метода. В результате проведения аналитических расчетов была выбрана конструкция высокочастотного резонатора, результаты трехмерного численного расчета полностью подтвердили правильность аналитических оценок, в частности, по частоте различие в результате аналитического и численного расчетов не превысило 5%. Полученные карты компонент электрического поля применяются в расчетах динамики пучка в циклотроне.*

В лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) разрабатывается проект комплекса по обнаружению взрывчатых веществ [1] на базе гамма-резонансного метода [2]. Комплекс состоит из циклотрона, мишенного узла и детектирующего устройства. Обнаружение взрывчатых веществ в рассматриваемом случае основано на детектировании высоких концентраций азота в предметах багажа по резонансному рассеянию либо поглощению  $\gamma$ -квантов, полученных в результате реакции  $C^{13}(p,\gamma)N^{14}$ . Для получения пучка ускоренных протонов планируется использовать компактный циклотрон с аксиальной инжекцией пучка от внешнего источника, азимутальной вариацией поля и электростатической системой вывода. Преимущества циклотрона заключаются в простоте и технологичности конструкции, небольших габаритах, небольших массах элементов ускорителя. Энергия выведенного пучка протонов составит 1,75 МэВ, ожидаемая величина среднего тока пучка — 2—5 мА.

В работе представлены результаты расчетов параметров высокочастотной ВЧ-ускоряющей системы CUSTOMS циклотрона.

### Разработка высокочастотной ускоряющей системы

Данная разработка проходит в два этапа. Первый — проведение аналитических расчетов с целью выбора структуры и основных параметров ВЧ-системы. Во время этого этапа возможно проведение большого количества расчетов для выбора оптимальной конструкции резонатора. Второй этап — проведение численного расчета выбранной геометрии ВЧ-системы по трехмерной программе, предназначенной для расчетов высокочастотного электромагнитного поля и использующей для этой цели метод конечных элементов. Результатом второго этапа являются точные данные основных пара-