

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

**Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет)**

Б.Ю. Богданович В.И. Каминский  
В.А. Сеньюков

**СИСТЕМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
ПИТАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОНОВ С НАКОПЛЕНИЕМ  
ЭНЕРГИИ СВЧ ПОЛЯ**

*Рекомендовано УМО «Ядерная физика и технологии» в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений*

Москва 2002

УДК 621.384.6(075)

ББК 22.386я7

Б73

*Богданович Б.Ю., Каминский В.И., Сеньюков В.А. Системы высокочастотного питания линейных ускорителей электронов с накоплением энергии СВЧ поля. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2002.- 96 с.*

Цель пособия – ознакомление с системами накопления СВЧ энергии, применяемыми в системах питания ускорителей заряженных частиц, а также физическими процессами, протекающими в этих системах. Приведена классификация систем накопления СВЧ энергии по принципу их действия и конструктивным особенностям. Рассмотрены системы с резонансными и нерезонансными накопителями энергии СВЧ генераторов, указаны их достоинства и недостатки. Подробно рассмотрены процессы накопления и расходования СВЧ энергии для создания ускоряющих полей с большими градиентами. Приведены обоснованные требования к параметрам элементов систем компрессии.

Учебное пособие предназначено для использования в курсах лекций «Ускорители заряженных частиц», «Ускоряющие структуры», «Электроника СВЧ» для студентов старших курсов, аспирантов, научных работников по специальности «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника». Может быть полезно для специалистов по радиофизике, электродинамике.

Рецензент д-р техн. наук Собенин Николай Павлович

Пособие подготовлено в рамках выполнения гранта Министерства образования России и Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (CRDF) «Научно-образовательный центр фундаментальных исследований материи в экстремальных состояниях» (грант М0-011-0).

ISBN 5-7262-0468-9

© Каминский В.И., Сеньюков В.А., Собенин Н.П., 2002

© Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет), 2002

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СИСТЕМ КОМПРЕССИИ ЭНЕРГИИ СВЧ ПОЛЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛУЭ, И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	11
1.1. Классификация систем компрессии энергии СВЧ поля и их основные параметры.....	11
1.2. Системы компрессии с накопительными резонаторами. ....	14
1.2.1. Системы с изменяемыми параметрами накопительных резонаторов. .....	16
1.2.2. Системы с постоянными параметрами накопительных резонаторов. .....	20
1.2.3. Системы с комбинированными методами изменения режима работы.....	22
1.2.4. Системы компрессии с резонансной нагрузкой.....	24
1.2.5. Получение СВЧ импульсов с плоской вершиной.....	26
1.3. Системы компрессии с накоплением энергии в линиях задержки.....	31
1.3.1. Системы с коммутацией на высоком уровне мощности. ....	31
1.3.2. Системы с коммутацией на низком уровне мощности.....	34
1.3.3. Системы с линиями задержки без коммутирующих элементов. ....	40
1.3.4. Системы, использующие линии задержки как элементы резонаторов. ....	42
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУЭ С СИСТЕМАМИ КОМПРЕССИИ ЭНЕРГИИ СВЧ ПОЛЯ .....	45
2.1. ЛУЭ с системами, использующими накопительные резонаторы.....	45
2.1.1. Характеристики ЛУЭ при использовании систем с изменяемыми параметрами резонаторов. ....	45
2.1.2. Характеристики ЛУЭ при использовании систем с постоянными параметрами резонаторов. ....	53
2.1.3. Характеристики ЛУЭ при использовании систем, формирующих выходной импульс с плоской вершиной.....	63
2.1.4. Характеристики ЛУЭ при использовании систем с резонансной нагрузкой.....	68

2.2. ЛУЭ с системами, использующими для накопления энергии линии задержки.....	77
Приложение. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОМПРЕССИИ В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.....	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время ускорители заряженных частиц и, в частности, линейные резонансные ускорители электронов (ЛУЭ) получают все большее распространение в народном хозяйстве и научных исследованиях [1]-[3]. Наиболее широко ускорители применяются для дефектоскопии, лучевой терапии, радиационной модификации материалов, активационного анализа, стерилизации и в пищевой промышленности, а также для проведения специальных ядерно-физических исследований.

Однако несмотря на огромные возможности и существенные преимущества радиационных технологий практическое их использование заметно ограничивается значительной стоимостью установок. В этих условиях важными характеристиками ускорителей, применяемых в промышленности и медицине, становятся их технико-экономические показатели такие, как стоимость, экономичность и другие. Эти показатели во многом определяются стоимостью системы высокочастотного питания, которая в ряде случаев может составлять до половины стоимости всего ускорителя. По этой причине перспективным представляется использование систем компрессии энергии высокочастотного поля, которые без применения дополнительных или более мощных СВЧ генераторов позволяют повысить энергию ускоренного пучка на выходе ускорителя. Кроме того, применение таких систем дает возможность существенно расширить диапазон регулировки энергии пучка, что в ряде случаев позволяет заменить несколько установок одной.

Применение систем компрессии возможно и на уже действующих установках. При этом также может быть повышена энергия ускоренного пучка на выходе ускорителя и расширен диапазон ее

регулировки. Возможность повышения темпа ускорения действующих установок во многих случаях обусловлена повышением электрической прочности ускоряющей структуры и других СВЧ элементов за счет сокращения длительности СВЧ импульса.

Другим важным направлением применения систем компрессии энергии СВЧ поля является создание установок на сверхбольшие энергии, где принципиально необходимо обеспечить максимально возможный темп ускорения, так как в противном случае размеры установки и ее стоимость превысят всякие разумные пределы. В частности, это относится к установкам на встречных электрон-позитронных пучках – линейных коллайдерах на энергию более 1 ТэВ. Примером может служить проект *NLC (Next Linear Collider, США)*. Для того чтобы длина установки не превышала 20 км, что в настоящее время фактически является пределом технических и экономических возможностей, необходимо обеспечить темп ускорения не менее 80-100 МэВ/м. Для этого требуются СВЧ источники с мощностью порядка 150-200 МВт. Разработка и создание таких источников представляет собой достаточно сложную теоретическую и практическую задачи. Например, при разработке 100 МВт клистрона на частоту 14 ГГц серьезной проблемой стало возбуждение в пролетном канале клистрона высших типов колебаний, что не позволило получить выходную мощность свыше 60-70 МВт. В США был разработан экспериментальный образец усилительного клистрона 10-сантиметрового диапазона с выходной мощностью 150 МВт. Однако из-за недостаточной стабильности и надежности серийное изготовление этих приборов пока не начато, хотя работы в этом направлении по-прежнему ведутся. Также можно отметить, что существуют разработки и более мощных клистронов [4].

В то же время применение систем компрессии энергии СВЧ поля позволяет получить необходимые уровни мощности, не прибегая к разработке сверхмощных электронных приборов.

Принципы временной компрессии энергии, основанные на ее накоплении в течение относительно длительного промежутка времени с последующим использованием в течение более короткого [5,6], известны достаточно давно и широко применяются в таких

областях, как энергетика, радиолокация и связь. Естественно, что не осталась в стороне и ускорительная техника [7]. Здесь принципы накопления энергии получили свою реализацию в таких методах, как рекуперация СВЧ мощности (не израсходованная часть СВЧ мощности на выходе ускорителя возвращается на его вход и складывается с мощностью генератора, то есть образуется резонатор с бегущими волнами, частью которого является ускоряющая секция), автоускорение релятивистского сгруппированного пучка (использование части энергии пучка для его доускорения), компрессия энергии СВЧ поля. Каждый из этих методов имеет как свои преимущества, так и недостатки.

По-видимому, первым вариантом применения принципов накопления энергии СВЧ поля, получившим практическое применение для повышения амплитуды ускоряющей волны, можно считать ЛУЭ, ускоряющая секция которого образует резонатор с бегущими волнами. Это так называемый метод рекуперации СВЧ мощности. Такие ускорители были достаточно хорошо изучены как теоретически, так и практически, некоторые из них были реализованы. Метод рекуперации СВЧ мощности при относительной простоте реализации обеспечивает повышение общего КПД установки. Однако он не позволяет получить заметного увеличения энергии пучка, что является основным недостатком таких ускорителей. Увеличение энергии пучка практически не превышает двух-трех раз. Другой существенный недостаток – это ограниченная величина ускоряемого тока: повышение тока пучка приводит к резкому снижению его энергии. Увеличение энергии пучка относительно исходной оказывается незначительным. Одной из основных причин этих недостатков является то, что здесь накопителем энергии является низкодобротная резонансная система, содержащая ускоряющую секцию, которая вносит существенное затухание СВЧ волны. В то же время такие системы могут быть достаточно эффективны при работе ЛУЭ в режиме запасенной энергии, то есть при очень коротких длительностях тока пучка. Поэтому в ряде случаев рассматриваются варианты практического использования такого способа

увеличения амплитуды ускоряющей СВЧ волны в для повышения темпа ускорения.

Повысить энергию ускоренного пучка ЛУЭ без применения дополнительных СВЧ генераторов позволяет также метод автоускорения. Он может быть использован в различных случаях (для релятивистских или нерелятивистских пучков, сгруппированных или однородных) и позволяет получить существенный прирост энергии пучка (в несколько раз). Метод достаточно хорошо исследован как теоретически, так и практически (см. например [8]). Однако несмотря на хорошие возможности он имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего, необходимо отметить, что применение этого метода во многих случаях приводит к заметному снижению эффективности установки за счет многократного преобразования энергии из СВЧ поля в пучок и обратно. Исключение составляют некоторые варианты схем ЛУЭ с автоускорением релятивистского сгруппированного пучка. Во-вторых, автоускорение практически невозможно эффективно использовать для существенного повышения энергии пучка в многосекционных машинах. В одних случаях это связано с необходимостью применения дополнительных ускоряющих секций, в других – с ограничениями на параметры возбуждающего пучка.

От этих недостатков в значительной степени свободны системы, использующие метод временной компрессии энергии СВЧ поля. Они позволяют обеспечить существенное повышение энергии ускоренных частиц на выходе ускорителя без увеличения мощности питающего СВЧ генератора или их количества, хотя и приводят к незначительному снижению КПД установки. Благодаря отмеченным положительным качествам (которые, кстати, не ограничиваются перечисленными выше) подобные системы представляют несомненный интерес для ускорительной техники. При этом возможности их применения фактически ограничивается только тем, что они не могут быть использованы для повышения средней мощности ускоренного пучка.

Теоретические вопросы использования систем компрессии энергии СВЧ поля в качестве источника питания для ЛУЭ рассмат-

ривались уже достаточно давно. При этом исследовалась возможность использования только одной системы компрессии – с накоплением энергии в резонаторе с изменяемой связью [9]. Практически такая система для ускорения заряженных частиц не применялась.

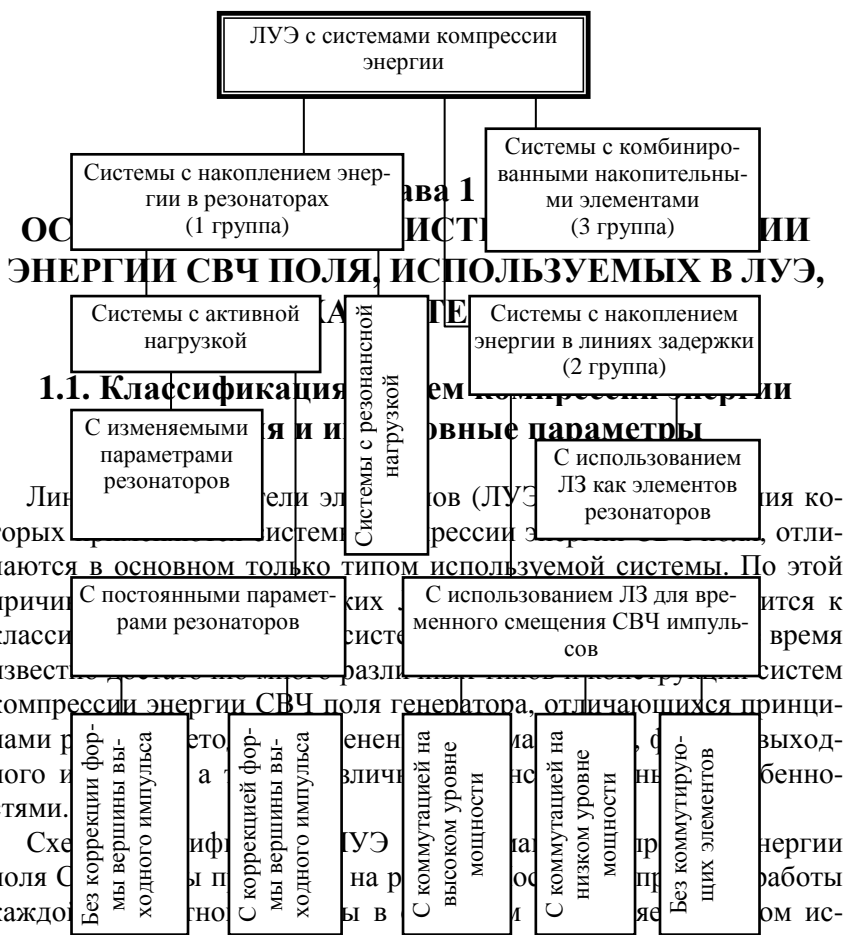
Первой системой компрессии, практически примененной для ускорения пучков на действующих установках, стала система типа *SLED* (*Stanford Linac Energy Doubler*). Она была предложена в 1974 году для повышения (удвоения) энергии ускоренного пучка ЛУЭ на энергию 20 ГэВ в Стэнфордском университете (США), а в последствии аналогичная система была реализована на действующих ускорителях в Китае [10] и СССР (МИФИ) [11]. В настоящее время в ОИЯИ (г.Дубна) разрабатывается и создается ЛУЭ (в рамках проекта ИРЕН), в котором для СВЧ питания предполагается использовать систему компрессии энергии типа *SLED* с целью повышения импульсной мощности ускоренного пучка.

Со времени первых сообщений об исследованиях системы типа *SLED*, судя по имеющимся публикациям, на протяжении многих лет работы в области систем компрессии ограничивались только двумя упомянутыми выше вариантами. Система компрессии, в которой для накопления энергии применялись линии задержки ("бинарная" система), была предложена Вилсоном П.Б. (*Wilson P.B.*) в 1985 году [12]. Фактически применением линий задержки для накопления энергии также можно считать модернизированный вариант системы типа *SLED*, предложенный Балакиным В.Е. в 1990 году [13].

Полезно отметить, что методы, применяемые при разработке систем компрессии энергии, могут быть использованы и при разработке обычных систем СВЧ питания ускорителей заряженных частиц. Например, была предложена система СВЧ питания ускорителя, которая позволяет переключать направление движения бегущей волны в ускоряющей секции. Это дает возможность ускорять частицы во встречных направлениях, что представляет несомненный интерес при разработке коллайдеров. Важным достоинством такой системы является отсутствие коммутирующих устройств,

работающих на высоком уровне мощности. Переключение направления движения волны осуществляется за счет фазовых коммутаций в трактах возбуждения усилителей СВЧ мощности.

Кроме того, системы компрессии энергии СВЧ поля генератора могут иметь и другие применения, связанные с необходимостью формирования мощных СВЧ импульсов (например, радиолокация и т.п.).



**Рис.1.1.** Классификация ЛУЭ с системами компрессии энергии поля СВЧ волны генератора

системы с комбинированными накопительными элементами.

К первой группе относятся системы, в которых энергия СВЧ поля накапливается в высокочастотных резонаторах, а выходной импульс формируется за счет излучаемой из этих резонаторов вол-

ны. Для этого могут быть использованы резонаторы как со стоячими, так и с бегущими волнами.

В системах второй группы энергия СВЧ поля накапливается в линиях задержки (следует, однако, отметить, что понятие "накопление энергии" применительно к линиям задержки не совсем корректно, поскольку в большинстве случаев в таких системах линии задержки выполняют свою непосредственную функцию, то есть осуществляют задержку во времени СВЧ импульсов). В системах этой группы выходной импульс формируется за счет смещения отдельных частей СВЧ импульса во времени с последующим их сложением в нагрузке.

К третьей группе относятся системы, в которых накопление энергии происходит как в резонаторах, так и в линиях задержки.

Системы первой группы (с накопительными резонаторами) могут быть разделены по типу нагрузки:

- с активной нагрузкой;
- с резонансной нагрузкой.

Нагрузкой систем первого типа может быть любая неотражающая нагрузка. В системах с резонансной нагрузкой отраженная волна принципиально необходима для работы системы.

Системы с активной нагрузкой можно разделить по способу перевода системы из режима накопления энергии в режим использования на следующие типы:

- системы с изменяемыми параметрами резонаторов;
- системы с постоянными параметрами резонаторов.

В системах первого типа для вывода накопленной в резонаторах энергии изменяется какой-либо из их параметров (коэффициент связи резонатора с трактом или тип колебания волны). В системах второго типа параметры накопительных резонаторов остаются постоянными во всех режимах работы. Изменение режима работы этих систем осуществляется только за счет фазовых и/или амплитудных модуляций волны генератора.

Системы с постоянными параметрами накопительных резонаторов могут быть разделены по форме вершины выходного СВЧ импульса (системы с переменными параметрами резонаторов практи-

чески всегда формируют импульсы со спадающей вершиной, а системы с накоплением энергии в линиях задержки – импульсы с плоской вершиной):

- системы без коррекции формы вершины выходного импульса;
- системы с коррекцией формы вершины выходного импульса.

К первому типу относятся системы, формирующие СВЧ импульс с вершиной, спадающей по экспоненциальному закону, который образуется за счет волны, излучаемой из резонатора. Ко второму типу относятся системы, в которых за счет применения специальных средств возможно получение выходного СВЧ импульса с вершиной практически любой заданной формы, в том числе, плоской. Такое разделение связано с возможными областями практического использования систем.

Системы с накоплением энергии в линиях задержки (ЛЗ) можно разделить по принципу использования ЛЗ:

- с использованием ЛЗ для временного смещения СВЧ импульсов;
- с использованием ЛЗ как элементов резонаторов.

В системах первого типа ЛЗ используются для временной задержки отдельных частей СВЧ импульса. В системах второго типа ЛЗ используются как элементы резонаторов со стоячими или бегущими волнами. Использование таких резонаторов дает возможность формировать выходные импульсы с плоской вершиной без использования специальных средств коррекции формы импульса.

Системы, использующие ЛЗ для временного смещения СВЧ импульсов, можно разделить по типу применяемых коммутирующих элементов:

- с коммутацией на высоком уровне мощности;
- с коммутацией на низком уровне мощности;
- без коммутирующих элементов.

Такое разделение имеет значение для практического применения систем компрессии энергии.

Конечно, внутри каждой подгруппы может быть осуществлено дальнейшее деление систем по различным признакам, однако это в настоящее время представляется нецелесообразным, так как ос-

новные принципиальные особенности систем учтены в приведенной классификации, а учет дополнительных признаков приведет к неоправданному усложнению классификационной схемы.

Необходимо отметить, что приведенная схема классификации является до определенной степени условной, поскольку некоторые системы могут быть одновременно отнесены к разным типам. Например, системы, использующие линии задержки как элементы резонаторов. В этом случае причисление их к той или иной группе осуществляется на основании наиболее характерного признака.

Системы компрессии энергии характеризуются следующими основными параметрами:

$K_p$  – коэффициент увеличения мощности СВЧ волны – отношение импульсной мощности СВЧ волны на выходе системы к мощности питающего СВЧ генератора;

$\eta_p$  – эффективность передачи энергии (коэффициент полезного действия), которая определяется как отношение энергии, переданной системой в ускоряющую секцию ЛУЭ, к энергии, "полученной" системой от генератора;

$t_n$  – длительность СВЧ импульса на выходе системы; этот параметр характеризует возможности использования конкретной системы для питания ЛУЭ.

Наиболее характерные практически достижимые величины основных параметров различных типов систем компрессии энергии СВЧ поля приведены в табл.1.1. В этой таблице для выходного импульса со спадающей вершиной дано значение его длительности по основанию.

## **1.2. Системы компрессии с накопительными резонаторами**

По классификационной схеме ЛУЭ с системами компрессии энергии каждой группы делятся на подгруппы по способу перевода их из режима накопления энергии в режим использования. Применительно к системам данной группы это деление сводится к следующему:

**Таблица 1.1**

Основные параметры систем компрессии энергии СВЧ поля

Тип системы		Форма вер- шины вы- ходного им- пульса	$K_P$	$\eta_b$	$t_n$
С накопительными резонаторами	С изменяемыми параметрами ре- зонаторов	Спадающая	30 -50 дБ	0,4 - 0,6	1 - 100 нс
	С постоянными параметрами ре- зонаторов	Спадающая произвольная	6 - 7	0,6 - 0,7	0,1 - 1 мкс
	С резонансной нагрузкой	“Колокол”	10 -30 дБ	0,6 - 0,7	0,1 - 1 мкс
С линиями задержки	Коммутация на высоком уровне	Плоская	2 - 8	0,8 - 1,0	10 - 100 нс
	Коммутация на низком уровне	Плоская	2 - 8	0,8 - 1,0	10 - 100 нс
	Без коммутаторов	Плоская	2 - 5	0,8 - 1,0	10 - 100 нс
	ЛЗ - элементы резонаторов	Плоская, спадающая	5 - 10	0,6 - 0,7	10 - 100 нс

системы, в которых для использования накопленной энергии осуществляется изменение каких-либо параметров накопительных резонаторов (в частности, изменение коэффициента связи резонатора с СВЧ трактом); сюда же относятся и системы, у которых кроме изменения параметров резонатора производятся и какие-либо другие коммутации (например, изменение фазы волны СВЧ генератора);

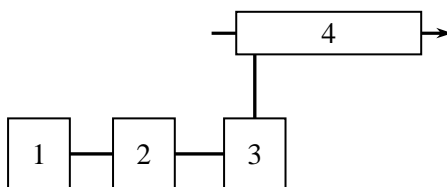
системы, в которых использование накопленной энергии происходит без изменения параметров накопительных резонаторов, а только за счет манипуляций (модуляций) с волной, падающей на резонатор.

Рассмотрим подробнее несколько наиболее характерных типов систем компрессии энергии.

### 1.2.1. Системы с изменяемыми параметрами накопительных резонаторов

Основной принцип работы систем компрессии с изменяемыми параметрами накопительных резонаторов заключается в том, что для использования накопленной энергии осуществляется резкое уменьшение постоянной времени резонатора за счет изменения его коэффициента связи с трактом или изменения вида возбуждаемых в нем колебаний. При этом происходит быстрая "выгрузка" энергии из резонатора в нагрузку и формируется СВЧ импульс большой мощности. Такие системы достаточно хорошо исследованы теоретически и экспериментально.

Типичная структурная схема ЛУЭ с системой компрессии такого типа приведена на рис.1.2. ЛУЭ содержит следующие основные элементы: ускоряющую секцию 1 (см. рис.1.2), накопительный резонатор 2 с бегущими или стоячими волнами, имеющий два отверстия (элемента) связи, высокочастотный генератор 3 и коммутирующее устройство 4. С помощью одного из элементов связи резонатор подключается к генератору. Этот элемент обеспечивает такую величину коэффициента связи  $\beta$ , которая при заданной длительности СВЧ импульса генератора  $t_{и}$  и собственной добротности накопительного резонатора  $Q_0$  обеспечивает максимальную величину накопленной энергии. Эта величина коэффициента связи определяется выражением:



**Рис.1.2.** Структурная схема ЛУЭ с системой компрессии энергии СВЧ поля с накопительным резонатором

$$\beta \cong 1,25644 \frac{Q_0}{\pi f_0 t_{и}} - 1, \quad (1.1)$$

где  $f_0$  – собственная частота накопительного резонатора.

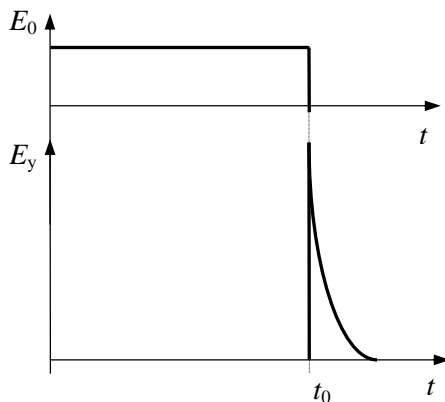
С помощью второго элемента связи резонатор подключается к ускоряющей секции через коммутирующее устройство. Величина коэффициента связи этого элемента выбирается в зависимости от необходимой длительности выходного СВЧ импульса или от требуемого коэффициента увеличения мощности: чем больше коэффициент увеличения мощности, тем меньше длительность выходного импульса.

Рабочий цикл такого ускорителя продемонстрируем с помощью временных диаграмм, представленных на рис.1.3. Он состоит из двух этапов. На первом этапе происходит накопление в резонаторе 2 энергии СВЧ волны (см.рис.1.2), поступающей от генератора 3 на первый элемент связи резонатора.

Коммутирующий элемент 4 в течение этого периода закрывает СВЧ тракт, соединяющий резонатор с ускоряющей секцией 1.

Накопленная в резонаторе энергия  $U_n$  возрастает по экспоненциальному закону, волна на входе ускоряющей секции  $E_y$  отсутствует (см. рис.1.3).

После завершения процесса накопления энергии в момент времени  $t_0$  коммутирующий элемент 4 открывает СВЧ тракт и накопленная в резонаторе энергия через второй элемент связи передается в ускоряющую секцию. В течение этого периода мощность СВЧ волны на входе ускоряющей секции уменьшается по экспоненциальному закону от своего максималь-



**Рис.1.3.** Временные диаграммы работы системы компрессии с накопительным резонатором:  $E_0$  – амплитуда волны на выходе СВЧ генератора;  $E_y$  – амплитуда волны на входе ускоряющей секции

ного значения (в момент времени  $t_0$ ) практически до нуля (в конце импульса).

Другой способ изменения режима работы системы заключается в трансформировании возбуждаемого вида колебаний в накопительном резонаторе. Суть данного метода заключается в том, что в процессе накопления энергии в резонаторе возбуждается такой вид колебания, на котором резонатор имеет большую величину нагруженной добротности при значении коэффициента связи близком к критическому. После накопления энергии вид колебания изменяется таким образом, что коэффициент связи резонатора с трактом на новом виде существенно возрастает. Такие изменения вида колебания волны в резонаторе могут быть выполнены зажиганием в нем СВЧ разряда специальной конфигурации. Существенным недостатком такого способа является невозможность практически обеспечить высокую эффективность передачи энергии в нагрузку, так как зажигание разряда в резонаторе приводит к дополнительным потерям энергии. Указанный недостаток ограничивает возможности применения таких систем.

Системы, применяемые в рассмотренных ЛУЭ, имеют следующие основные характеристики. Коэффициент увеличения мощности СВЧ волны  $K_P$  определяется выражением:

$$K_P = \frac{P_y}{P_0} = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1 + \beta_1)^2} (1 - e^{-t_0/\tau_1})^2, \quad (1.2)$$

где  $P_y$  и  $P_0$  – мощность волны на входе ускоряющей секции и мощность СВЧ генератора соответственно;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – коэффициенты связи резонатора для первого и второго элементов связи соответственно;  $t_0$  – длительность импульса генератора;  $\tau_1$  – постоянная времени резонатора в период накопления энергии. Максимальная величина  $K_P$  может составлять 20-30 дБ для обычных резонаторов и 50-70 дБ для сверхпроводящих. Системы формируют достаточно короткие выходные импульсы, длительность которых составляет не более десятков наносекунд (по основанию).

Максимальная эффективность передачи энергии  $\eta$ , рассматриваемых систем не превышает 0,815, что связано с особенностями процессов накопления энергии в резонаторах. Это значение эффективности является максимальным практически для всех систем с накопительными резонаторами. Исключения составляют системы с изменяемым коэффициентом связи резонатора в период накопления энергии или использующие дополнительный резонатор. Теоретически эффективность накопления энергии в таких системах может доходить до единицы.

Как уже упоминалось, для накопления энергии могут применяться резонаторы с бегущими или стоячими волнами. Однако при необходимости получения очень больших величин коэффициента  $K_p$  предпочтительным является применение резонаторов со стоячими волнами. Они обеспечивают более высокие значения собственной добротности:  $(1-2) \cdot 10^5$  для неохлаждаемых резонаторов (без использования сверхпроводимости) и порядка  $10^{10}-10^{11}$  для сверхпроводящих резонаторов. Характерная величина собственной добротности для резонаторов с бегущими волнами составляет  $(1-2) \cdot 10^4$ , то есть примерно на порядок меньше.

Коэффициент связи резонатора равен отношению  $Q_0/Q_{вн}$  (где  $Q_{вн}$  – внешняя добротность резонатора). Поэтому в резонаторах с большими величинами  $Q_0$  могут быть получены большие значения коэффициента связи и, следовательно (см. выражение (1.2.)), коэффициента  $K_p$ . Кроме того, резонаторы с более высокими значениями собственной добротности  $Q_0$  позволяют получить более длинный выходной СВЧ импульс, то есть поддерживают повышенное значение амплитуды СВЧ волны в течение большего времени.

Существенными недостатками систем компрессии с изменяемыми параметрами накопительных резонаторов являются: во-первых, необходимость использования мощных СВЧ коммутаторов (на уровнях мощности в сотни мегаватт такой коммутатор представляет собой достаточно сложное и энергоемкое устройство, имеющее, к тому же, относительно низкую надежность и долговечность), и во-вторых, значительные изменения выходной мощно-

сти в течение СВЧ импульса, что приводит к существенному возрастанию ширины энергетического спектра ускоренного пучка на выходе ускорителя.

### ***1.2.2. Системы с постоянными параметрами накопительных резонаторов***

Типичным представителем систем компрессии данного типа является система *SLED*. Системы этого типа в значительной мере свободны от недостатков, присущих системам с изменяемыми параметрами резонаторов. В них отсутствуют мощные СВЧ коммутаторы, а выходной СВЧ импульс имеет менее крутой спад вершины. Однако в силу особенностей работы таких систем максимальная величина коэффициента увеличения мощности  $K_p$  для них не может превышать девяти.

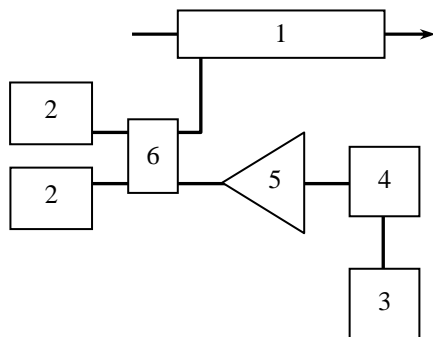
Принцип работы систем типа *SLED* основан на том, что амплитуда волны, излучаемой из пересвязанного резонатора ( $\beta \gg 1$ ), почти в два раза превышает амплитуду волны генератора, а фаза противоположна фазе волны генератора, отраженной от элемента связи резонатора с трактом (далее: волна, отраженная от резонатора). Следовательно, если после накопления энергии в резонаторе быстро изменить фазу волны генератора на  $180^\circ$ , то отраженная от резонатора волна сложится с волной, излучаемой из него, в одной фазе. При этом амплитуда суммарной волны (здесь и далее имеется в виду амплитуда напряженности электрического поля волны) возрастает почти в три раза, а мощность – в девять раз.

Структурная схема ЛУЭ с системой компрессии энергии типа *SLED* представлена на рис.1.4. Основными элементами ускорителя являются: ускоряющая секция 1, накопительные резонаторы 2, включенные между выходом усилителя мощности и входом ускоряющей секции с помощью высокочастотного моста б, задающий генератор 3, быстродействующий фазовращатель 4, усилитель мощности 5. СВЧ мост б позволяет осуществить развязку входа и выхода системы так, что волна с выхода усилителя мощности поступает только на элементы связи резонаторов, а волны, излучае-

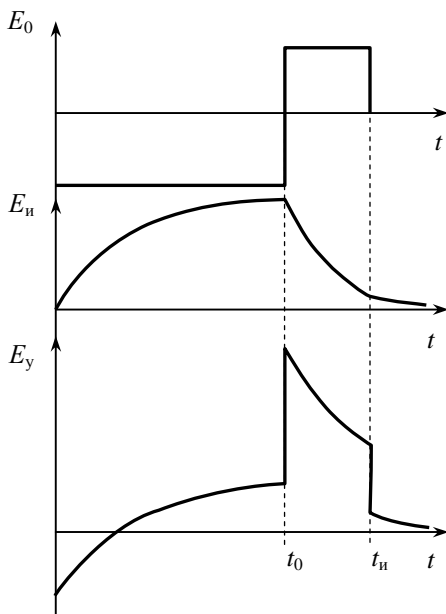
мые из резонаторов и отраженные от них, поступают только на вход ускоряющей секции. Такая же развязка может быть осуществлена и при использовании циркулятора и одного накопительного резонатора. Однако в настоящее время отсутствуют циркуляторы, способные надежно работать на уровнях мощности порядка десятков-сотен мегаватт.

Работу ЛУЭ с такой системой рассмотрим с помощью временных диаграмм, приведенных на рис.1.5. Здесь изменение знака волны означает изменение ее фазы на  $180^\circ$ .

В первой – большей – части СВЧ импульса генератора происходит накопление энергии в резонаторах. Амплитуда волны  $E_n$ , излучаемой из резонаторов, возрастает (см. рис.1.5). Результирующая волна на входе ускоряющей секции  $E_y$  образуется сложением волны, падающей на резонатор  $E_0$ , и волны, излученной из него  $E_n$ . В момент времени  $t_1$ , когда заканчивается процесс накопления энергии, фаза



**Рис.1.4.** Структурная схема ЛУЭ с системой компрессии энергии СВЧ поля типа *SLED* (пояснения в тексте)



**Рис.1.5.** Временные диаграммы работы системы компрессии типа *SLED*

волны  $E_0$  с помощью фазовращателя 4 изменяется на  $180^\circ$ . В результате волны  $E_0$  и  $E_{\text{н}}$  складываются на входе ускоряющей секции в одной фазе и амплитуда результирующей волны  $E_y$  увеличивается. Далее, до момента времени  $t_2$ , соответствующего окончанию импульса генератора, амплитуда волны  $E_y$  уменьшается по экспоненциальному закону за счет уменьшения амплитуды волны  $E_{\text{н}}$ .

Реальные значения коэффициента увеличения мощности таких систем обычно не превышают 7-8. Это связано с различными причинами, но наиболее существенной является ограниченная величина коэффициента связи резонаторов с трактом  $\beta$ . Для накопительных резонаторов с собственной добротностью порядка  $100 \cdot 10^3$  величина коэффициента связи  $\beta$ , при которой выходной СВЧ импульс имеет приемлемые параметры, находится в пределах 5-15. При этом амплитуда излучаемой из резонаторов волны в установившемся режиме составляет  $(1,7-1,8) \cdot E_0$ . Реальные значения эффективности передачи энергии этих систем составляют (60-70) %.

Основным недостатком систем компрессии энергии с постоянными параметрами накопительных резонаторов является ограниченная величина коэффициента увеличения мощности.

Существуют варианты схем построения таких систем, позволяющие в какой-то мере повысить коэффициент увеличения мощности и эффективность передачи энергии или изменить форму выходного импульса. Некоторые из этих схем будут рассмотрены в следующих разделах.

### ***1.2.3. Системы с комбинированными методами изменения режима работы***

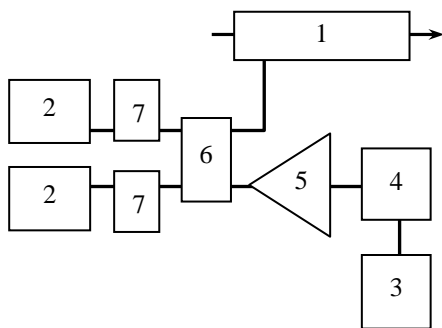
К системам компрессии энергии, использующим комбинированные методы перевода системы из режима накопления энергии в режим использования, относятся системы, в которых изменение режима работы осуществляется как изменением параметров резонаторов, так и манипуляциями с волной генератора. В общем случае они относятся к типу систем с изменяемыми параметрами накопительных резонаторов, и поэтому не выделены в самостоятель-

ный тип систем. В то же время они обладают свойствами, присущими системам обоих типов.

Типичная схема ЛУЭ с комбинированной системой компрессии энергии (рис.1.6) имеет практически такую же схему, как ЛУЭ, рассмотренный на рис.1.4. Отличия заключаются в том, что здесь резонаторы имеют только один элемент связи и подключены они к СВЧ тракту через коммутирующие устройства 7, позволяющие изменять коэффициенты связи резонаторов с СВЧ трактом.

Накопление энергии в резонаторах осуществляется при коэффициенте связи с трактом  $\beta = 1$ . В период использования накопленной энергии он увеличивается ( $\beta \gg 1$ ). Кроме того, в этот период изменяется и фаза волны генератора на  $180^\circ$ . В результате, к волне, излучаемой из резонаторов, добавляется волна генератора, что позволяет повысить мощность СВЧ волны на входе ускоряющей секции.

Следует отметить, что использование одновременного изменения коэффициента связи резонаторов с трактом и фазы волны генератора целесообразно только при относительно небольших значениях коэффициента увеличения мощности. При больших величинах коэффициента  $K_p$  добавка волны генератора к излучаемой из резонаторов волне оказывается несущественной. В то же время применение дополнительного устройства – фазовращателя – приводит к усложнению системы и повышению ее стоимости.



**Рис.1.6.** Структурная схема ЛУЭ с системой компрессии с комбинированной коммутацией (пояснения в тексте)

### 1.2.4. Системы компрессии с резонансной нагрузкой

Основное отличие систем компрессии, работающих на резонансную нагрузку, от систем других типов заключается в том, что здесь нагрузка является существенным элементом, от параметров которого в значительной мере зависят параметры системы. Их также можно назвать системами со связанными резонаторами.

Принцип работы таких систем основан на том, что при определенных параметрах системы из двух связанных резонаторов энергия, накопленная в одном из них, полностью переходит поочередно то в один резонатор, то в другой. При этом в первом приближении можно считать, что отношение максимальных эквивалентных мощностей СВЧ волны в этих резонаторах определяется выражением:

$$P_1/P_2 = Q_2/Q_1, \quad (1.3)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – эквивалентные мощности СВЧ волны в первом и втором резонаторах;  $Q_1$  и  $Q_2$  – собственные добротности первого и второго резонаторов. Из выражения (1.3) следует, что чем больше отношение добротностей резонаторов, тем большее повышение эквивалентной мощности может быть достигнуто. Резонаторы могут быть как со стоячими, так и с бегущими волнами (РБВ). В случае РБВ эквивалентная мощность представляет собой мощность СВЧ волны, циркулирующей по кольцу резонатора.

Вариант ЛУЭ с системой компрессии энергии с резонансной нагрузкой представлен на рис.1.7. ЛУЭ содержит следующие основные элементы: ускоряющую секцию 1, накопитель-

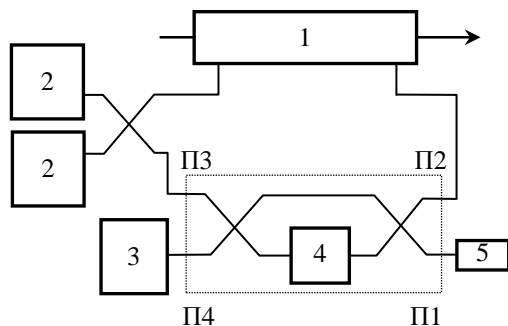


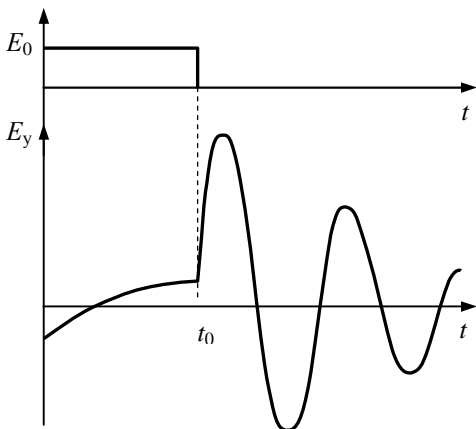
Рис.1.7. Структурная схема системы компрессии с резонансной нагрузкой

ные резонаторы 2, СВЧ генератор 3, высокочастотный коммутатор, состоящий из двух СВЧ мостов и быстродействующего фазовращателя 4, и поглощающей нагрузки 5. С помощью фазовращателя 4 СВЧ коммутатор переключает направление движения СВЧ волн. В одном состоянии коммутатора (состояние I) СВЧ волна, поступающая на плечо П1 коммутатора, выходит из плеча П3, а волна, поступающая на плечо П2, выходит из плеча П4. В другом состоянии (состояние II) плечи П3 и П4 меняются местами, то есть, волна из плеча П1 выходит из плеча П4, а из П2 – из плеча П3. В состоянии (2) генератор 3 оказывается подключенным к нагрузке 5, а ускоряющая секция 1 – замкнута в кольцо через накопительные резонаторы 2, образуя резонатор с бегущими волнами (РБВ).

Работает устройство следующим образом. Когда коммутатор находится в состоянии I, происходит накопление энергии в резонаторах 2. Мощность, отражаемая от резонаторов, проходит через ускоряющую секцию 1 и поступает в нагрузку 5. По окончании процесса накопления СВЧ генератор 3 выключается, а коммутатор переводится в состояние II. При этом волной, падающей на резонаторы, является волна, выходящая из ускоряющей секции. Фазовый набег волны в кольце РБВ выбирается так, чтобы падающая на резонаторы волна складывалась в одной фазе с волной, излучаемой их них. Тогда после каждого оборота амплитуда циркулирующей по кольцу волны будет возрастать до тех пор, пока вся накопленная в резонаторах энергия не выгрузится в кольцо. После этого начнется обратная перекачка энергии из кольца в резонаторы. График изменения амплитуды волны, циркулирующей по кольцу резонатора, приведен на рис.1.8.

Если потери в кольце РБВ незначительны, то коэффициент повышения мощности в такой системе можно оценить по следующему выражению:

$$K_P = P_K / P_0 = U_H / (t_K P_0), \quad (1.4)$$



**Рис.1.8.** Графики изменения амплитуды СВЧ волн в системе компрессии с накопительными резонаторами и резонансной нагрузкой:  $E_0$  – амплитуда волны источника СВЧ мощности;  $E_y$  – амплитуда волны, циркулирующей по кольцу РБВ (волна на входе ускоряющей секции)

где  $P_k$  и  $P_0$  – мощности СВЧ волны в РБВ и на выходе генератора соответственно;  $U_n$  – накопленная в резонаторах энергия;  $t_k$  – время одного оборота волны по кольцу.

Практически достижимые величины коэффициента  $K_p$  в такой системе могут составлять 150-200 (для накопительных резонаторов с собственной добротностью порядка  $100 \cdot 10^3$ ) и более (при использовании сверхпроводящих резонаторов). При этом время "существования" в кольце волны с такой мощностью оказывается примерно на порядок больше, чем при сбрасывании импульса на активную нагрузку.

Подробнее работа этой системы и ее характеристики рассмотрены в главе 2.

### **1.2.5. Получение СВЧ импульсов с плоской вершиной**

Мощность СВЧ волны на входе ускоряющей секции ЛУЭ, для питания которого используется система с накопительными резонаторами, претерпевает существенные изменения в период использования накопленной энергии, то есть в течение "рабочей" части СВЧ импульса (например, см. рис.1.3 и 1.5). Крутой передний фронт импульса определяется длительностью переходных процессов в

коммутирующих элементах при переходе системы в режим использования энергии, а относительно растянутый задний фронт определяется постоянной времени накопительного резонатора. Использование такого импульса для ускорения пучка приведет к значительному возрастанию энергетического разброса частиц пучка. Поэтому естественным является стремление каким-либо образом попытаться сформировать на выходе системы импульс с плоской вершиной.

Теоретически импульс с плоской вершиной может быть сформирован на выходе любой системы с накопительными резонаторами. Например, в системе с изменяемыми параметрами резонаторов (см. рис.1.2) импульс с плоской вершиной может быть сформирован при изменении величины коэффициента связи  $\beta$  в период использования накопленной энергии. В течение СВЧ импульса коэффициент должен возрастать от какого-то начального значения  $\beta_n$  до бесконечности, если накопленная энергия используется полностью. Необходимый в этом случае закон изменения коэффициента связи можно определить, решая уравнение баланса мощности:

$$\frac{dU_n}{dt} + P_p + P_{и} = P_0 , \quad (1.5)$$

где  $U_n$  – накопленная в резонаторе энергия;  $P_{и}$ ,  $P_p$  и  $P_0$  – мощности, излучаемая из резонатора, рассеиваемая в резонаторе и падающая на резонатор соответственно. Полагая в данном случае, что  $P_{и} = \text{const}$ , а  $P_0 = 0$ , и проведя необходимые подстановки, получим уравнение относительно  $\beta$ :

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{2\pi f_0}{Q_0} (1 + \beta)\beta , \quad (1.6)$$

где  $Q_0$  и  $f_0$  – собственные добротность и частота резонатора соответственно.

Решением уравнения (1.6) является выражение:

$$\beta(t) = \left[ \frac{1 + \beta_n \exp\left(-\frac{2\pi f_0}{Q_0} t\right) - 1}{\beta_n} \right]^{-1} . \quad (1.7)$$

Начальное значение коэффициента связи резонатора  $\beta_n$  зависит от выходной мощности СВЧ волны  $P_n$ . С учетом (1.2) можно определить максимальную длительность импульса в этом случае  $t_{n \max}$ :

$$t_{n \max} = -\frac{Q_o}{2\pi f_o} \ln\left(\frac{\beta_n}{1 + \beta_n}\right), \quad (1.8)$$

где  $\beta_n = \frac{P_n}{P_o} \frac{(1 + \beta_1)^2}{4\beta_1} (1 - e^{-t_o/\tau_1})^{-2}$ ;  $\beta_1$  – коэффициент связи резонатора с трактом в период накопления энергии.

Несмотря на то, что существует теоретическая возможность получить импульс с плоской вершиной на выходе рассмотренной системы, практическая реализация этой возможности представляется весьма проблематичной. По крайней мере до настоящего времени эту возможность еще никто не реализовал, поскольку слишком сложно реально создать устройство, которое позволило бы изменять связь резонатора с трактом на высоком уровне мощности в течение десятков наносекунд, да еще и по вполне определенному закону.

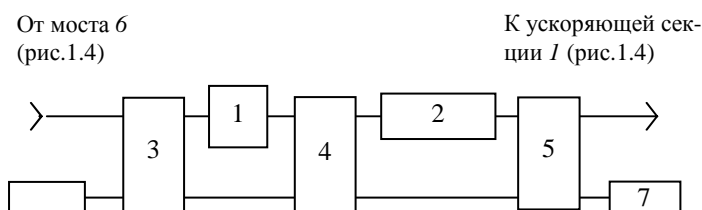
Практически сформировать импульс с плоской вершиной можно в системе с постоянными параметрами накопительных резонаторов. Как уже отмечалось (см. подраздел 1.2.2), в таких системах выходная волна образуется за счет волны, излучаемой из резонаторов, и волны генератора, которые сравнимы по величине. При этом получить импульс с плоской вершиной можно, изменяя определенным образом параметры волны генератора. Это может быть фазовая или амплитудная модуляция, осуществляемая в цепях возбуждения выходного усилителя мощности.

Идея использования фазовой модуляции для этой цели заключается в том, что в каждый момент времени в течение выходного импульса волна генератора складывается с волной, излучаемой из резонаторов, в такой фазе, чтобы амплитуда результирующей волны оставалась постоянной. Недостатком этого метода является то, что при этом также изменяется фаза волны на выходе системы.

Другой способ получения импульсов с плоской вершиной предполагает амплитудную модуляцию волны генератора. Здесь для

получения плоской вершины выходного импульса амплитуда СВЧ волны генератора возрастает во времени (по определенному закону) по мере уменьшения излучаемой из резонатора волны. Подробнее работа такой системы рассмотрена в главе 2.

Еще один способ получения импульса с плоской вершиной, который может быть реализован практически, предполагает использование линии задержки. В этом случае в ЛУЭ с системой компрессии (см. рис.1.4) между СВЧ мостом 6 и входом ускоряющей секции 1 добавляется устройство, схема которого приведена на рис.1.9. Устройство содержит следующие элементы: СВЧ коммутатор 1, линию задержки 2, три высокочастотных моста 3, 4 и 5,

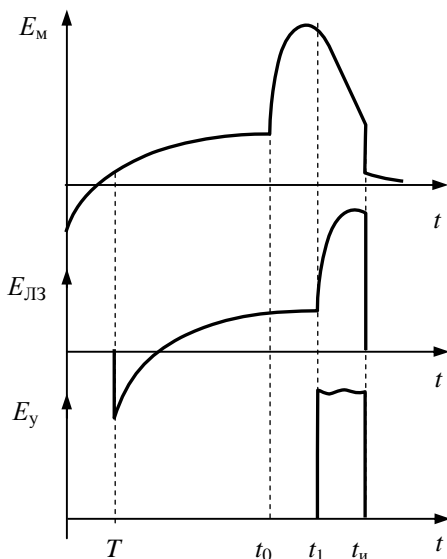


**Рис.1.9.** Структурная схема устройства для формирования СВЧ импульса с плоской вершиной

поглощающие нагрузки 6 и 7. Временные диаграммы работы устройства приведены на рис.1.10. В период накопления энергии СВЧ волна проходит через мост 3, фазовращатель 1, мост 4, ЛЗ 2 и мост 5. При этом фазовращатель находится в таком состоянии, чтобы волна с выхода моста 4 поступала в ЛЗ (см. рис.1.9). После завершения этого периода в момент времени  $t_0$  включается фазовращатель системы компрессии энергии (поз. 4 рис.1.4) и начинается переходный процесс, в течение которого амплитуда СВЧ волны  $E_v$  на входном плече моста 3 возрастает до своего максимального значения. Длительность переходного процесса и время задержки волны в ЛЗ 2 выбираются равными половине длительности выходного импульса системы. В момент времени  $t_1$  фазовращатель 1 изменяет

состояние так, чтобы волна, выходящая из моста 4, поступала непосредственно на входное плечо моста 5, минуя ЛЗ 2. На другом плече моста 5 в этот момент времени появляется волна с выхода ЛЗ. Фазировка этих волн устанавливается так (конструкцией СВЧ трактов или дополнительным фазовращателем), чтобы суммарная волна поступала на вход ускоряющей секции. В результате сложения этих импульсов амплитуда волны выходного импульса оказывается практически постоянной. Неравномерность его вершины для типичных значений параметров элементов системы составляет 5-10 %.

К недостаткам этого метода можно отнести относительную сложность дополнительного устройства и необходимость применения коммутирующих элементов, работающих на высоком уровне мощности. Кроме того, применение линий задержки с заданным временем задержки импульса практически исключает возможность регулировки длительности выходного импульса системы, что ограничивает области применения таких систем.



**Рис.1.10.** Временные диаграммы работы системы компрессии с формированием плоской вершины СВЧ импульса:  $E_M$  – амплитуда волны на входном плече моста;  $E_{ЛЗ}$  – амплитуда волны на выходе ЛЗ;  $E_в$  – амплитуда волны на выходе системы;  $T$  – время задержки ЛЗ

Существуют и другие способы формирования плоской вершины у выходных импульсов систем компрессии с постоянными параметрами накопительных резонаторов [14], [15].

### **1.3. Системы компрессии с накоплением энергии в линиях задержки**

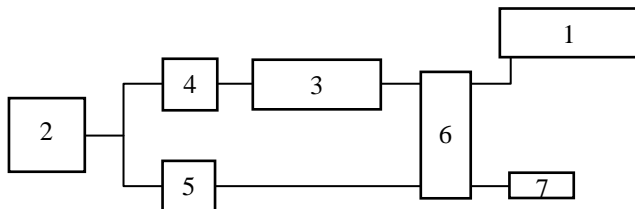
Применение линий задержки (ЛЗ) как накопительных элементов в системах компрессии энергии, используемых для СВЧ питания ЛУЭ, имеет ряд преимуществ по сравнению с накопителями на основе полых резонаторов. В качестве основных достоинств систем с накоплением энергии в ЛЗ можно отметить то, что, во-первых, на их выходе формируется импульс с плоской вершиной без применения специальных мер (из-за особенностей работы ЛЗ), и, во-вторых, при использовании ЛЗ с малыми потерями коэффициент передачи энергии в них может приближаться к единице, поскольку здесь отсутствуют принципиальные потери энергии, свойственные системам с накопительными резонаторами.

В соответствии с классификационной схемой ЛУЭ с системами компрессии, использующие для накопления энергии линии задержки (ЛЗ), делятся на несколько подгрупп. Рассмотрим подробнее схемы ЛУЭ с системами этих подгрупп.

#### ***1.3.1. Системы с коммутацией на высоком уровне мощности***

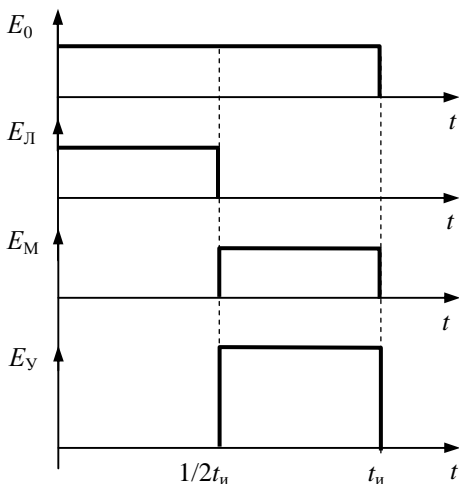
Основной принцип работы таких систем заключается в следующем. Выходной импульс СВЧ генератора разделяется каким-либо коммутирующим устройством на несколько равных по длительности частей. После чего каждая из частей смещается во времени с помощью ЛЗ так, чтобы к выходному суммирующему устройству они пришли одновременно. При этом мощность результирующей волны на выходе этого суммирующего устройства возрастает во столько раз, на сколько частей был разделен исходный импульс.

Схема простейшего варианта построения ЛУЭ с системой компрессии, реализующей этот принцип, приведена на рис.1.11. Основными элементами ЛУЭ являются: ускоряющая секция 1, СВЧ генератор 2, линия задержки 3, СВЧ коммутаторы 4 и 5, СВЧ мост 6 и нагрузка 7.



**Рис.1.11.** Структурная схема ЛУЭ с простейшей системой компрессии с накоплением энергии в ЛЗ

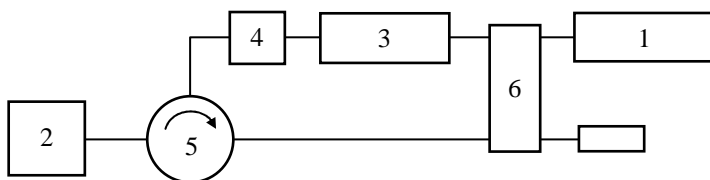
и нагрузка 7. Работает система следующим образом (см. временные диаграммы на рис.1.12). В первой половине СВЧ импульса генератора коммутатор 4 открыт, а коммутатор 5 – закрыт. СВЧ волна с выхода генератора поступает на вход линии задержки 3 (см.рис.1.11)



**Рис.1.12.** Временные диаграммы работы системы компрессии с линией задержки:  
 $E_0$  - амплитуда волны СВЧ генератора;  
 $E_{Л}$  - амплитуда волны на входе линии задержки;  
 $E_{М}$  - амплитуда волны на выходе линии задержки;  
 $E_{У}$  - амплитуда волны на входе ускоряющей секции

Время задержки сигнала в ЛЗ равно половине длительности СВЧ импульса генератора. Во второй половине СВЧ импульса коммутаторы переключаются: коммутатор 4 закрывается, коммутатор 5 открывается. В результате волна с выхода СВЧ генератора поступает непосредственно на входное плечо моста 6. Фазирувка этих волн устанавливается таким образом, чтобы суммарная волна поступала только на плечо моста, подключенное к ускоряющей секции. Мощность этой волны равна удвоенной мощности волны генератора, а длительность – в два раза меньше. Мощность выходной волны может быть увеличена последовательным соединением нескольких аналогичных каскадов. В этом случае (полагая, что потери мощности в ЛЗ отсутствуют) коэффициент увеличения мощности равен  $K_p = 2^n$ , где  $n$  – количество каскадов умножения, а длительность выходного импульса во столько же раз меньше исходного. Количество таких каскадов можно увеличивать до тех пор, пока длительность выходного импульса не окажется сравнимой с быстродействием коммутаторов.

Другой вариант построения схемы ЛУЭ с системой компрессии приведен на рис.1.13. От предыдущей схемы он отличается тем, что применение циркулятора 5 позволяет использовать только один коммутатор 4. Здесь в первой половине СВЧ импульса коммутатор 4 открыт и СВЧ волна генератора через циркулятор 5 поступает на вход линии задержки 3. Во второй половине импульса коммутатор 4 закрывается и отраженная от него волна через цир-



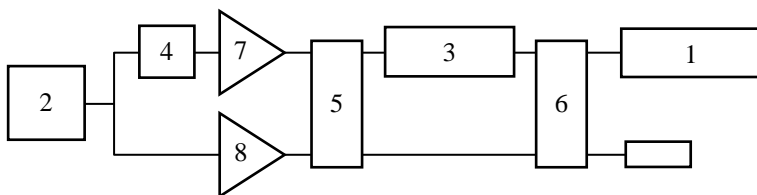
**Рис.1.13.** Структурная схема ЛУЭ с системой компрессии с накоплением энергии в линии задержки и одним высокочастотным коммутатором

кулятор 5 поступает непосредственно на входное плечо моста 6. Наличие только одного коммутатора в такой системе позволяет избежать проблем, связанных с необходимостью синхронизации момента срабатывания коммутаторов.

Возможны и другие варианты построения схем ЛУЭ, в которых используются системы компрессии с ЛЗ и коммутаторами на высоком уровне мощности.

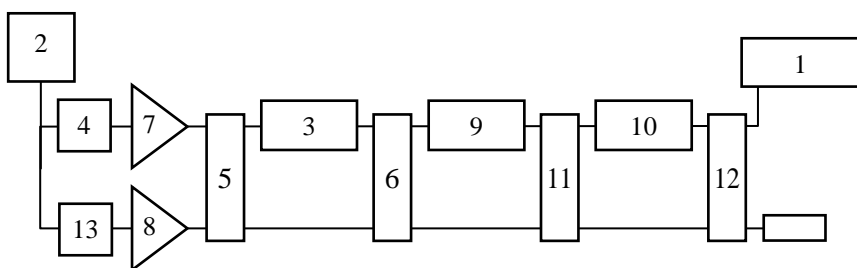
### 1.3.2. Системы с коммутацией на низком уровне мощности

Существенным недостатком систем компрессии, рассмотренных в предыдущем подразделе, является необходимость использования коммутаторов, работающих на высоком уровне мощности. В то же время аналогичные системы могут быть построены и без таких коммутаторов. Схема наиболее простого варианта ЛУЭ с такой системой приведена на рис.1.14. ЛУЭ содержит: ускоряющую секцию 1, задающий СВЧ генератор 2, линию задержки 3, быстродействующий фазовращатель 4, два СВЧ моста 5 и 6, два усилителя мощности 7 и 8. Фазовращатель изменяет фазу волны на  $180^\circ$ . В этом устройстве в зависимости от состояния фазовращателя суммарная волна усилителей мощности 7 и 8 поступает либо на вход ЛЗ, либо непосредственно на входное плечо моста 6. Эта система, как и рассмотренные в предыдущем подразделе, могут быть каскадированы для повышения коэффициента увеличения мощности.



**Рис.1.14.** Схема простейшего варианта ЛУЭ с системой компрессии с линией задержки и коммутацией на низком уровне мощности

Схема многокаскадной системы приведена на рис.1.15. От предыдущей (см. рис.1.14) она отличается тем, что состоит из нескольких последовательно соединенных каскадов и содержит еще один быстродействующий фазовращатель *13* в тракте возбуждения второго усилителя мощности, дополнительные ЛЗ *9* и *10*, дополнительные мосты *11* и *12*. Поскольку здесь источником СВЧ мощности для каждого последующего каскада является предыдущий, то время задержки каждой последующий ЛЗ в два раза меньше, чем у



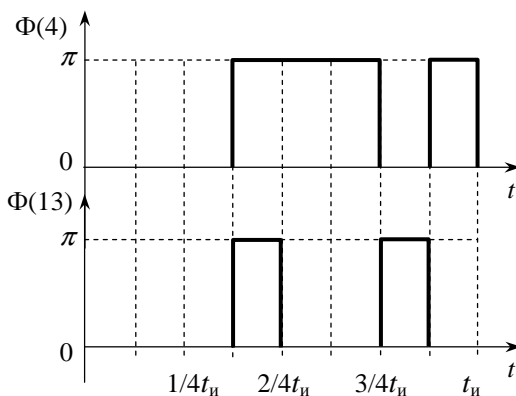
**Рис.1.15.** Структурная схема многокаскадной системы компрессии энергии с линиями задержки

предыдущей. Другими словами, время задержки для ЛЗ *3*, *9* и *10* составляют  $1/2 \cdot t_{и}$ ,  $1/4 \cdot t_{и}$  и  $1/8 \cdot t_{и}$ , соответственно.

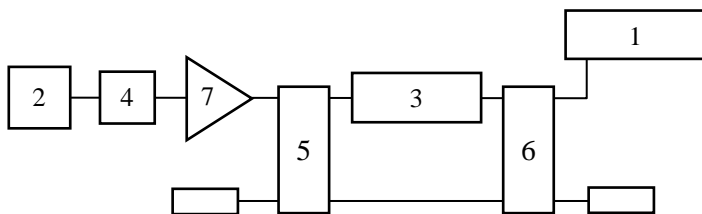
Работа первого каскада такой системы фактически только что была рассмотрена. А необходимые условия для работы последующих каскадов создаются с помощью специально подобранной фазовой модуляции в трактах возбуждения усилителей мощности. Эпюры необходимой фазовой модуляции волн на входах усилителей *7* и *8* приведены на рис.1.16. Более подробно работа системы рассмотрена в [16].

Количество каскадов может быть увеличено, но при этом существенно усложняются как сама система, так и необходимый закон модуляции.

К недостаткам рассмотренных выше систем с коммутацией на низком уровне мощности можно отнести необходимость использования двух СВЧ усилителей. Избавиться от этого недостатка можно с помощью устройства, схема которого изображена на рис.1.17. Здесь используется один усилитель СВЧ мощности с фазовращателем в тракте возбуждения и дополнительная ЛЗ. В общем случае для достаточно сложного закона модуляции СВЧ импульс разделяется на две равные по длительности части. Время задержки в ЛЗ равно половине длительности импульса. В первой половине СВЧ импульса создается фазовая модуляция, имитирующая работу одного из усилителей, а во второй половине – модуляция, имитирующая работу второго усилителя. При этом на входных плечах моста 6 (см. рис.1.17) оказываются волны



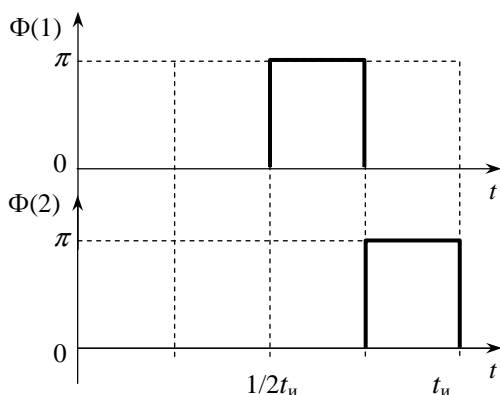
**Рис.1.16.** Эпюры фазовой модуляции СВЧ волн на входах усилителей мощности 7 и 8 системы компрессии по рис.1.15. ( $t_{и}$  - полная длительность импульса СВЧ генератора)



**Рис.1.17.** Схема ЛУЭ с системой компрессии с линиями задержки и одним усилителем СВЧ мощности

с необходимым законом фазовой модуляции. Нетрудно заметить, что в таком варианте КПД системы снижается вдвое, так как половина импульса расходуется "вхолостую".

В то же время в более простых случаях, например, для двухкаскадной системы, эффективность такого устройства может быть значительно выше. На рис.1.18 приведена эпюра фазовой модуляции волн для этого случая. Нетрудно видеть, что здесь достаточно сместить во времени одну волну относительно другой только на  $1/4$

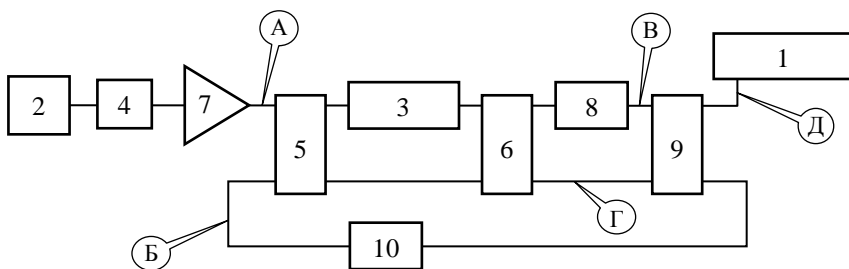


**Рис.1.18.** Эпюра фазовой модуляции волн на входах усилителей мощности ( $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ ) двухкаскадной системы компрессии с линиями задержки (аналог системы, приведенной на рис.1.15)

длительности импульса. При этом необходимая суммарная длительность импульса составит  $5/4$  от его "рабочей" части, а максимальный КПД увеличится до 80 %.

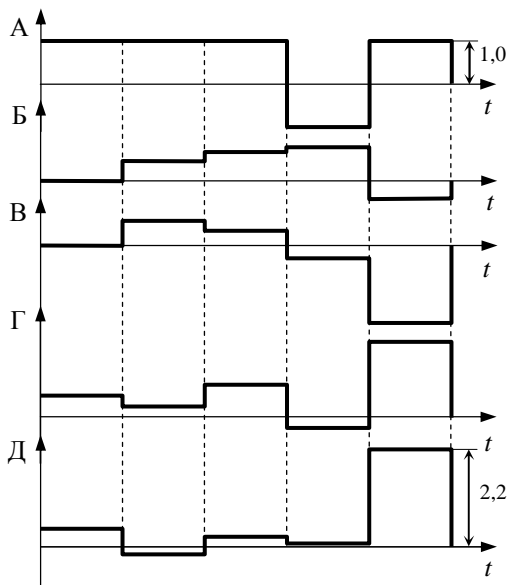
Структурная схема варианта построения ЛУЭ с аналогичной системой компрессии с одним усилителем приведена на рис.1.19. От варианта, приведенного на рис.1.17, она отличается методом формирования СВЧ волны на левом нижнем (рис.1.19) плече СВЧ моста 5. Здесь эта волна формируется за счет применения линии обратной связи, в которую включена дополнительная ЛЗ<sub>доп</sub> 10. Временные диаграммы работы системы показаны на рис.1.20.

В этой системе, как и в предыдущей, необходимая фазовая модуляция СВЧ волн на плечах входного моста создается за счет временного сдвига одной волны относительно другой ЛЗ<sub>доп</sub>, время за-



**Рис.1.19.** Структурная схема варианта ЛУЭ с системой компрессии с одним усилителем СВЧ мощности

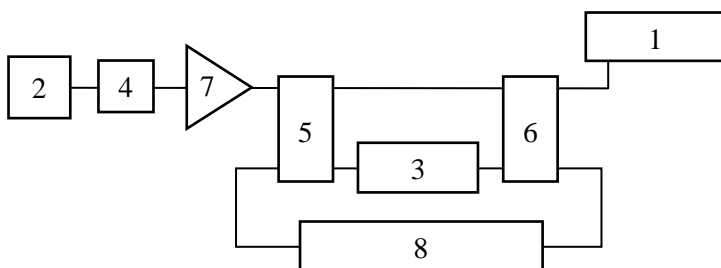
держки которой равно  $1/5$  длительности импульса СВЧ генератора. Такую же длительность имеет и выходной импульс. Однако по сравнению с предыдущей в этой системе меньше энергии теряется "вхолостую". Здесь оказывается возможным частично использовать энергию, запасенную в линиях задержки в период формирования волны на втором плече входного моста. Максимальный КПД этой системы составляет 90 %, а коэффициент увеличения мощности – 4,5 (также за счет запасаемой в ЛЗ в течение "нерабочей" части СВЧ импульса энергии).



**Рис.1.20.** Эпюры амплитуд СВЧ волн в различных точках системы компрессии, приведенной на рис.1.19

При наличии потерь в ЛЗ коэффициент увеличения мощности  $K_p$  и КПД снижаются. Если потери в ЛЗ первого каскада равны 0,5 дБ (тогда для ЛЗ второго каскада и ЛЗ<sub>доп</sub> имеем 0,25 дБ при однотипных линиях), то величина  $K_p$  составит 4,0, а  $\eta_3 = 80\%$ .

Возможен еще один вариант схемы системы компрессии энергии с одним СВЧ генератором. Схема ЛУЭ с такой системой приведена на рис.1.21. Здесь также используется линия обратной связи для формирования СВЧ волны на втором плече входного моста. Время задержки ЛЗ 3 составляет  $1/5$  длительности импульса генератора  $t_{и}$ , а ЛЗ 8 –  $2/5 \cdot t_{и}$ .



**Рис.1.21.** Вариант структурной схемы ЛУЭ с системой компрессии с одним СВЧ генератором (пояснения в тексте)

Работает система следующим образом. После окончания первой части СВЧ импульса длительностью  $1/5 \cdot t_{и}$  волна СВЧ генератора поступает на вход ЛЗ 8 и заполняет ее в течение последующих  $2/5 \cdot t_{и}$ . По окончании этого периода на двух плечах входного моста 5 оказываются волны с мощностью, равной мощности СВЧ генератора. Далее с помощью фазовращателя 4 результирующая волна направляется сначала в ЛЗ 3, а затем непосредственно на мост 6. Мощность суммарной волны на выходном плече моста 6, поступающей в ускоряющую секцию 1, в четыре раза превышает мощность волны генератора. Длительность импульса с такой мощностью составляет  $1/5 \cdot t_{и}$ . Максимальный КПД системы – 80%. По сравнению с предыдущей (см. рис.1.19) эта система имеет более

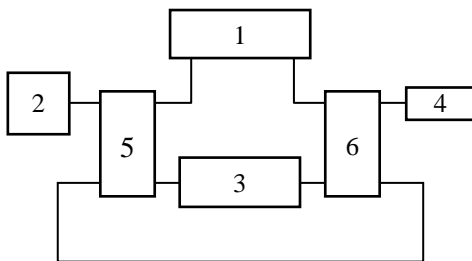
низкое значение коэффициента увеличения мощности, но содержит меньше элементов.

### *1.3.3. Системы с линиями задержки без коммутирующих элементов*

При использовании в системах компрессии энергии линий задержки в качестве накопительных элементов возможно создание таких схем, где вообще не требуется применение коммутирующих элементов. В этом случае ускоряющая секция, фактически, оказывается включенной в резонатор с бегущими волнами. Применение же ЛЗ позволяет сократить до минимума переходный процесс в этом резонаторе.

Структурная схема ЛУЭ с одной из таких систем, не содержащих коммутирующих элементов, приведена на рис.1.22. ЛУЭ содержит: ускоряющую секцию 1, СВЧ генератор 2, линию задержки 3, оконечную нагрузку 4 и два моста 5 и 6. Время задержки ЛЗ 3 равно времени заполнения ускоряющей секции 1. Такая система позволяет удваивать мощность на входе ускоряющей секции 1 за время, равное времени заполнения секции.

Работает система следующим образом. СВЧ волна с выхода генератора 2 поступает на вход моста 5 и делится на две волны. Эти волны, проходя через ускоряющую секцию 1 и ЛЗ 3, через интервал времени, равный времени заполнения ускоряющей секции, складываются на мосту 6. Суммарная волна через линию обратной связи поступает на входное плечо моста 5. В результате на входных плечах моста 5 оказываются две волны, мощность каждой из кото-

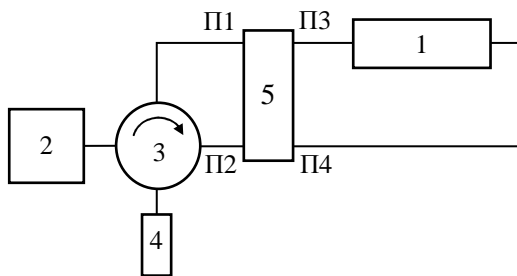


**Рис.1.22.** ЛУЭ с системой компрессии с линиями задержки без коммутирующих элементов

рых равна мощности волны СВЧ генератора. Фазовое соотношение этих волн может быть подобрано таким образом, чтобы результирующая волна полностью поступала на вход ускоряющей секции. После прохождения этой волной ускоряющей секции она разделяется мостом *б* на две волны, одна из которых поступает на мост *5*, а другая – в оконечную нагрузку. В дальнейшем процессе ЛЗ не участвует. КПД такого устройства оказывается в 1,3 - 1,4 раза больше, чем в случае применения "обычного" резонатора с бегущими волнами.

Интересно заметить, что это устройство очень просто каскадируется: вместо ускоряющей секции (УС) включается аналогичное устройство. Время задержки ЛЗ следует увеличить в два раза. Мощность волны в УС при этом превысит мощность генератора в четыре раза, а длительность переходного процесса составит учетверенное время заполнения УС. Количество каскадов можно увеличить.

Схема другого возможного варианта ЛУЭ с такой системой представлена на рис.1.23. Основными элементами ЛУЭ являются: ускоряющая секция *1*, СВЧ генератор *2*, циркулятор *3*, оконечная нагрузка *4* и СВЧ мост *5*. В этой системе функции ЛЗ выполняет



**Рис.1.23.** Вариант построения схемы ЛУЭ с системой компрессии с накоплением энергии в линиях задержки без коммутирующих элементов

сама ускоряющая секция *1*. Здесь в период "переходного процесса" (период заполнения ускоряющей секции) волны в ускоряющей секции двигаются навстречу друг другу, после чего суммарная волна через циркулятор *3* поступает на плечо ПЗ моста *5*, и скла-

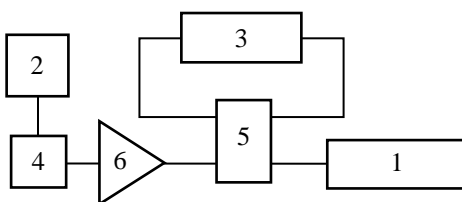
дывается с волной генератора, поступающей на плечо П1 этого моста. На входе ускоряющей секции  $I$  оказывается СВЧ волна двойной мощности. Такая система также может быть каскадирована.

#### ***1.3.4. Системы, использующие линии задержки как элементы резонаторов***

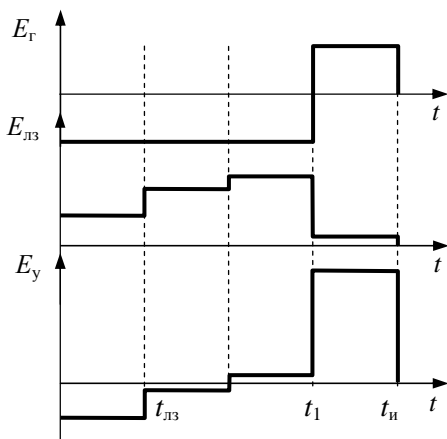
Применение ЛЗ в качестве элементов накопительных резонаторов позволяет создать системы, объединяющие свойства систем как с накопительными резонаторами, так и с линиями задержки. Это относится как к положительным свойствам, так и к недостаткам. К положительным свойствам таких систем можно отнести то, что они формируют выходные СВЧ импульсы с плоской вершиной как системы с ЛЗ, и относительно просты конструктивно как системы с накопительными резонаторами. С другой стороны, они обладают относительно низкой эффективностью передачи энергии (КПД), что свойственно системам с резонаторами. Типичным случаем использования линии задержки в качестве элемента резонатора является устройство, рассмотренное в работе [17]. В этом устройстве выходной импульс формируется при "однооборотном" выводе запасенной энергии из резонатора с бегущими волнами. Волновод, из которого выполнен резонатор, можно рассматривать как ЛЗ с временем задержки, равным длительности одного оборота волны по кольцу резонатора.

Такие же резонаторы с бегущими волнами, в которые для увеличения длительности пробега волны по кольцу включаются ЛЗ (это позволяет увеличить длительность выходного СВЧ импульса), могут быть использованы в системах с постоянными параметрами резонаторов.

Например, на рис.1.24 приведена схема ЛУЭ с системой, являющейся аналогом системы *SLED* (см. подраздел 1.2.2). Этот ЛУЭ содержит ускоряющую секцию 1, СВЧ генератор 2, линию задержки 3, быстродействующий фазовращатель 4, направленный ответвитель 5 и усилитель мощности 6. Здесь так же как и в системе *SLED*, в первой части СВЧ импульса происходит накопление энергии в ЛЗ (поскольку практически вся энергия, накопленная в резонаторе, находится в ЛЗ), а затем, после инвертирования фазы волны генератора 2, на входе ускоряющей секции 1 формируется СВЧ импульс с плоской вершиной (см. временные диаграммы на рис.1.25). Если переходное ослабление ответвителя 5 относительно небольшое (оптимальное значение около 3,5 дБ), то практически вся накопленная энергия выводится из резонатора за один оборот волны по кольцу. При этом длительность выходного

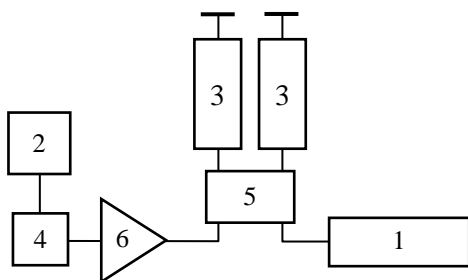


**Рис.1.24.** ЛУЭ с системой компрессии, в которой линия задержки используется как элемент резонатора



**Рис.1.25.** Эпюры амплитуд волн в системе по рис.1.24:  
 $E_g$  – амплитуда волны генератора;  
 $E_{ЛЗ}$  – амплитуда волны на входе ЛЗ;  
 $E_y$  – амплитуда волны на выходе системы;  
 $t_{ЛЗ}$  – время задержки ЛЗ;  
 $t_1$  – момент изменения фазы волны генератора;  
 $t_{II}$  – момент окончания импульса СВЧ генератора

импульса равна времени задержки в ЛЗ. Возможно и другое использование ЛЗ в системе типа *SLED*. Схема ЛУЭ с таким вариантом применения ЛЗ показана на рис.1.26. От варианта, приведенного на рис.1.24, он отличается тем, что здесь используется две ЛЗ 3 и направленный ответвитель с переходным ослаблением 3 дБ (СВЧ мост). Входы линий подключены к соответствующим плечам



**Рис.1.26.** Вариант схемы ЛУЭ с системой компрессии типа *SLED*, в которой для накопления энергии используются две линии задержки, подключенные как резонаторы со стоячими волнами

моста 5 так, чтобы коэффициент отражения от ЛЗ составлял 0,5-0,8, а их выходы были закорочены. Накопление энергии в образованных таким образом резонаторах происходит при многократном прохождении волны по ЛЗ от входа до места короткого замыкания и обратно. После инвертирования фазы волны генератора на входе ускоряющей секции формируется импульс с плоской вершиной, длительность которого равна удвоенному времени задержки ЛЗ. Временные диаграммы работы системы аналогичны приведенным на рис.1.25.

## Глава 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУЭ С СИСТЕМАМИ КОМПРЕССИИ ЭНЕРГИИ СВЧ ПОЛЯ

### 2.1. ЛУЭ с системами, использующими накопительные резонаторы

В работе ЛУЭ, для СВЧ питания которых используются системы компрессии энергии с накоплением энергии в резонаторах, существует ряд особенностей. Они связаны с существенными изменениями мощности ускоряющей СВЧ волны на входе ускоряющей секции в период использования накопленной энергии. А это, в свою очередь, может привести к заметному расширению энергетического спектра ускоряемого пучка. Поэтому в каждом конкретном случае использования систем компрессии энергии с изменяемыми параметрами накопительного резонатора в качестве источников СВЧ мощности для питания ЛУЭ необходимо выбирать соответствующий режим их работы в зависимости от параметров СВЧ генератора и ускоряющей секции (в частности, от времени ее заполнения) и от требуемого режима работы ускорителя.

#### *2.1.1. Характеристики ЛУЭ при использовании систем с изменяемыми параметрами резонаторов*

Основные принципы работы и характеристики ЛУЭ, для питания которых используются системы компрессии с изменяемыми параметрами резонаторов, качественно рассмотрены в подразделе

1.2.1. Проведем более подробный анализ работы и характеристик ЛУЭ с такими системами компрессии.

Пусть в период накопления энергии резонатор с собственной добротностью  $Q_0$  подключен только к СВЧ генератору (см. рис.1.2) и имеет коэффициент связи с трактом  $\beta_1$ . Мощность волны генератора в этот период постоянна и равна  $P_0$ . Тогда, решая уравнение баланса мощности в резонаторе, можно определить мощность излучаемой из него волны:

$$P_{\text{н}} = \alpha_0^2 P_0 (1 - e^{-t/\tau_1}), \quad (2.1)$$

где  $\alpha_0 = 2\beta_1/(1+\beta_1)$ ,  $\tau_1 = Q_0/\pi f_0(1+\beta_1)$  – постоянная времени резонатора в период накопления энергии.

Используя известные соотношения между накопленной в резонаторе энергией  $U_{\text{н}}$ , рассеиваемой в нем мощности  $P_{\text{р}}$  и мощности, излучаемой из него волны  $P_{\text{н}}$  [18], нетрудно определить зависимость величины  $U_{\text{н}}$  от времени  $t$ :

$$U_{\text{н}}(t) = \frac{2Q_0\beta_1 P_0}{\pi f_0(1+\beta_1)^2} (1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (2.2)$$

Откуда определим эффективность накопления энергии как отношение энергии накопленной в резонаторе, к энергии СВЧ волны генератора, равной  $P_0 \cdot t$ :

$$\eta_3 = \alpha_0 \frac{(1 - e^{-t/\tau_1})^2}{t/\tau_1}. \quad (2.3)$$

Анализируя это выражение на экстремум, можно определить условия максимальной передачи энергии в резонатор:

$$t_{\text{и}} \cong \frac{1,25644 \cdot Q_0}{\pi f_0(1+\beta_1)}, \quad (2.4)$$

где  $t_{\text{и}}$  – длительность импульса генератора, в течение которого происходит накопление энергии.

Подставляя соотношение (2.4) в (2.3), получим выражение для максимальной эффективности передачи энергии в резонатор:

$\eta_{\text{э max}} = 0,815$ . Эта величина достигается в пределе при  $\beta_1 \rightarrow \infty$  и  $t_{\text{и}} \rightarrow 0$ . Реальные значения эффективности заметно ниже.

В момент времени  $t_{\text{и}}$  заканчивается период накопления энергии. В этот момент увеличивается коэффициент связи резонатора (открывается элемент связи резонатора с ускоряющей секцией) до величины  $\beta_2$  ( $\beta_2 \gg \beta_1$ ), а СВЧ генератор отключается. При этом, если пренебречь длительностью переходного процесса в коммутирующих элементах, получим выражение для мощности волны  $P_y$ , излучаемой из резонатора и поступающей на вход ускоряющей секции:

$$P_y(t) = \frac{4\beta_1\beta_2 P_0 (1 - e^{-t_0/\tau_1})}{(1 + \beta_1)^2} \cdot e^{-\frac{2t-t_0}{\tau_2}}, \quad (2.5)$$

где  $\tau_2$  – постоянная времени резонатора в период использования накопленной энергии.

Максимум энергии СВЧ поля в ускоряющей секции длиной  $L$  достигается в момент времени  $t = t_{\text{и}} + L/v_{\text{гp}}$ , где  $v_{\text{гp}}$  – групповая скорость волны в секции. В этот момент времени передний фронт импульса подходит к концу секции. При этом распределение амплитуды напряженности ускоряющего поля на оси секции от продольной координаты  $z$  имеет вид:

$$E_L(z) = \frac{2\sqrt{2\alpha R_{\text{ш}} P_y \beta_1 \beta_2}}{1 + \beta_1} (1 - e^{-t_0/\tau_1}) \cdot e^{-\frac{L-z}{\tau_2 v_{\text{гp}}}} e^{-\alpha z}, \quad (2.6)$$

где  $R_{\text{ш}}$  – шунтовое сопротивление ускоряющей секции;  $\alpha$  – коэффициент затухания в секции.

Проведя интегрирование (2.6) по координате  $z$ , можно получить выражение для нормированной энергии ускоренного пучка  $W_{\text{п}}/W_0$ :

$$\frac{W_{\text{п}}}{W_0} = \frac{2\sqrt{\beta_1 \beta_2}}{1 + \beta_1} (1 - e^{-t_0/\tau_1}) \frac{e^{-\frac{\alpha L}{\alpha v_{\text{гp}}}} - e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L}) \left(1 - \frac{1}{\alpha v_{\text{гp}} \tau_2}\right)}, \quad (2.7)$$

где  $W_0$  – энергия пучка для ускорителя, построенного по традиционной схеме при тех же значениях параметров генератора и ускоряющей секции:

$$W_0 = \sqrt{2\alpha R_{\text{ш}} P_0} \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} . \quad (2.8)$$

Другими словами, выражение (2.7) показывает, во сколько раз возросла энергия пучка на выходе ускорителя с системой компрессии по сравнению с традиционной схемой СВЧ питания ЛУЭ.

Выражение для накопленной в ускоряющей секции энергии  $U_{\text{ун}}$  можно получить, интегрируя (2.6) с учетом соотношения  $P = k \cdot E^2$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности:

$$U_{\text{ун}} = \frac{2\beta_1\beta_2}{(1 + \beta_1)^2} \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau_1}} \right)^2 \cdot \frac{P_0}{v_{\text{гр}}} \left( \frac{1 - e^{-2(\alpha - 1/(v_{\text{гр}}\tau_2))L}}{\alpha - (1/v_{\text{гр}}\tau_2)} \right) \cdot e^{-\frac{2L}{v_{\text{гр}}\tau_2}} . \quad (2.9)$$

Проведя исследование выражений (2.7) и (2.9) на экстремум по параметру  $L$ , можно определить зависимость между параметрами системы компрессии и ускоряющей секции, при которых достигается максимальная энергия ускоренного пучка:

$$L = \frac{\tau_2 v_{\text{гр}}}{\alpha \tau_2 v_{\text{гр}} - 1} \cdot \ln(\alpha \tau_2 v_{\text{гр}}) \quad (2.10)$$

или максимальная величина энергии, запасенной в ускоряющей секции:

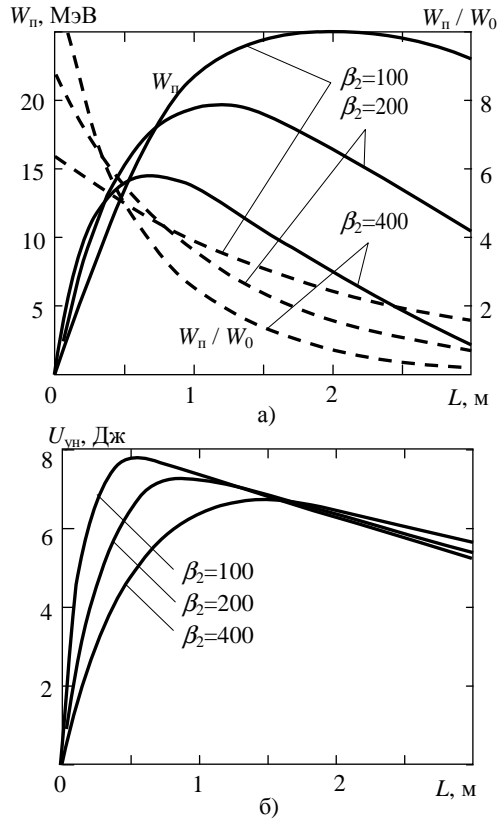
$$L = \frac{\tau_2 v_{\text{гр}}}{2(\alpha \tau_2 v_{\text{гр}} - 1)} \cdot \ln(\alpha \tau_2 v_{\text{гр}}) . \quad (2.11)$$

Эффективность передачи энергии в системе  $\eta$ , для случая максимальной накопленной энергии можно определить, подставляя выражение (2.11) в (2.9):

$$\eta_3 = \frac{2\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1)^2} \cdot \frac{1}{\alpha v_{гр} t_0} \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau_1}}\right)^2 \cdot (\alpha v_{гр} \tau_2)^{\frac{1}{1-\alpha v_{гр} \tau_2}}. \quad (2.12)$$

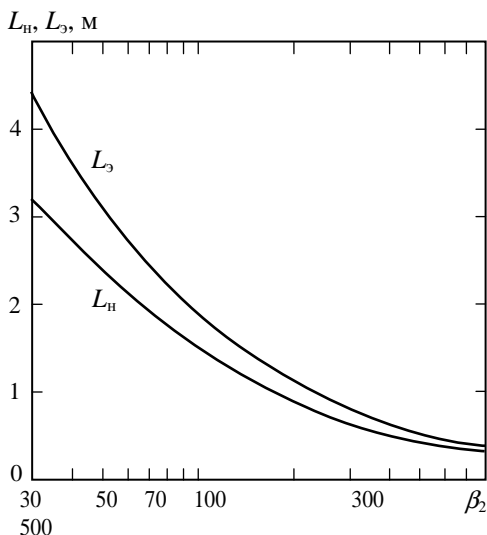
Можно заметить, что зависимость величин энергии пучка  $W_n$  и накопленной энергии  $U_{yn}$  от длины секции  $L$  в области максимальных значений достаточно слабая. Так, изменение длины секции в пределах 20% от оптимального значения приводит к уменьшению величин  $W_n$  и  $U_{yn}$  на (1-5)% для типичных значений параметров элементов системы компрессии.

На рис.2.1,а и 2.1,б приведены графики зависимостей абсолютной  $W_n$  и нормированной  $W_n/W_0$  энергий ускоренного пучка и накопленной в секции энергии  $U_{yn}$  от ее длины  $L$  (без учета нагрузки током) для следующих значений параметров:  $R_{ш} = 40$  МОм/м;  $v_{гр}/c = 10^{-2}$ ;  $P_0 = 5$  МВт;  $t_0 = 2.5$  мкс;  $\beta_1 = 5,6$  (оптимизированное значение по соотношению (2.4));  $Q_0 = 100 \cdot 10^3$ ;  $\beta_2 = 100-400$ . Графики зависимостей



**Рис.2.1.** Зависимости абсолютной  $W_n$  и нормированной  $W_n/W_0$  энергии ускоренного пучка (а) и накопленной в ускоряющей секции энергии  $U_{yn}$  (б) от длины секции  $L$  без учета нагрузки током

оптимальной длины ускоряющей секции при максимальной энергии ускоренного пучка  $L_3$  и при максимальной накопленной энергии  $L_n$  от величины  $\beta_2$  для оптимизированного значения коэффициента  $\beta_1$  и тех же значениях параметров системы и ускорителя приведены на рис.2.2.



**Рис.2.2.** Зависимости оптимальной длины ускоряющей секции при максимальной энергии пучка  $L_3$  и при максимальной накопленной энергии  $L_n$  от величины коэффициента связи в период использования накопленной энергии  $\beta_2$

В системах компрессии с комбинированными методами изменения режима работы (см. подраздел 1.2.3) амплитуда волны, поступающей на вход ускоряющей секции в период использования накопленной энергии, определяется суперпозицией двух волн: волны, излучаемой из резонаторов, и волны, отраженной от элемента связи резонатора. С учетом (2.1) и выражения для волны отраженной от резонаторов:

$$E_{\text{отр}}(t) = \alpha_2 E_0 e^{-(t-t_0)/\tau_2} - (\alpha_2 - 1) \cdot E_0, \quad (2.13)$$

где  $\alpha_2 = 2\beta_2 / (1 + \beta_2)$ , имеем следующее выражение для амплитуды волны, поступающей на вход ускоряющей секции:

$$E_y(t) = \left[ \frac{2\sqrt{\beta_1\beta_2}}{1+\beta_1} \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau_1}} \right) + \frac{2\beta_2}{1+\beta_2} \right] \cdot E_0 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}} - \frac{\beta_2-1}{\beta_1-1} \cdot E_0, \quad (2.14)$$

Коэффициент  $\eta_3$  достигает максимальной величины в случае, когда к моменту окончания импульса генератора энергия, накопленная в резонаторах, расходуется полностью, то есть к моменту окончания импульса генератора  $t = t_{\text{н}}$  имеем  $E_y(t_{\text{н}}) = 0$ . При этом:

$$t_{\text{н}} = 1,25644 \cdot \frac{Q_0}{\pi f_0(1+\beta_1)} + \frac{Q_0}{\pi f_0(1+\beta_2)} \ln \left( \frac{F_1}{F_2} \right), \quad (2.15)$$

где  $F_1 = \frac{2\sqrt{\beta_1\beta_2}(1-e^{-t_0/\tau_1})}{1+\beta_1} + \frac{2\beta_2}{1+\beta_2}$ ;  $F_2 = \frac{\beta_2-1}{\beta_1-1}$ .

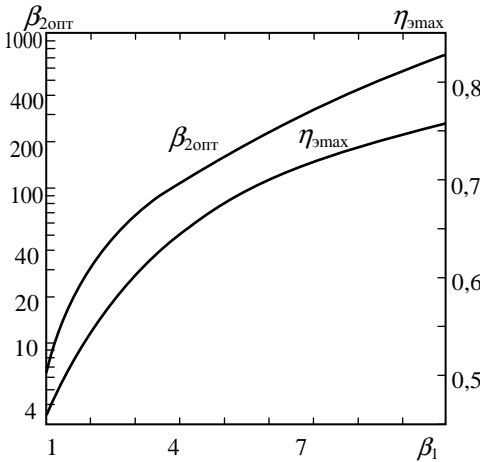
Проведя интегрирование (2.14) для импульса, длительность которого определяется (2.15), с учетом соотношения  $P = k \cdot E^2$ , можно определить максимальную величину коэффициента  $\eta_3$  для системы компрессии рассматриваемого типа:

$$\eta_3 = \frac{(1+\beta_1) \left[ \frac{F_1^2 - F_2^2}{2} - 2F_2(F_1 - F_2) + F_2 \ln \left( \frac{F_1}{F_2} \right) \right]}{1,25644 \cdot (1+\beta_2) + (1+\beta_1) \cdot \ln \left( \frac{F_1}{F_2} \right)}. \quad (2.16)$$

Используя выражение для амплитуды волны на входе ускоряющей секции (2.14), можно определить максимальное значение энергии ускоренного пучка в нормированном виде:

$$\frac{W_{\text{п}}}{W_0} = \left( \frac{2\sqrt{\beta_1\beta_2}(1-e^{-\frac{t_0}{\tau_1}})}{1+\beta_1} + \frac{2\beta_2}{1+\beta_1} \right) \cdot \frac{e^{-\frac{\alpha L}{\alpha v_{\text{гр}} \tau_2}} - e^{-\alpha L}}{(1-e^{-\alpha L}) \left( 1 - \frac{1}{\alpha v_{\text{гр}} \tau_2} \right)} - \frac{\beta_2-1}{\beta_2+1}. \quad (2.17)$$

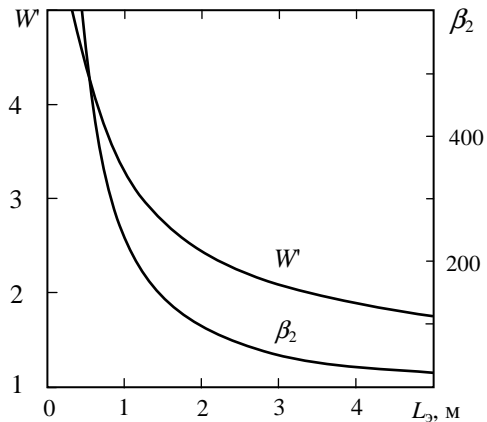
График зависимости максимальной величины коэффициента передачи энергии  $\eta_{3 \text{ max}}$  от коэффициента связи  $\beta_1$  для оптимально-



**Рис.2.3.** Зависимости максимальной величины коэффициента передачи энергии  $\eta_{эmax}$  и оптимальной величины коэффициента связи в период использования накопленной энергии  $\beta_{2opt}$  от величины коэффициента связи  $\beta_1$

го значения  $\beta_2$  приведен на рис.2.3. Здесь же приведен график зависимости оптимальной величины  $\beta_{2opt}$  от  $\beta_1$ .

На рис.2.4 приведены графики зависимости нормированной энергии пучка  $W'$  и величины  $\beta_2$  от длины ускоряющей секции  $L_э$ , при которой энергия пучка максимальна. Графики приведены для тех же значений параметров системы и ускорителя. При изменении добротности резонаторов в пределах от  $(60-150) \cdot 10^3$  коэффициент  $K_p$  изменяется не более чем на 10%, а энергия пучка на 5%.



**Рис.2.4.** Зависимость максимальной величины нормированной энергии пучка  $W'$  и величины коэффициента связи  $\beta_2$  от длины ускоряющей секции  $L_э$

Важно отметить, что приведенные здесь расчеты энергии пучка выполнены для одного момента времени – для одного сгустка (без учета нагрузки током). Реально это могут быть импульсы тока длительностью не более  $0,1 \cdot \tau_2$ .

Учет влияния длительности переходного процесса при изменении режима работы системы показывает, что оно оказывается заметным, если превышает 10 % длительности выходного СВЧ импульса. Так, при длительности переходного процесса 15-20% коэффициент  $K_p$  снижается на 5-10 %.

### ***2.1.2. Характеристики ЛУЭ при использовании систем с постоянными параметрами резонаторов***

Поскольку системы компрессии с постоянными параметрами накопительных резонаторов представляют наибольший практический интерес как источники СВЧ мощности для питания ЛУЭ среди систем данной группы, то рассмотрим работу такой системы и характеристики ускоренного пучка ЛУЭ более подробно.

Для исследования работы системы компрессии воспользуемся решением уравнения баланса мощности в резонаторе, определяющим амплитуду волны, излучаемой из резонатора:

$$E_{и}(t) = -\frac{2\beta}{1+\beta}(1-e^{-t/\tau}) \cdot E_0 . \quad (2.18)$$

Волна, поступающая на вход ускоряющей секции,  $E_y$  образуется суперпозицией волны, излучаемой из резонатора  $E_{и}$ , и волны генератора  $E_0$ , отраженной от элемента связи резонатора с трактом. Амплитуда этой волны  $E_y(t)$  в период накопления энергии описывается выражением:

$$E_y(t) = -E_0 + \frac{2\beta}{1+\beta}(1-e^{-t/\tau}) \cdot E_0 . \quad (2.19)$$

В момент времени  $t = t_0$  заканчивается период накопления энергии и система переходит в режим использования энергии. Этот период начинается с переходного процесса, в течение которого фаза

Волны генератора изменяется на  $180^\circ$  (рис. 2.5). Положим что начиная с этого момента, амплитуда падающей волны  $E_0$  изменяется по следующему закону:

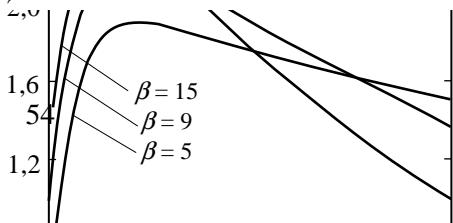
$$E_0(t) = -E_0 + 2(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_n}})$$

где  $\tau_n$  – постоянная времени переходного процесса волны генератора. С длительностью  $t_0$  (по уровню 0,9)  $t_n$  связана соотношением  $t_n = t_0 \ln \frac{1}{1-\beta}$ . В этот период (интервал времени от пика СВЧ генератора) амплитуда волны уменьшается:

$$E'_y(t) = \frac{E_y(t)}{E_0} = \frac{2\beta}{1+\beta} \left[ \frac{2\tau_n}{\tau_n - \tau} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} - 1 - \left( \frac{2\tau}{\tau_n - \tau} + e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} - 2e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + 1 \right] \quad (2.21)$$

На рис.2.6 приведены графики изменения нормированной амплитуды волны на входе ускоряющей секции  $E'_y (=E_y/E_0)$  (эта величина характеризует коэффициент увеличения мощности  $K_P = (E_y/E_0)^2$ ) от времени в период использования накопленной энергии при различных значениях коэффициента связи  $\beta$  для следующих параметров элементов системы и СВЧ генератора:  $Q_0 = 100 \cdot 10^3$ ;  $t_0 = 2,5$  мкс;  $t_n = 2,0$  мкс;  $\tau_n = 100$  нс. Графики изменения амплитуды волны  $E'_y$  в этом же интервале времени для различных длительностей переходного процесса  $t_n$  при тех же значениях параметров и  $\beta = 10$  приведены на рис.2.7. При других величинах параметров, графики имеют аналогичный вид.

**Рис.2.7.** Графики изменения амплитуды волны  $E'_y$  от времени  $t$  в течение выходного импульса



**Рис.2.5.** Временные диаграммы работы системы компрессии с накоплением энергии в резонаторах с постоянными параметрами:  $E_0$  – амплитуда волны, падающей на резонаторы;  $E'_y$  – амплитуда волны на выходе системы компрессии и входе ускоряющей секции

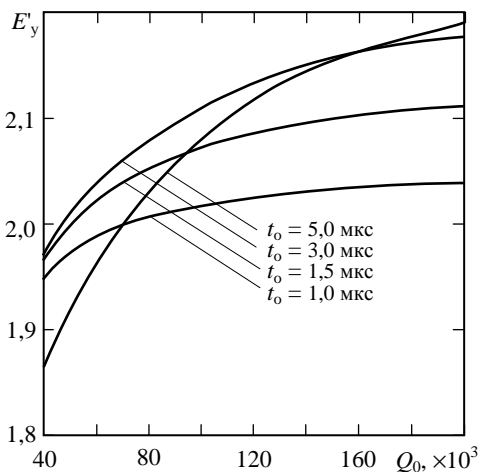
На рис.2.8 приведены графики зависимости максимальной амплитуды волны  $E'_y$  от собственной добротности резонаторов  $Q_0$  для различных длительностей периода накопления  $t_0$ . Графики построены для величины  $\beta$ , при которой накопленная в резонаторах энергия максимальна.

Из приведенных графиков также следует, что увеличение собственной добротности накопительных резонаторов свыше  $(80-100) \cdot 10^3$  при данных параметрах СВЧ генератора не приводит к существенному возрастанию амплитуды волны на входе ускоряющей секции. Повышение добротности целесообразно при длительности выходного импульса СВЧ генератора более 4-5 мкс.

Энергию пучка на выходе ЛУЭ можно определить как интеграл от амплитуды волны внутри ускоряющей секции по ее длине. Распределение величины амплитуды волны по длине секции соответствует изменению во времени амплитуды волны на входе секции. При известной зависимости  $E'(t)$  (2.21), энергия пучка определяется выражением:

$$W(t) = \frac{1}{G} W_0 \frac{L}{T} \int_0^T E'_y(t - t^*) e^{-\frac{\alpha L}{T} t^*} \cdot dt^*, \quad (2.22)$$

где  $W(t)$  – энергия ускоренного пучка на выходе ускорителя;  
 $T$  – время заполнения ускоряющей секции СВЧ полем;  
 $G = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$  – коэффициент, связанный с затуханием в секции;



**Рис.2.8.** Зависимости максимальной амплитуды волны  $E'_y$  от собственной добротности накопительных резонаторов  $Q_0$

$W_0 = E_0 \cdot G$  – энергия ускоренных частиц без системы компрессии.

Следует отметить, что в данном случае (как, впрочем, и в предыдущих) выражение (2.22) определяет максимальную величину энергии, которую могут приобрести частицы пучка в ускоряющей секции, то есть эквивалентное ускоряющее напряжение (ЭУН). Однако для релятивистских частиц с большой степенью точности сохраняется пропорциональность между изменениями ЭУН и энергией частиц, так как скольжение по фазе отсутствует. Нерелятивистские частицы при большой амплитуде ускоряющей волны практически сразу оказываются в асимптотической фазе, и пропорциональность между их энергией и ЭУН также сохраняется. Это условие соблюдается тем точнее, чем выше амплитуда ускоряющей волны.

Подставив (2.21) в (2.22) и проведя интегрирование, получим выражение для энергии ускоренного пучка:

$$W(t) = \frac{W_0 L}{G T} \times \begin{cases} \left[ \frac{2}{D_1} \left( 1 - \frac{B \tau_{\Pi}}{\tau_{\Pi} - \tau} \right) \left( 1 - e^{D_1(\tau - t_0)} \right) \cdot e^{\frac{t - t_0}{\tau_{\Pi}}} + \frac{B}{D} \left[ \left( \frac{2\tau}{\tau_{\Pi} - \tau} + e^{\frac{t_0}{\tau}} \right) \left( 1 - e^{D(t - t_0)} \right) \right] \right] \times \\ \times e^{\frac{t - t_0}{\tau}} - \left( e^{DT} - e^{D(t - t_0)} \right) \cdot e^{\frac{t}{\tau}} \left. + (1 - B) \frac{T}{\alpha L} \left( 1 + e^{-\alpha L} - 2e^{\frac{\alpha L}{T}(t - t_0)} \right) \right] & \text{при } t_0 \leq t < t_0 + T; \\ \frac{2}{D_1} \left( \frac{B \tau_{\Pi}}{\tau_{\Pi} - \tau} - 1 \right) \left( 1 - e^{D_1 T} \right) e^{-\frac{t + T - t_0}{\tau_{\Pi}}} - \frac{B}{D} \left( \frac{2\tau}{\tau_{\Pi} - \tau} + e^{\frac{t_0}{\tau}} \right) \left( 1 - e^{DT} \right) \times \\ \times e^{-\frac{t + T - t_0}{\tau}} - \frac{T}{\alpha L} (B - 1) \left( 1 - e^{-\alpha L} \right) & \text{при } t \geq t_0 + T, \end{cases} \quad (2.23)$$

где использованы следующие обозначения:

$$B = \frac{2\beta}{1 + \beta}; \quad D = \frac{1}{\tau} - \frac{\alpha L}{T}; \quad D_1 = \frac{1}{\tau_{\Pi}} - \frac{\alpha L}{T}; \quad \tau = \frac{Q_0}{\pi f_0 (1 + \beta)},$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания в секции.

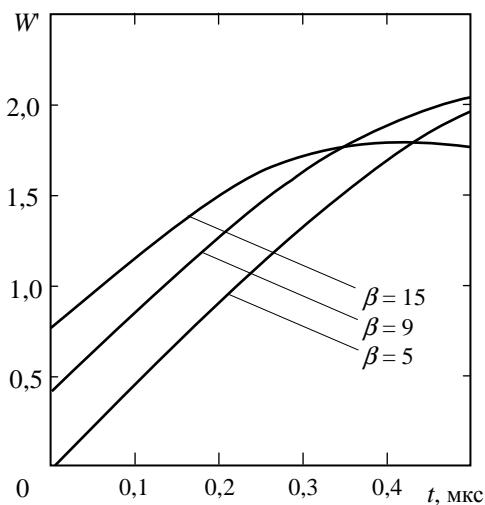
Для проведения численных расчетов были выбраны следующие наиболее типичные параметры ускоряющей секции с постоянной групповой скоростью волны (которые используются в ЛУЭ во всем диапазоне энергий ускоренных пучков) и СВЧ генератора:

- длина ускоряющей секции  $L = 4,4$  м;
- время заполнения ускоряющей секции  $T = 0,4$  мкс;
- коэффициент затухания в секции  $\alpha = 0,08$  м<sup>-1</sup>;
- длительность импульса генератора  $t_{\text{и}} = 2,5$  мкс.

Длительность периода использования накопленной энергии для достижения максимальной энергии ускоренного пучка равна 0,4 мкс, то есть времени заполнения ускоряющей секции. При меньших длительностях этого периода часть секции все время остается "пустой", а при больших – снижается коэффициент увеличения мощности, так как сокращается период накопления энергии.

Графики изменения нормированной энергии ускоренного пучка на выходе ускорителя  $W'_y$  в период использования накопленной энергии для различных значений коэффициента связи резонаторов с трактом  $\beta$  приведены на рис.2.9.

Для практического использования ускоренных пучков важным параметром является ширина энергетического спектра частиц пучка [19,20], которая определяется различными факторами (нестабильностью параметров системы питания, условиями группировки частиц и др.). Поскольку в данном случае сравнива-



**Рис.2.9.** Графики изменения нормированной энергии пучка на выходе ускоряющей секции  $W'$  от времени в период использования накопленной энергии ( $Q_0 = 100 \cdot 10^3$ ;  $t_0 = 2,0$  мкс)

ются ускорители с системами компрессии энергии и без нее, то представляется целесообразным оценивать не полный энергетический спектр пучка, а только его расширение, вызванное особенностями работы систем компрессии (то есть изменениями амплитуды ускоряющей волны в течение импульса тока).

Здесь величину расширения энергетического спектра  $S$  (далее для краткости, если это не будет приводить к недоразумениям, будем называть ее шириной спектра) можно определить выражением:

$$S = 2(W_{\max} - W_{\min}) / (W_{\max} + W_{\min}), \quad (2.24)$$

где  $W_{\max}$ ,  $W_{\min}$  – максимальное и минимальное значения энергии пучка в течение импульса тока соответственно.

Конечно, выражение (2.24) не дает точного определения увеличения ширины энергетического спектра пучка в соответствии с его строгим определением [19], которое является интегральной характеристикой. Рассматриваемое здесь определение величины  $S$  является линейной аппроксимацией ширины спектра (то есть считаем, что амплитуда ускоряющей волны изменяется в течение импульса тока линейно от  $W_{\min}$  до  $W_{\max}$ ). При этом величина  $S$  оказывается несколько выше реального значения ширины энергетического спектра пучка, что вполне приемлемо для проводимых оценок.

Из графиков (см.рис.2.8) следует, что минимальная ширина спектра  $S$  достигается при инжектировании частиц в секцию в конце СВЧ импульса. Кроме того, проведенные численные расчеты показали, что для каждого значения длительности импульса тока существует оптимальное значение коэффициента связи, при котором достигается минимальное значение  $S$ . Зависимость средней энергии ускоренного пучка  $W'_{cp} = W_{cp}/W_0$  (где  $W_{cp} = (W_{\max} + W_{\min})/2$ ), энергетического спектра  $S$  и оптимального коэффициента связи  $\beta$  от длительности импульса тока пучка  $t_n$  приведены в табл.2.1. Приведенные данные показывают, что энергетические характеристики пучка в рассматриваемом диапазоне изменения параметров системы практически не зависят от собственной добротности накопительных резонаторов.

**Таблица 2.1**

Зависимость средней энергии пучка и его энергетического спектра от длительности импульса тока

$t_{п}$ , мкс	$Q_0 = 30.000$			$Q_0 = 60.000$			$Q_0 = 100.000$		
	$\beta$	$W'_{cp}$	$S, \%$	$\beta$	$W'_{cp}$	$S, \%$	$\beta$	$W'_{cp}$	$S, \%$
0,05	6,6	1,5	0,2	12,8	1,7	0,2	21,1	1,7	0,2
0,10	7,2	1,5	1,1	14,1	1,6	1,0	13,2	1,7	1,0
0,15	8,0	1,4	2,8	15,7	1,5	2,6	25,9	1,6	2,6
0,20	9,1	1,4	5,7	17,7	1,5	5,5	29,2	1,5	5,4

Для секции с постоянной напряженностью электрического поля [21] (иногда их называют “система с однородным полем” [22]; в зарубежной литературе они называются “структуры с постоянным градиентом (constant-gradient)”) имеем следующую зависимость мощности, проходящей через поперечное сечение секции с координатой  $z$ , от этой координаты  $z$ :

$$P_z = \left( 1 - \frac{E_0^2}{R_{ш} P_0} \cdot z \right) \cdot P_0, \quad (2.25)$$

где  $R_{ш}$  – шунтовое сопротивление секции.

Проведя соответствующие преобразования, получим интеграл, определяющий энергию пучка на выходе ускорителя:

$$W(t) = \int_0^T E_y v_{гp0} \cdot e^{-g v_{гp} t} dt, \quad (2.26)$$

где  $g = E_0 / (R_{ш} P_0)$ ;  $v_{гp0}$  – групповая скорость волны в начале ускоряющей секции.

Используя известную зависимость амплитуды волны на входе секции от времени (2.21) и проведя интегрирование, получим выражение для энергии ускоренного пучка:

$$W(t) = W_0 v_{гp0} \left[ \frac{2B}{\tau_{п} - \tau} \left( A_{п} (e^{D_{п}t} - 1) e^{-\frac{t}{\tau_{п}}} - A (e^{Dt} - 1) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - \right. \\ \left. - \frac{BA}{\tau} (e^{Dt} - 1) e^{-\frac{t+t_0}{\tau}} - \frac{2A_{п}}{\tau_{п}} (e^{D_{п}t} - 1) e^{-\frac{t}{\tau_{п}}} - \frac{B-1}{g v_{гp0}} (1 - e^{-g v_{гp0}t}) \right], \quad (2.27)$$

где использованы следующие обозначения:

$W_0$  – энергия ускоренного пучка без системы компрессии энергии;

$$A = \frac{\tau^2}{1 - g v_{гp0} \tau}; \quad A_{п} = \frac{\tau_{п}^2}{1 - g v_{гp0} \tau}; \quad D = \frac{1}{\tau} - g v_{гp0}; \quad D_{п} = \frac{1}{\tau_{п}} - g v_{гp0}; \quad B = \frac{2\beta}{1 + \beta};$$

$\tau$  – постоянная времени накопительных резонаторов;

$\tau_{п}$  – постоянная времени переходного процесса.

Оценочные расчеты энергии пучка при использовании ускоряющей секции с постоянной амплитудой поля были выполнены для следующих значений параметров: напряженность поля в секции  $E_0 = 14$  МВ/м (при мощности СВЧ волны на входе секции  $P_0 = 16$  МВт); время заполнения секции  $T = 0,95$  мкс; полное затухание в секции  $\alpha_{п} = 6,5$  дБ; шунтовое сопротивление  $R_{ш} = 65$  МОм; длина секции  $L = 4,2$  м. Для этих параметров имеем:  $g = 0,188$  м<sup>-1</sup>;  $v_{гp0} = 8,36 \cdot 10^6$  м/с.

При этих параметрах максимальное увеличение энергии пучка достигается при  $\beta = 13$  и  $t_0 = 2,05$  мкс (длительность импульса генератора  $t_{н} = 2,5$  мкс), а энергия пучка возрастает на 37,5% по сравнению с ускорителем, в котором отсутствует система компрессии. Оптимальная длительность переходного процесса при изменении фазы волны составляет 60-100 нс.

Практический интерес представляют исследования работы ЛУЭ с системой компрессии, когда нагрузка током оказывается существенной. Для проведения таких исследований воспользуемся принципом независимости полей, то есть поле, излучаемое пучком в замедляющей структуре (ускоряющей секции), не зависит от поля волны генератора. Это вполне справедливо для релятивистского

случая, когда скорость частиц практически не зависит от их энергии. Процесс ускорения частиц в этом случае можно рассматривать как результат ускорения в поле внешней волны и торможения в поле волны излучения пучка [23].

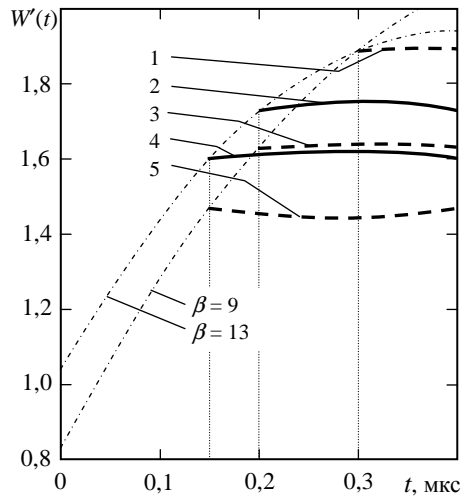
Энергия, теряемая пучком в секции, определяется выражением:

$$W_T(t) = IR_{\text{ш}}L \left[ \frac{t}{T} + \left(1 - \frac{1}{\alpha L} - \frac{t}{T}\right) \left(1 - e^{-\alpha L \frac{t}{T}}\right) \right]. \quad (2.28)$$

Здесь  $I$  – ток пучка;  $t$  – текущее время от начала импульса тока.

Результирующая энергия ускоренного пучка на выходе ускорителя  $W(t)$  равна разности энергий, приобретаемой частицами в ускоряющей секции (выражение (2.23)) и теряемой на излучение  $W_T(t)$  (выражение (2.28)).

Расчеты изменений энергии пучка в течение импульса тока для секции с постоянной групповой скоростью проводились при тех же значениях основных параметров системы и секции, а графики соответствующих зависимостей приведены на рис.2.10. Здесь при заданных величинах длительности импульса тока пучка  $t_n$  и максимальной средней энергии  $W_{\text{ср}}$  минимальная ширина спектра  $S$  достигается при определенном токе пучка  $I$ . Зависимость величины средней энергии пучка  $W'_{\text{ср}}$ , минимальной ширины энергетического спектра  $S_{\text{мин}}$  и опти-



**Рис.2.10.** Графики изменения нормированной энергии пучка на выходе ускоряющей секции  $W'(t)$  в период использования накопленной энергии при нагрузке током ( $Q_0=100 \cdot 10^3$ ;  $t_0=2$  мкс):  
 1 –  $I = 0,47$  А; 2 –  $I = 0,38$  А; 3 –  $I = 0,71$  А;  
 4 –  $I = 0,53$  А; 5 –  $I = 0,88$  А;

**Таблица 2.2.**

Зависимость величин  $W'_{cp}$ ,  $S_{min}$  и  $\beta_{opt}$  от величины тока пучка  $I$  и длительности импульса тока пучка  $t_{п}$

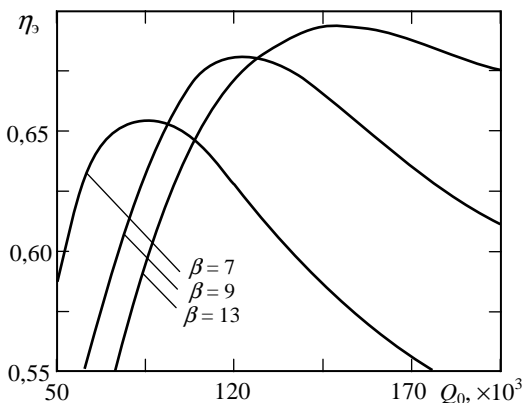
Длительность импульса тока $t_{п}$ , мкс	Параметр	Ток пучка $I$ , А				
		0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
0,05	$\beta_{opt}$	11,50	10,28	8,07	6,11	4,31
	$W'_{cp}$	1,69	1,72	1,67	1,73	1,63
	$S_{min}$ , %	0,19	0,16	0,10	0,05	0,02
0,10	$\beta_{opt}$	12,77	11,55	9,32	7,33	5,52
	$W'_{cp}$	1,62	1,64	1,66	1,64	1,57
	$S_{min}$ , %	0,88	0,75	0,51	0,26	0,10
0,15	$\beta_{opt}$	14,33	13,08	10,80	8,77	6,92
	$W'_{cp}$	1,55	1,56	1,57	1,54	1,49
	$S_{min}$ , %	2,31	2,03	1,45	0,87	0,30
0,20	$\beta_{opt}$	16,34	15,05	12,67	10,54	8,61
	$W'_{cp}$	1,46	1,47	1,46	1,44	1,39
	$S_{min}$ , %	4,96	4,46	3,45	2,40	1,30

мального коэффициента связи  $\beta_{opt}$  от величины тока пучка  $I$  и длительности импульса тока  $t_{п}$  приведены в табл.2.2.

Коэффициент передачи энергии системы  $\eta_3$  можно определить, вычислив интеграл от мощности волны на входе секции по времени в интервале от  $(t_0 - T)$  до  $t_{п}$ , так как именно в этом интервале времени запасенная в резонаторах энергия расходуется на ускорение частиц пучка:

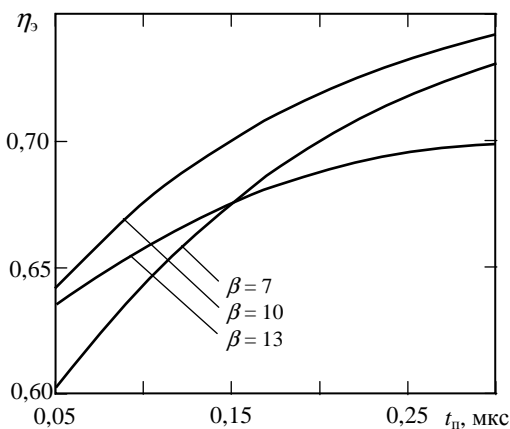
$$\eta_3 = \frac{1}{t_{п}} \left[ \int_{t_0 - t_{п}}^{t_0} E_y^2(t) \cdot dt + \int_{t_0}^{t_{п}} E_{yt_0}^2(t) \cdot dt \right]. \quad (2.29)$$

Графики зависимости коэффициента  $\eta_3$  от собственной добротности накопительных резонаторов  $Q_0$  и от длительности импульса тока пучка  $t_{п}$  при различных величинах коэффициента связи  $\beta$  представлены, соответственно, на рис.2.11 и 2.12. Из приведенных графиков следует, что величина  $\eta_3$  для типичных значений параметров элементов системы компрессии и ускорителя (параметры



**Рис.2.11.** Зависимость коэффициента передачи энергии  $\eta_3$  от добротности накопительных резонаторов  $Q_0$

такие же, как и в предыдущих расчетах) и режимов работы системы составляет 0,6-0,7.



**Рис.2.12.** Зависимость коэффициента передачи энергии  $\eta_3$  от длительности импульса тока пучка  $t_{п}$

### **2.1.3. Характеристики ЛУЭ при использовании систем, формирующих выходной импульс с плоской вершиной**

Применение для питания ЛУЭ систем с накопительными резонаторами, формирующими выходной импульс с плоской вершиной,

позволяет существенно уменьшить ширину энергетического спектра пучка. При этом в период использования накопленной энергии амплитуда волны на входе ускоряющей секции постоянна.

Для исследования характеристик ЛУЭ рассмотрим систему с постоянными параметрами резонаторов, в которой плоская вершина импульса формируется за счет амплитудной модуляции волны генератора. Для определения необходимого закона модуляции волны (то есть закона, по которому требуется изменять амплитуду волны генератора, чтобы амплитуда отраженной от резонаторов волны оставалась постоянной в течение какого-то времени) рассмотрим процесс формирования отраженной от резонатора волны при изменении амплитуды волны, падающей на резонатор.

Пусть на резонатор с собственной добротностью  $Q_0$  падает СВЧ волна с мощностью  $P_{\text{п}}(t)$ . Тогда уравнение баланса мощности в резонаторе можно записать в виде:

$$P_{\text{п}}(t) = P_{\text{в}}(t) + P_{\text{р}}(t) + \frac{dU_{\text{н}}}{dt}, \quad (2.30)$$

где  $P_{\text{в}}(t)$  – мощность волны, излучаемой из резонатора;  $P_{\text{р}}(t)$  – мощность, рассеиваемая в резонаторе;  $U_{\text{н}}$  – энергия, накапливаемая в резонаторе.

Перейдя от мощностей к амплитудам волн, получим дифференциальное уравнение, относительно амплитуды излучаемой из резонатора волны  $E_{\text{и}}$ :

$$\tau \frac{dE_{\text{и}}}{dt} + E_{\text{и}} = -\alpha_0 E_{\text{п}}(t). \quad (2.31)$$

Общим решением уравнения (2.31) является функция вида:

$$E_{\text{и}}(t) = -\frac{\alpha_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \int_t^{\dots} E_{\text{п}}(t) e^{\frac{t}{\tau}} \cdot dt. \quad (2.32)$$

Решим это уравнение для периода использования накопленной энергии (от  $t_0$  – момента окончания периода накопления энергии до  $t_{\text{и}}$  – момента окончания импульса генератора). В этот период волна на выходе системы  $E_{\text{в}}$  образуется сложением волны  $E_{\text{и}}$ , излучаемой из резонатора, и волны генератора  $E_{\text{п}}$ . Для того, чтобы амплитуда

$E_B$  не изменялась, необходимо иметь  $E_{и} + E_{п} = \text{const}$ . Тогда уравнение (2.31) можно преобразовать к виду:

$$\tau \frac{d(E_B - E_{п})}{dt} + (E_B - E_{п})(\alpha_0 - 1) = -\alpha_0 E_B . \quad (2.33)$$

Решением этого уравнение является функция вида:

$$E_B - E_{п}(t) = \left( \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} E_y e^{-\frac{\alpha_0 - 1}{\tau}(t - t_0)} + C \right) e^{\frac{\alpha_0 - 1}{\tau}(t - t_0)} , \quad (2.34)$$

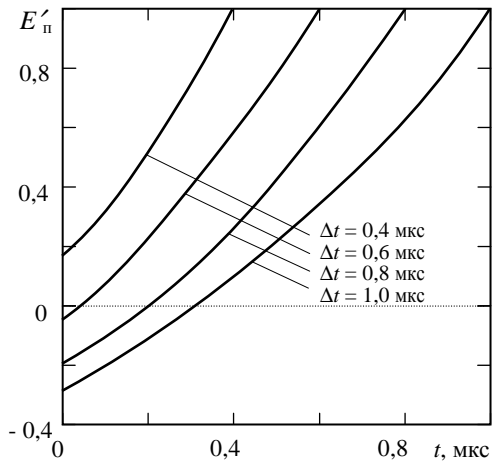
где постоянная  $C$  связана с величиной энергии, накопленной в резонаторе, и определяется начальными условиями.

Окончательное решение этого уравнения имеет вид:

$$E_{п}(t) = -\frac{1}{\alpha_0 - 1} E_B - \left[ \frac{2\beta}{1 + \beta} E_0 \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right) - \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} E_B \right] e^{\frac{\alpha_0 - 1}{\tau}(t - t_0)} . \quad (2.35)$$

Если амплитуда волны  $E_{п}$  на выходе системы в течение интервала времени  $\Delta t$  изменяется по этому закону то, величина  $E_B$  будет оставаться постоянной.

Графики зависимости нормированной амплитуды падающей на резонатор волны  $E'_{п} = E_{п}/E_0$  (где  $E_0$  – максимальная амплитуда волны генератора) от времени в интервале  $(t_0 - t_{п})$  для разных значений  $\Delta t$  при использовании накопительных резонаторов с собственной добротностью  $Q_0 = 100 \cdot 10^3$ ,  $\beta = 10$  приведены на рис.2.13.



**Рис.2.13.** Зависимость амплитуды волны, падающей на резонаторы,  $E'_{п}$  от времени в период использования накопленной энергии

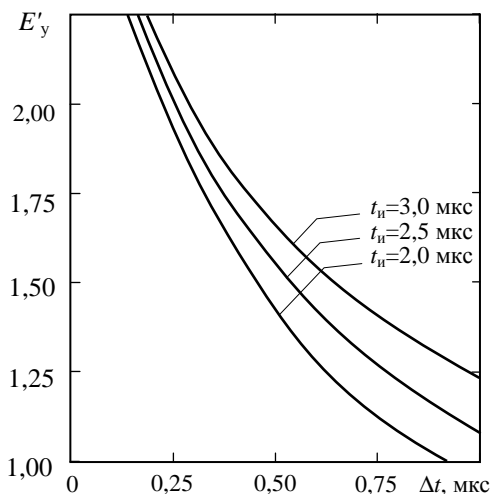
Определим зависимость максимальной нормированной амплитуды волны на выходе системы  $E'_y$  от длительности интервала  $\Delta t = t_0 - t_n$ . Для этого проведем соответствующие подстановки в (2.35) и решим уравнение относительно искомой величины  $E'_y$ :

$$E'_y = \frac{E_y}{E_0} = \frac{(\alpha_0 - 1) \left[ \alpha_0 \left( 1 - e^{-\frac{t_n - \Delta t}{\tau}} \right) e^{\frac{\alpha_0 - 1}{\tau} \Delta t} + 1 \right]}{\alpha_0 e^{\frac{\alpha_0 - 1}{\tau} \Delta t} - 1}. \quad (2.36)$$

Графики зависимости амплитуды волны  $E'_y$  от длительности выходного импульса  $\Delta t$  для некоторых значений длительности импульса генератора  $t_n$  приведены на рис.2.14. Из графиков следует, что длительность импульса  $\Delta t$  обратно пропорциональна амплитуде волны  $E'_y$  из-за конечной величины накапливаемой энергии.

Анализ выражения (2.36) показывает, что максимальная амплитуда волны  $E'_y$  (и максимальный коэффициент  $K_P = E'_y{}^2$ ) для заданной длительности импульса  $\Delta t$  достигается при определенной величине коэффициента связи резонатора  $\beta$ . Для примера в табл.2.3 приведены значения максимальной амплитуды волны  $E'_y$ , коэффициента  $K_P$  и оптимальной величины коэффициента связи  $\beta_{\text{opt}}$  в зависимости от длительности импульса  $\Delta t$  для типичных величин параметров ЛУЭ и генератора (см. подраздел 2.1.2).

**Таблица 2.3**



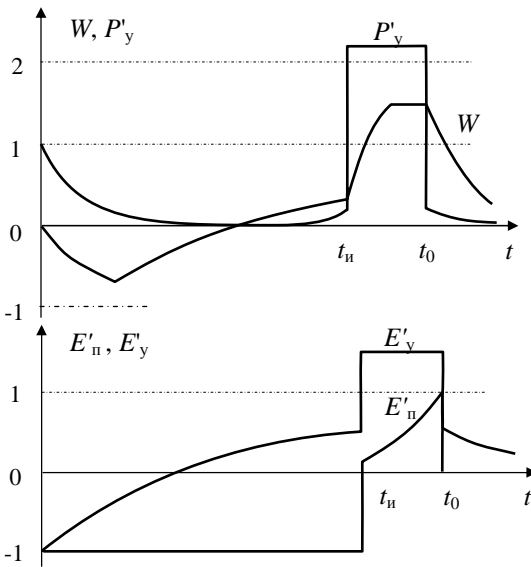
**Рис.2.14.** Зависимость максимальной амплитуды волны  $E'_y$  от длительности выходного импульса  $\Delta t = t_n - t_0$

Зависимость максимальной величины  $E'_y$ , коэффициентов  $K_p$  и  $\beta_{\text{опт}}$  от длительности импульса  $\Delta t$

$\Delta t$ , нс	20	50	100	400	800	1000
$E'_y$	2,75	2,58	2,38	1,73	1,29	1,12
$K_p$	7,59	6,68	5,68	3,02	1,65	1,25
$\beta$	22	17	14	9	7	6,3

Для определения энергии пучка на выходе ЛУЭ как и в предыдущих случаях необходимо проинтегрировать поле внутри ускоряющей секции по ее длине. Эпюры изменения энергии пучка  $W$  на выходе ЛУЭ, изменений амплитуд волн  $E_n$  и  $E'_y$ , а также мощности волны на входе ускоряющей секции  $P'_y$  приведены на рис.2.15.

В данном случае, поскольку применение такой системы компрессии позволяет обеспечить постоянную мощность волны на входе ускоряющей секции, то определить энергию пучка можно, используя известные формулы (см. например [23]). Интервалы времени, когда мощность волны на входе секции изменяется, в данном случае можно считать нерабочими (фактически это режи-



**Рис.2.15.** Эпюры нормированных величин:

$E'_n$  – амплитуда волны, падающей на резонаторы;

$E'_y$  – амплитуда волны на входе ускоряющей секции;

$P'_y$  – мощность волны на входе ускоряющей секции;

$W$  – энергия пучка на выходе ускорителя

мы системы без коррекции формы вершины выходного импульса), и поэтому энергия частиц в этих интервалах не представляет практического интереса.

#### ***2.1.4. Характеристики ЛУЭ при использовании систем, работающих на резонансную нагрузку***

Как уже отмечалось выше (раздел 1.2.4), системы компрессии, работающие на резонансную нагрузку, отличаются от других тем, что их работа происходит при взаимодействии накопительного резонатора с резонатором, являющимся нагрузкой для системы. При этом образуется система связанных резонаторов. Характеристики связанных резонансных систем достаточно подробно исследованы в радиотехнике, где такие системы (контура) широко используются как частотные полосовые фильтры. При этом, однако, применяемые методы (методы комплексных амплитуд) не позволяют с достаточной точностью проводить исследование переходных процессов, на которых основывается работа таких систем компрессии. Для анализа работы и определения характеристик системы компрессии и ускоренного пучка ЛУЭ необходимо решать соответствующие дифференциальные уравнения.

Рассмотрим систему, схема которой приведена на рис.1.7. Эта система состоит из двух резонаторов: накопительного – НР (со стоячими волнами) и рабочего – РБВ (резонатор с бегущими волнами). Сразу после отключения генератора и замыкания кольца РБВ на элементы связи НР поступает волна, которая отразилась от них в конце периода накопления энергии и сделала один оборот по кольцу РБВ. С учетом затухания в РБВ амплитуду волны, падающей на НР  $E_n(t)$  в интервале времени  $t_0 < t < t_0 + T$ , можно записать в виде:

$$E_{n(1)}(t) = \left( 1 - \frac{2\beta}{1+\beta} \left( 1 - e^{-\frac{(t_0 - T) + t}{\tau}} \right) \right) \cdot E_0 e^{-\alpha_n}, \quad (2.37)$$

где  $t_0$  – момент отключения генератора;  $T$  – длительность одного прохода фронта волны по кольцу РБВ;  $\alpha_n$  – затухание в РБВ.

Амплитуду отраженной от резонаторов волны в этом интервале времени можно определить, подставив (2.37) в (2.32). Проведя интегрирование, получим выражение для амплитуды волны, отраженной от резонаторов:

$$E_{y(1)} = -\frac{2\beta}{1+\beta} E_0 \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right) e^{-\alpha_n} e^{-\frac{(t_0-T)+t}{\tau}} \left(1 - \alpha_0 \frac{t-t_0-T}{\tau}\right). \quad (2.38)$$

Пройдя по кольцу РБВ, эта волна в течение интервала времени  $t_0+T < t < t_0+2T$  падает на элементы связи НР. Амплитуда этой волны равна:

$$E_{n(2)}(t) = E_{y(1)}(t) \cdot e^{-\alpha_n}. \quad (2.39)$$

Подставляя (2.39) в (2.32), как и в предыдущем случае, определяем волну, отраженную от резонаторов в следующем интервале времени.

Для произвольного интервала времени  $t_0+(n-1)T < t < t_0+nT$  (при этом волна прошла  $n$  оборотов по кольцу РБВ) имеем следующее выражение для амплитуды волны, отраженной от резонаторов:

$$E_{y(n)}(t) = -\frac{2\beta}{1+\beta} E_0 \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right) \cdot e^{-n\alpha_n} \cdot e^{-\frac{t-t_0-T}{\tau}} F(-n, 1, A), \quad (2.40)$$

где  $F(-n, 1, A) = \sum_{k=0}^n \frac{C_n^k}{k!} (-1)^k A^k$  – вырожденная гипергеометрическая функция Куммера;

$$A = \frac{2\beta}{1+\beta} \cdot \frac{t-t_0-nT}{\tau}.$$

Практически для вычисления функций Куммера удобно пользоваться рекуррентной формулой:

$$F(-(n+1), 1, x) = \frac{2n+1-x}{n+1} F(-n, 1, x) - \frac{n}{n+1} F(-(n-1), 1, x), \quad (2.41)$$

при этом  $F(0,1,A) = 1$ ,  $F(-1,1,A) = 1-A$ .

Таким образом, для амплитуды волны, отраженной от резонаторов в течение рабочего цикла ускорителя, имеем следующее выражение:

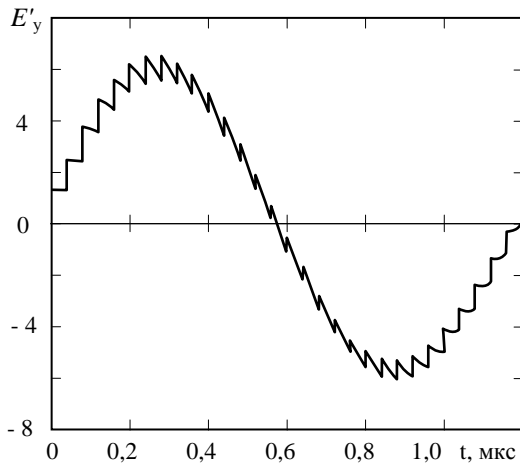
$$E_y(t) = \begin{cases} \left(-\frac{2\beta}{1+\beta}(1-e^{-t/\tau})+1\right) \cdot E_0, & \text{для } 0 \leq t < t_0; \\ \sum_{n=0}^N E_{y(n)}(t), & \text{для } t \geq t_0. \end{cases} \quad (2.42)$$

Здесь  $N = [(t - t_0)/T]$  – число оборотов волны по кольцу РБВ.

Поскольку ускоряющая секция в этой системе является частью кольца РБВ, то выражение (2.42) описывает также и амплитуду волны на входе секции при отсутствии нагрузки током.

График зависимости нормированной амплитуды волны на входе ускоряющей секции  $E'_y = E_y/E_0$  от времени  $t$  для  $t > t_0$  приведен на рис.2.16. Видно, что изменения амплитуды волны происходят характерными ступеньками, длительность которых равна длительности одного оборота фронта волны по кольцу РБВ (считаем, что коммутация при изменении режима работы системы осуществляется мгновенно).

Графики максимальной усредненной за время одного оборота волны по кольцу РБВ нормированной амплитуды волны на входе ус-

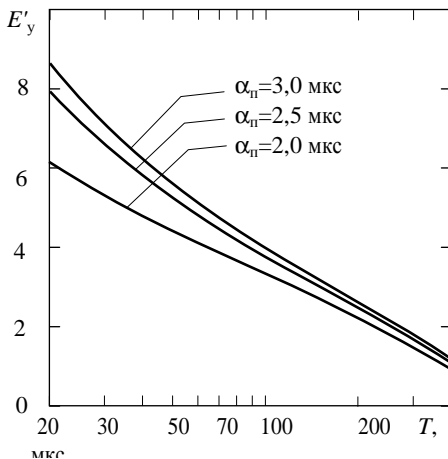


**Рис.2.16.** Изменения амплитуды волны на входе ускоряющей секции  $E'_y$  от времени  $t$  для  $t > t_0$ :  $Q_0 = 100 \cdot 10^3$ ;  $\beta = 6$ ;  $t_0 = 2,5$  мкс;  $T = 40$  нс;  $\alpha_1 = 0,01$

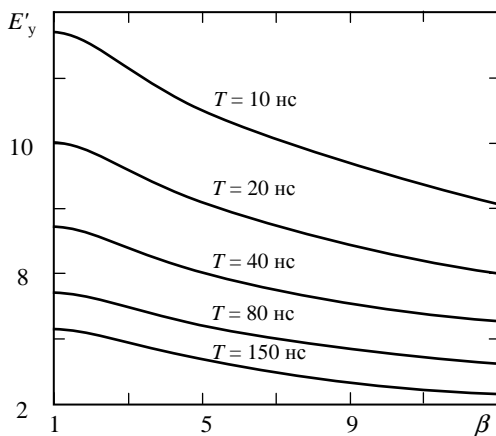
корящей секции  $E'_y$  в зависимости от длительности оборота  $T$  для различных значений затухания в кольце  $\alpha_{\text{п}}$  приведены на рис.2.17. Из графиков следует, что затухание в кольце РБВ в рассматриваемых пределах заметно влияет на величину амплитуды волны  $E'_y$  (и на коэффициент  $K_p$ ) только при малых длительностях одного оборота  $T \leq 50$  нс.

На рис.2.18 приведены графики зависимости максимальной амплитуды  $E_y$  от коэффициента связи резонаторов с трактом  $\beta$  для различных величин длительности оборота  $T$  при условии, что длительность СВЧ импульса генератора достаточна для выхода на стационарный режим в период накопления энергии. Из приведенных графиков следует, что в этом случае амплитуда волны  $E_y$  достигает максимального значения при критической связи накопительных резонаторов с трактом независимо от длительности периода  $T$ . Следовательно, в случаях, когда длительность периода накопления энергии сравнима с постоянной времени резонаторов  $\tau$ , максимальная величина амплитуды волны на входе ускоряющей секции  $E_y$  достигается при значениях коэффициента связи  $\beta$  оптимальных для каждой величины  $t_0$ . Причем, эта величина  $\beta$  также не зависит от длительности периода  $T$ .

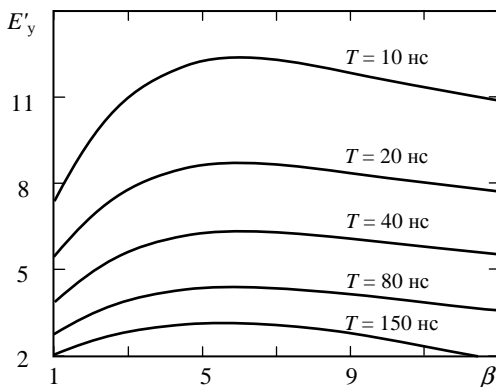
Для примера, на рис 2.19 приведены графики зависимости максимальной амплитуды волны в кольце РБВ  $E_y$  от величины коэффициента связи  $\beta$  для тех же параметров резонаторов при  $t_0 = 2,5$



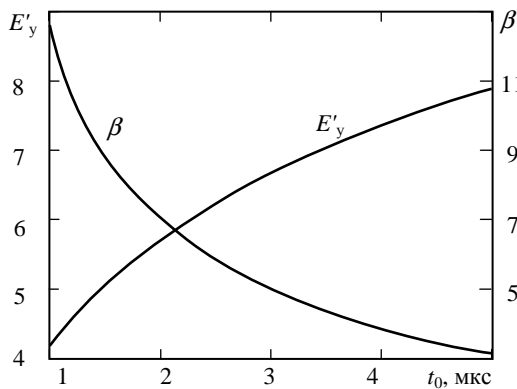
**Рис.2.17.** Зависимости амплитуды волны на входе ускоряющей секции  $E'_y$  от длительности одного оборота  $T$  для некоторых величин полного затухания в кольце РБВ  $\alpha_{\text{п}}$



**Рис.2.18.** Зависимость максимальной усредненной амплитуды волны  $E'_y$  в кольце РБВ от коэффициента связи  $\beta$  для некоторых значений длительности оборота волны по кольцу РБВ  $T$ :  $Q_0 = 90 \cdot 10^3$ ;  $\alpha_{\text{п}} = 0,01$ ;  $t_0 \gg \tau$



**Рис.2.19.** Зависимость нормированной амплитуды волны  $E'_y$  от величины коэффициента связи  $\beta$  для  $t_0 = 2,5$  мкс,  $Q_0 = 90 \cdot 10^3$



**Рис.2.20.** Зависимость оптимальной величины коэффициента связи накопительных резонаторов с трактом  $\beta$  и соответствующей ему амплитуды волны  $E'_y$  от длительности периода накопления  $t_0$  ( $T = 40$  нс)

МКС,

а на рис.2.20 – графики зависимостей максимальной величины  $E_y$  и оптимального значения коэффициента связи  $\beta$  от длительности периода накопления энергии  $t_0$  для резонаторов с  $Q_0 = 90 \cdot 10^3$ .

В случае, когда нагрузка током оказывается существенной, необходимо учитывать изменения амплитуды падающей на резонаторы волны. Пролетая через ускоряющую секцию, пучок уменьшает амплитуду ускоряющей волны на величину, определяемую выражениями (2.28). Используя принцип независимости полей, можно считать, что в системе из двух резонаторов существуют две волны: одна волна связана с накопленной в резонаторах энергией, вторая образуется за счет поля излучения пучка в секции. Вторая волна ведет себя аналогично первой, то есть изменения ее амплитуды во времени могут быть описаны выражениями (2.40). Исключение составляет только амплитуда этой волны в начале импульса тока при  $t_1 - t < T$  (где  $t_1$  – момент влета пучка в секцию). Выражение для амплитуды волны поля излучения пучка в любой точке ускоряющей секции с координатой  $z$ , имеет вид:

$$E_y(t) = \begin{cases} -IR_{\text{ш}}(1 - e^{-\alpha v_{\text{гр}} t}) & \text{для } t - t_1 \leq T; \\ -IR_{\text{ш}}(1 - e^{-\alpha z}) + \sum_{n=0}^N E_{y(n)}(t - t_1 - \frac{z}{v_{\text{гр}}}) \cdot e^{-\alpha z} & \text{для } t > t_1 + T, \end{cases} \quad (2.43)$$

где использованы обозначения:

$$E_{y(n)} = \frac{2\beta}{1 + \beta} E_{\text{п}} e^{-(n-1)\alpha_{\text{п}}} e^{-\frac{t-nT}{\tau}} \sum_{i=0}^{n-1} \left(1 - \frac{2\beta}{1 + \beta}\right)^i \times \\ \times F\left(- (n-1-i), 1, \frac{2\beta}{1 + \beta} \frac{1-nT}{\tau}\right) + \left(1 - \frac{2\beta}{1 + \beta}\right)^n E_{\text{п}} e^{-(n-1)\alpha_{\text{п}}};$$

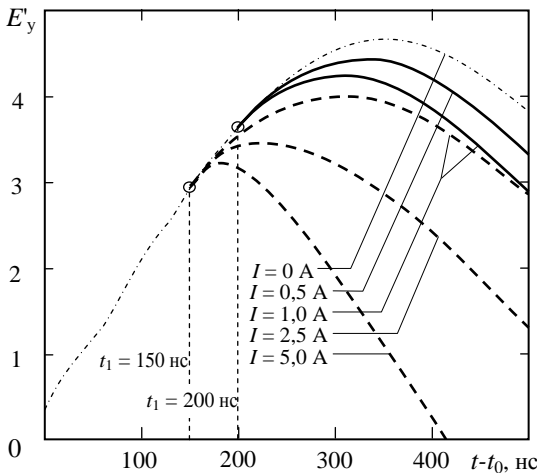
$E_{\text{п}} = -IR_{\text{ш}}(1 - e^{-\alpha_{\text{п}}})$ ;  $I$  – ток ускоряемого пучка;  $R_{\text{ш}}$  – шунтовое сопротивление ускоряющей секции;  $v_{\text{гр}}$  – групповая скорость волны в секции;  $\alpha_{\text{п}} = \alpha L$  – полное затухание волны в кольце РБВ.

Результирующая амплитуда СВЧ волны в ускоряющей секции определяется сложением двух волн – излучаемой из накопительных резонаторов (амплитуда определяется выражением (2.42)) и возникающей за счет поля излучения пучка в ускоряющей секции (амплитуда определяется выражением (2.43)).

Графики зависимости усредненной амплитуды СВЧ волны на входе ускоряющей секции  $E'_y$  от времени  $(t - t_0)$  при некоторых величинах тока пучка  $I$  приведены на рис.2.21. Графики построены для следующих значений параметров системы и ускоряющей секции:  $Q_0 = 90 \cdot 10^3$ ;  $\beta = 6$ ;  $t_0 = 2,5$  мкс;  $T = 60$  нс;  $\alpha_{\text{п}} = 0,04$ . Момент влета пучка в ускоряющую секцию  $t = t_0 + 150$  нс и  $t_0 + 200$  нс.

Получение аналитического выражения для энергии пучка на выходе ускоряющей секции в этом случае является достаточно сложной задачей. Более того, из-за сложности выражений, описывающих амплитуды волн, решение этой задачи в общем виде вряд ли представляет практический интерес, так как оно слишком неудобно для анализа. По этой причине определение энергии ускоренного пучка на выходе ЛУЭ осуществлялось в численном виде.

Поскольку в системах данного типа СВЧ волна с повышенной амплитудой сохраняется на протяжении нескольких оборотов вол-

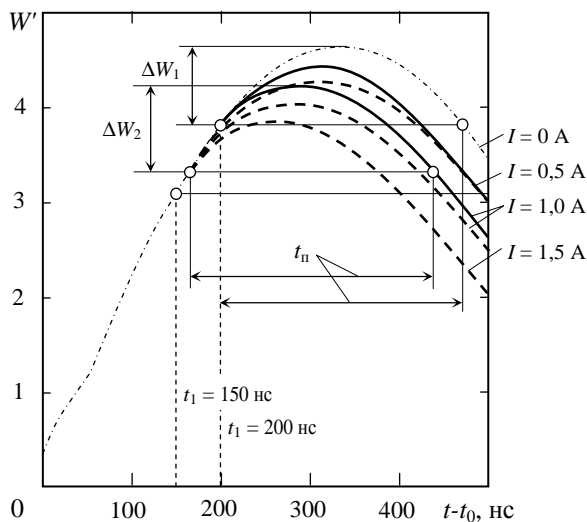


**Рис.2.21.** Зависимость средней амплитуды волны  $E'_y$  на входе ускоряющей секции от времени  $t-t_0$  в период использования накопленной энергии для различных величин тока ускоряемого пучка  $I$ :

-----  $t_1 = 150$  нс  
 \_\_\_\_\_  $t_1 = 200$  нс

ны по кольцу РБВ, то здесь при незначительной нагрузке током могут быть получены значительно более длинные импульсы тока ускоренного пучка, по сравнению с системами компрессии другого типа.

На рис.2.22 приведены графики зависимости нормированной энергии ускоренного пучка  $W' = W/W_0$  на выходе ускоряющей секции, являющейся частью РБВ, от времени  $t$  с учетом влияния нагрузки током. Из анализа приведенных графиков следует, что нагрузка током в рассматриваемой системе практически не изменяет форму импульса тока ускоренного пучка. При заданной длительности импульса тока пучка  $t_n$  влияние нагрузки током для ускоряющей секции с типовыми параметрами (см. подраздел 2.1.2) сказывается, в основном, только на величине средней энергии пучка. Ширина его энергетического спектра при изменении тока от 0 до 1,5 - 2 А остается практически постоянной (незначительно возрастает:  $\Delta W_1 \leq \Delta W_2$ ). Максимальная величина средней энергии пучка при минимальной ширине его энергетического спектра для заданной величины тока может быть достигнута при соответствующем



**Рис.2.22.** Зависимость нормированной энергии пучка  $W'$  от времени  $t - t_0$  в период использования накопленной энергии при различных величинах тока пучка  $I$ :

$Q_0 = 90 \cdot 10^3$ ;  $\beta = 6$ ;  
 $T_0 = 2,5$  мкс;  $T = 60$  нс;

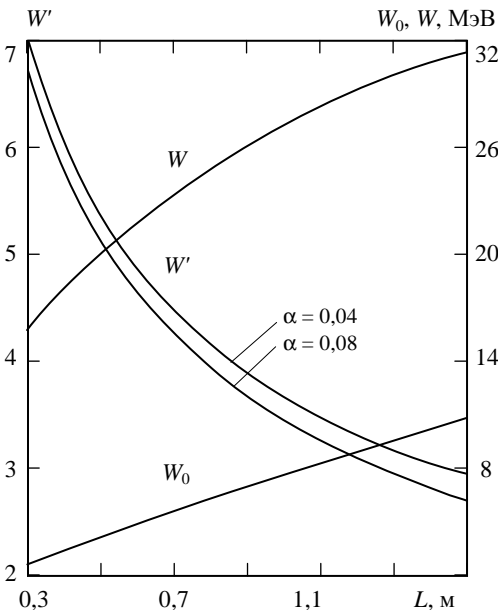
-----  $t_1 = 150$  нс;  
 \_\_\_\_\_  $t_1 = 200$  нс

выборе момента инъекции пучка. При этом, чем больше величина тока пучка, тем раньше необходимо начинать его инъекцию.

Длительность импульса тока в данных системах при сохранении приемлемой ширины энергетического спектра (до 3-5%) в несколько раз превышает время заполнения ускоряющей секции  $T$ . Так, из приведенных графиков (см. рис.2.22) следует, что при ширине спектра 5% длительность импульса тока  $t_{\text{п}} \cong 2,3 \cdot T$  (при изменении величины ускоряемого тока в пределах от 0 до 1,5 А это соотношение остается практически постоянным).

На рис.2.23 приведены графики зависимости энергии ускоренного пучка от длины ускоряющей секции  $L$  для типовой схемы ЛУЭ  $W_0$  (без системы компрессии) и для ЛУЭ с рассматриваемой системой (ускоряющая секция является частью РБВ):  $W$  – энергия пучка,  $W'$  – нормированная энергия пучка.

Несмотря на то, что величина нормированной энергии ускоренного пучка на выходе ЛУЭ  $W'$  возрастает при уменьшении длины



**Рис.2.23.** Графики зависимости энергии ускоренного пучка на выходе ЛУЭ без системы компрессии  $W_0$  и при использовании системы компрессии  $W$  и  $W' = W/W_0$  от длины ускоряющей секции  $L$ :  $P_0 = 10$  МВт;  $Q_0 = 90 \cdot 10^3$ ;  $R_{\text{ш}} = 40$  МОм/м;  $t_0 = 2,5$  мкс;  $\alpha = 0,04$  и  $0,08$  м<sup>-1</sup>

секции (здесь полагалось, что время заполнения секции пропорционально ее длине), ее абсолютное значение оказывается более высоким для более длинных секций. Поэтому для достижения более высоких энергий целесообразно применять длинные ускоряющие секции.

## **2.2. ЛУЭ с системами, использующими для накопления энергии линии задержки**

Как уже было отмечено, системы компрессии с накоплением энергии в линиях задержки формируют на выходе СВЧ импульсы с плоской вершиной. С точки зрения эффектов ускорения пучка применение таких систем полностью эквивалентно использованию более мощных СВЧ генераторов и не имеет каких-либо специфических особенностей применения этих систем для питания ЛУЭ. Поэтому интерес представляет рассмотрение характеристик самих систем компрессии с накоплением энергии в линиях задержки.

Свойство систем с накоплением энергии в линиях задержки формировать СВЧ импульсы с плоской вершиной определяется принципами их работы и не зависит от каких-либо параметров их элементов. Поэтому, фактически, характеристики таких систем определяются двумя параметрами: коэффициентом увеличения мощности (или амплитуды) волны и длительностью выходного импульса. Эти характеристики определяются как схемой построения системы, так и параметрами используемых элементов, в частности, параметрами накопителей энергии – линий задержки.

Следует отметить, что на характеристики системы также влияют и параметры других элементов – циркуляторов, волноводных мостов, коммутаторов, фазовращателей и т.п. Но в рассматриваемых системах к ним не предъявляется каких-либо специфических требований и их настройка и согласование осуществляется исходя из общих принципов настройки и согласования элементов СВЧ трактов [24]. Наличие отражений от входа системы может быть учтено как соответствующие потери мощности в ее элементах, например, в ЛЗ.

При рассмотрении принципов работы систем компрессии в подразделе 1.3 полагалось, что потери в ЛЗ отсутствуют. Однако реально любая ЛЗ вносит определенные потери мощности проходящей СВЧ волны. Конечно, эти потери могут быть незначительными и практически не влиять на характеристики системы, например, при использовании сверхпроводящих элементов. Но применение сверхпроводимости, как известно, значительно усложняет конструкцию устройства, увеличивает его стоимость и эксплуатационные расходы. В большинстве случаев это нецелесообразно.

Длительность выходного импульса системы определяется ее конструктивными особенностями и временем задержки ЛЗ в соответствующих каскадах. Эта величина достаточно просто определяется исходя из принципа работы каждой конкретной системы. В подразделе 1.3 приведены соответствующие выкладки, позволяющие определить требования к временам задержки ЛЗ в зависимости от длительностей импульса генератора и выходного СВЧ импульса.

Поэтому практический интерес представляет исследование влияния потерь мощности в ЛЗ на величину коэффициента увеличения мощности волны в системе  $K_p$ . Для простоты рассмотрения будем считать, что в системах с несколькими ЛЗ все они однотипны, то есть имеют одинаковые групповую скорость волны и погонное затухание. В общем случае это может быть не так, поскольку в первых каскадах системы целесообразно иметь ЛЗ с наименьшей групповой скоростью для снижения габаритов системы (см. подраздел 1.3), а в выходных каскадах систем наиболее важной характеристикой ЛЗ является ее электрическая прочность.

В простейшей системе компрессии с накоплением энергии в ЛЗ (см. рис.1.11) зависимость величины  $K_p$  от затухания в ЛЗ имеет вид:

$$K_p = \frac{1}{2}(1 + e^{-\alpha_n})^2, \quad (2.44)$$

где  $\alpha_n$  – полное затухание мощности в ЛЗ.

Следует отметить, что в системах, в которых для сложения СВЧ импульсов используются мосты, снижение величины коэффициен-

та  $K_p$  происходит не только за счет потерь мощности в ЛЗ, но и за счет разбаланса входных плеч моста. В рассматриваемой системе из-за того, что на плечи выходного моста приходят волны с разной амплитудой, не выполняются условия, необходимые для полного сложения мощностей двух волн только на одном из выходных плеч. В результате часть мощности оказывается на втором выходном плече моста. В то же время, влияние потерь мощности в ЛЗ снижается, так как только одна половина СВЧ импульса генератора проходит через ЛЗ, а другая половина импульса проходит непосредственно от генератора на плечо выходного моста.

Так, для рассматриваемой системы при  $\alpha_n = 0$  имеем  $K_p = 2$ , при  $\alpha_n = 0,05$  (что соответствует потерям 10% мощности в ЛЗ) имеем  $K_p = 1,90$ , а при  $\alpha_n = 0,1$  (потери 20% мощности)  $K_p = 1,81$ .

Эффективность передачи энергии в такой системе для рассмотренных величин потерь в ЛЗ составляет 1,0; 0,95 и 0,90 соответственно.

Собственно "бинарная" система при отсутствии потерь в ЛЗ имеет коэффициент увеличения мощности  $K_p = 2^n$ , где  $n$  – число каскадов, и эффективность передачи энергии системы  $\eta_p$  (коэффициент полезного действия), равный 1,0 не зависимо от числа каскадов. Для реальных ЛЗ, вносящих определенные потери мощности, величины коэффициента  $K_p$  и эффективности  $\eta_p$  уменьшаются. Выражения для коэффициента  $K_p$  для системы, состоящей из двух и трех каскадов и содержащей ЛЗ с потерями, имеют вид:

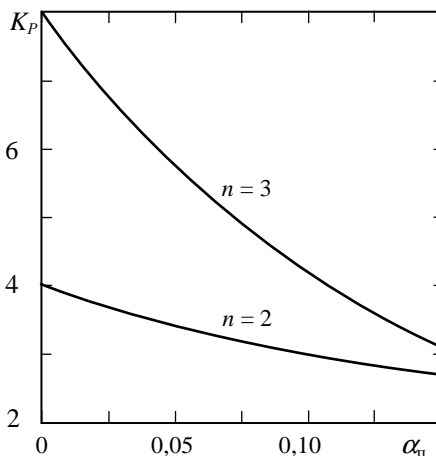
$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{1}{4}(1 + e^{-\alpha_n})^2(1 + e^{-2\alpha_n})^2 && \text{для } n = 2; \\
 K_p &= \frac{1}{8}(1 + e^{-\alpha_n})^2(1 + e^{-2\alpha_n})^2(1 + e^{-4\alpha_n})^2 && \text{для } n = 3,
 \end{aligned}
 \tag{2.45}$$

где  $\alpha_n$  – полное затухание мощности в ЛЗ последнего каскада.

Графики зависимостей коэффициента  $K_p$  от величины полного затухания в ЛЗ последнего каскада  $\alpha_n$  для системы компрессии, содержащей два и три каскада, приведены на рис.2.24. Как видно, даже небольшое затухание в ЛЗ приводит к заметному снижению коэффициента  $K_p$ . Соответственно уменьшается эффективность передачи энергии  $\eta_s$ . Так, при  $\alpha_n = 0,01$   $\eta_s = 0,97$  для двух каскадов и 0,93 для трех; а при  $\alpha_n = 0,05$   $\eta_s = 0,86$  и 0,71 соответственно. Таким образом, чем больше число каскадов в системе такого типа, тем существеннее влияние потерь в ЛЗ на величины  $K_p$  и  $\eta_s$ .

Другая система, представляющая практический интерес, – это вариант бинарной системы, в которую введена обратная связь, позволяющая использовать только один СВЧ генератор (см. рис.1.19). Для этой системы максимальная величина коэффициента увеличения мощности составляет  $K_p = 4,5$ , при отсутствии потерь в ЛЗ. Реальные величины  $K_p$  ниже.

Аналитическое выражение, определяющее зависимость коэффициента увеличения мощности системы  $K_p$  от затухания в ЛЗ, достаточно громоздко и неудобно для анализа в общем виде, поэтому оно здесь не приводится. Однако при необходимости его нетрудно получить, рассчитав амплитуды волн в каждом плече для всех мостов системы в течение длительности импульса генератора  $t_n$  последовательно для каждого момента времени с интервалом  $\Delta t = 1/5 \cdot t_n$ . График зависимости коэффициента  $K_p$  от величины



**Рис.2.24.** Зависимость коэффициента увеличения мощности  $K_p$  для "бинарной" системы с двумя и тремя каскадами умножения мощности от величины полных потерь в ЛЗ последнего каскада  $\alpha_n$

полных потерь в ЛЗ минимальной длины (ЛЗ второго каскада и ЛЗ обратной связи)  $\alpha_n$  приведен на рис.2.25.

При наличии потерь в ЛЗ снижается и эффективность передачи энергии системы  $\eta_3$ . Так, для  $\alpha_n = 0,01; 0,05$  и  $0,10$  величина  $\eta_3$  составляет  $0,87; 0,74$  и  $0,61$  соответственно (максимальная величина  $\eta_3 = 0,90$  при  $\alpha_n = 0$ ).

Система компрессии по рис.1.21, может формировать выходные импульсы с длительностью равной  $1/4$  или  $1/5$  длительности импульса СВЧ генератора  $t_n$ . Выражения для коэффициента увеличения мощности  $K_p$  для этих случаев имеют следующий вид:

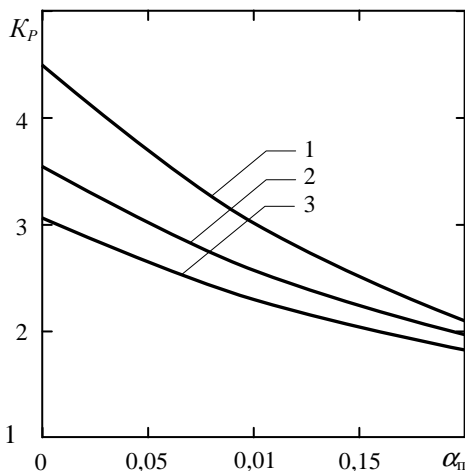
$$K_p = \frac{1}{4} \left( 1 + e^{-\alpha_n} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha_n} + e^{-3\alpha_n} \right)^2 \quad \text{для } t_B = \frac{1}{4} t_n; \quad (2.46)$$

$$K_p = \frac{1}{4} \left( 1 + e^{-\alpha_n} + \frac{1}{2} e^{-2\alpha_n} + e^{-3\alpha_n} + \frac{1}{4} e^{-4\alpha_n} \right)^2 \quad \text{для } t_B = \frac{1}{5} t_n,$$

где  $\alpha_n$  – полные потери в ЛЗ с меньшим временем задержки.

Для короткого выходного импульса, равного  $1/5 \cdot t_n$ , система имеет более высокий коэффициент увеличения мощности  $K_p$ , но более низкую эффективность  $\eta_3$ .

Графики зависимости коэффициента  $K_p$  от величины полных потерь в ЛЗ с наименьшим временем задержки  $\alpha_n$  приведены на



**Рис.2.25.** Зависимость коэффициента  $K_p$  от величины потерь  $\alpha_n$ :

- 1 – система компрессии по рис.1.19;
- 2 – система компрессии по рис.1.21 ( $t_0 = 5 \cdot t_B$ );
- 3 – система компрессии по рис.1.21 ( $t_0 = 4 \cdot t_B$ )

рис.2.25 (графики 2 и 3). Из приведенных графиков следует, что для  $t_b = 1/5 \cdot t_{и}$  величина  $K_p$  на (12-14)% больше, чем для более длинного выходного импульса. Максимальная эффективность передачи энергии в системе при отсутствии потерь в ЛЗ составляет 76,5 % для  $t_b = 1/4 \cdot t_{и}$  и 70 % для  $t_b = 1/5 \cdot t_{и}$ .

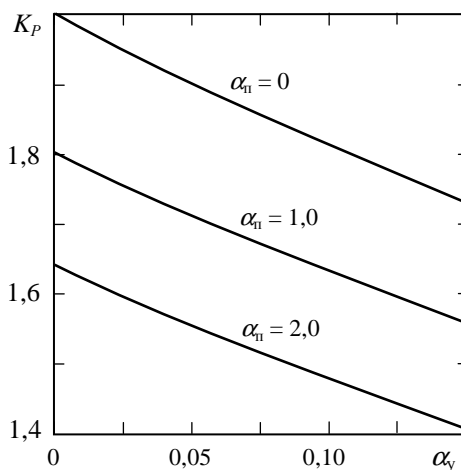
Для реальных ЛЗ, обладающих конечными потерями, эффективность передачи энергии  $\eta_3$  снижается от максимального значения до 68%, 66,5% и 58% (для короткого выходного импульса) и до 74%, 60% и 52% (для длинного импульса) при величинах полного затухания  $\alpha_{и} = 0,01, 0,05$  и  $0,10$  соответственно.

Устройство без коммутирующих элементов (см. рис.1.22), включает в себя как линию задержки, так и ускоряющую секцию. Идеальная работа такой системы, как это представлено в подразделе 1.3.3, достигается только в том случае, когда ЛЗ и ускоряющая секция обладают одинаковыми временами задержки и полными потерями. Если же имеются отличия в этих параметрах, то работа такой системы, а, следовательно, амплитуда и форма СВЧ импульса на входе ускоряющей секции отличаются от оптимальных. Так, при отличии времен задержки ускоряющей секции и ЛЗ на фронте СВЧ импульса увеличенной мощности формируется ступенька с мощностью, примерно равной мощности СВЧ генератора. Длительность этой ступеньки равна разности времен задержки ускоряющей секции и ЛЗ  $\Delta t$ . Далее, на протяжении нескольких оборотов по кольцу амплитуда волны внутри этой ступеньки приближается к амплитуде волны основного импульса, а ее длительность увеличивается на  $\Delta t$  за каждый оборот. Более подробное рассмотрение этого режима работы системы вряд ли представляет практический интерес, так как вполне реально обеспечить отличие времен задержки на уровне, сравнимом с длительностью фронта импульса СВЧ генератора (для мощных СВЧ генераторов и усилителей длительность фронтов определяется длительностью фронтов импульса высоковольтного модулятора, которая обычно находится в пределах 20-100 нс). При этом ступенька хотя и появится, но будет в значительной степени "смазана" и практически не будет влиять на форму импульса на входе ускоряющей секции. При необходимости

этот режим можно проанализировать последовательным расчетом амплитуд волн на плечах мостов для соответствующих моментов времени в течение всего СВЧ импульса.

Значительно больший интерес для практического использования представляет рассмотрение режима работы системы, когда в ускоряющей секции и ЛЗ имеются потери СВЧ мощности. При этом они не обязательно должны быть равны между собой. На рис.2.26 приведены графики зависимости коэффициента увеличения мощности СВЧ волны в системе  $K_p$  от величины полных потерь в ускоряющей секции  $\alpha_y$  и в линии задержки  $\alpha_{л}$ . Анализируя эти графики, нетрудно заметить, что потери в ускоряющей секции оказывают более существенное влияние на величину  $K_p$ , чем потери в ЛЗ. Это связано с тем, что после первого оборота фронта волны по кольцу мощность, поступающая на вход ЛЗ, оказывается существенно меньше, чем мощность на входе ускоряющей секции. Поэтому и потери в ней менее существенны для работы системы.

Рассмотрим характеристики систем компрессии, где ЛЗ используются как элементы резонаторов. При анализе работы систем, в которых ЛЗ являются элементами резонаторов с бегущими или стоячими волнами, не представляется возможным воспользоваться понятием постоянной времени, так как она является интегральной характеристикой, усредняющей амплитуды волн в резонаторе и на его входе за время, пре-



**Рис.2.26.** Зависимость коэффициента увеличения мощности  $K_p$  от величины полных потерь в ускоряющей секции  $\alpha_y$  и линии задержки  $\alpha_{л}$  для системы компрессии по рис.1.22

вышающее длительность периода прохода фронта волны по резонатору. Для исследования данных систем необходимо учитывать изменения амплитуды волны на каждом обороте ее фронта по кольцу резонатора с бегущими волнами (РБВ).

В общем случае, устройством связи РБВ с СВЧ трактом является направленный ответвитель с переходным ослаблением  $L = -20 \lg(k)$  ( $k$  – коэффициент передачи направленного ответвителя). Выражение, описывающее изменения амплитуды волны  $E'_p$ , циркулирующей в кольце РБВ, от величины затухания в ЛЗ  $\alpha_n$  и количества оборотов  $n$ , совершенных фронтом волны по кольцу РБВ, имеет вид:

$$E'_p(n) = k \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left( \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-\alpha_n} \right)^i. \quad (2.47)$$

Вывод запасенной в кольце энергии в нагрузку (ускоряющую секцию) осуществляется инвертированием фазы волны генератора. Коэффициент увеличения мощности для такой системы  $K_p$  в зависимости от параметров  $n$ ,  $\alpha_n$  и  $k$  определяется выражением:

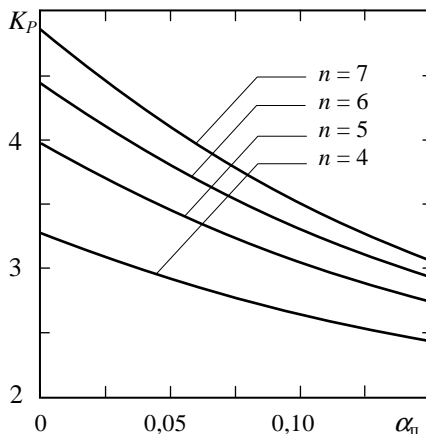
$$K_p = \frac{1}{n} \left[ \sqrt{1-k^2} + k^2 e^{-\alpha_n} \cdot \sum_{i=0}^{n-2} \left( \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-\alpha_n} \right)^i \right]. \quad (2.48)$$

Численный анализ выражения (2.48) показал, что при небольшом числе оборотов фронта волны по кольцу РБВ в период накопления энергии ( $n < 10$ ) амплитуда волны максимальна для  $k \cong 0,70$  (СВЧ мост), практически независимо от потерь в ЛЗ.

Графики зависимости коэффициента увеличения мощности в такой системе  $K_p$  от полных потерь в ЛЗ  $\alpha_n$  для некоторых значений числа оборотов фронта волны по кольцу РБВ в период накопления энергии  $n$  приведены на рис.2.27. Графики построены для системы, использующей в качестве устройства связи РБВ с трактом высокочастотный мост.

Максимальная эффективность передачи энергии в такой системе при отсутствии потерь в ЛЗ достигается при  $n = 3$  (в течение двух оборотов волны осуществляется накопление энергии, а на

третьем – вывод мощности в нагрузку) и  $k = \sqrt{3}/2 \cong \cong 0,87$ . В этом случае эффективность передачи энергии составляет  $\eta_3 = 88,7\%$ . При увеличении числа оборотов и величины потерь в ЛЗ эффективность снижается. В табл.2.4 приведены значения эффективности передачи энергии в такой системе  $\eta_3$  для числа оборотов волны  $n = 2-6$  и некоторых значениях  $\alpha_{\Pi}$ .



**Рис.2.27.** Зависимость коэффициента увеличения мощности  $K_p$  от полных потерь в ЛЗ  $\alpha_{\Pi}$

**Таблица 2.4**

Эффективности передачи энергии  $\eta_3$  в системе в зависимости от числа оборотов волны  $n$  и величины полных потерь  $\alpha_{\Pi}$

$\alpha_{\Pi}$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$
0	81,1	81,9	78,8	74,2	69,1
0,01	79,6	80,1	77,2	71,8	66,7
0,05	75,0	73,5	68,8	63,7	58,3
0,10	69,6	66,4	60,9	55,5	50,0

Из данных таблицы 2.4 следует, что эффективность рассматриваемой системы компрессии  $\eta_3$  сравнима с эффективностью систем, использующих традиционные резонаторы в качестве накопителей энергии.

## Приложение

# ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОМПРЕССИИ В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Несмотря на то, что данная работа посвящена исследованию вопросов применения систем компрессии энергии поля СВЧ генератора в линейных ускорителях электронов, это не означает, что данные системы не могут быть использованы в других типах ускорителей, например, в ускорителях ионов. При этом физика процессов, происходящих в таких ускорителях, останется такой же, но из-за использования в ионных ускорителях СВЧ генераторов более низкого частотного диапазона (как правило, это частоты в диапазоне 100-400 МГц), возможно, потребуется применение других технических решений при разработке конструкций элементов систем: накопителей энергии, коммутирующих устройств. В общем случае исследование проблемы применения систем компрессии в ускорителях ионов представляет собой самостоятельную, достаточно сложную задачу.

Рассмотрим основные особенности применения систем компрессии энергии СВЧ поля, не использующих сверхпроводящие элементы (использование таких элементов существенно повышает стоимость установки и расходы на ее эксплуатацию) в линейных ускорителях электронов.

Прежде всего, определим границы применимости этих систем. Для применения систем компрессии фактически имеется только одно ограничение: они не могут быть использованы с целью повышения средней мощности ускоренного пучка. Это связано с тем, что системы обладают конечной величиной коэффициента передачи энергии и, следовательно, могут только уменьшить среднюю мощность пучка на выходе ускорителя. В то же время, применение систем может быть оправдано при необходимости увеличить среднюю интенсивность тормозного излучения, так как от величины тока пучка выход тормозного излучения зависит линейно, а от его

энергии – во второй-третьей степени в зависимости от абсолютного значения энергии [25]. Поэтому, например, при уменьшении среднего тока пучка за счет сокращения его длительности в пять раз и повышении его энергии в два раза (при этом эффективность передачи энергии в системе составляет 0,8) выход тормозного излучения может возрасти в  $8/5 = 1,6$  раза.

Целесообразность применения той или иной системы компрессии в ЛУЭ определяется требованиями к параметрам ускоренного пучка и техническим характеристикам ЛУЭ. Наиболее существенными параметрами здесь являются необходимая энергия частиц, а также величина и длительность тока ускоряемого пучка.

При необходимости получения относительно длинных импульсов тока пучка ( $\sim 1$  мкс) наиболее эффективно, вне зависимости от величины ускоряемого тока, могут быть использованы системы с накоплением энергии в резонаторах с постоянными параметрами. Если предъявляются повышенные требования к параметрам пучка, то могут быть использованы системы с коррекцией формы вершины выходного импульса. Применять для таких установок системы с накоплением энергии в ЛЗ нецелесообразно из-за того, что при таких длительностях СВЧ импульсов ускоряющей волны геометрическая длина ЛЗ составит сотни метров и потребует существенного увеличения габаритов и стоимости установки.

Для установок с временем заполнения ускоряющих секций порядка 0,1-0,4 мкс и длительностью тока пучка менее 0,1-0,2 мкс достаточно эффективно могут быть применены практически все рассматриваемые варианты систем компрессии. Здесь для очень коротких импульсов тока (вплоть до "односгусткового" режима) хорошие результаты могут быть получены при использовании систем с накопительными резонаторами с изменяемыми параметрами, которые могут обеспечить увеличение энергии пучка в три-четыре раза (полагается, что мощность СВЧ генератора задана). Однако такие системы следует применять только в том случае, когда не предъявляется жестких требований к параметрам пучка: существенные изменения мощности СВЧ волны в течение СВЧ импульса приводят к заметному возрастанию ширины энергетического спек-

тра пучка. В этих случаях целесообразно использовать системы с постоянными параметрами резонаторов, а для получения прецизионных пучков – системы с ЛЗ. Прецизионные пучки также могут быть получены и при использовании систем с постоянными параметрами резонаторов и коррекцией вершины выходного импульса. Следует также иметь в виду, что такие системы целесообразно использовать только в том случае, когда можно сформировать импульс, длительность плоской вершины которого превышает время заполнения ускоряющей секции. Возможности применения этих систем также ограничены максимальной величиной коэффициента увеличения мощности СВЧ волны: реально не более 6-7.

Для совсем коротких ускоряющих секций с временем заполнения менее 0,1 мкс наиболее эффективно могут быть использованы системы с изменяемыми параметрами накопительных резонаторов и системы с резонансной нагрузкой. При режимах, близких к режиму запасенной энергии (имеется в виду режим запасаения энергии в ускоряющей секции, когда ускоряемей пучок состоит из одного сгустка с большой величиной тока), оба типа систем могут быть использованы достаточно эффективно. Для более длительных импульсов тока и незначительной токовой нагрузке также могут быть применены системы с резонансной нагрузкой или системы с накопительными резонаторами.

Для оценки экономического эффекта применения систем компрессии энергии в линейных ускорителях электронов определим расходы, необходимые для создания пучка определенной мощности на облучаемой мишени (объекте). Стоимость 1 кВт-часа энергии пучка ускорителя в мишени приближенно можно оценить с помощью выражения:

$$S = \frac{1}{\eta_m \eta_e P_\Gamma Q} (S_1 + S_2 + S_3 + S_4), \quad (\text{П.1})$$

где  $\eta_m$  и  $\eta_e$  – КПД пучка в мишени и электронный КПД ускорителя соответственно;  $P_\Gamma$  – мощность питающего СВЧ генератора;  $Q$  – усреднение импульсного процесса (скважность);  $S_1$  – коэффициент, учитывающий стоимость основного и вспомогательного СВЧ

оборудования (пропорционален мощности генератора  $P_G$  и его анодному напряжению  $U_a$  в степени  $3/2$ );  $S_2$  – коэффициент, учитывающий расходы на ускоряющую секцию, пропорционален ее длине (не зависит от  $P_G$ );  $S_3$  – коэффициент, учитывающий стоимость специальных помещений (пропорционален длине ускорителя, мощности генератора и энергии частиц на выходе);  $S_4$  – коэффициент, учитывающий остальные статьи расходов. В данном случае интерес представляют коэффициенты, зависящие от мощности ускоряющей СВЧ волны (мощность СВЧ генератора) и от параметров вспомогательного оборудования: напряжения импульсных модуляторов, габаритов специальных помещений и т.п.

Из анализа выражения (П.1) следует, что стоимость энергии ускоренного пучка уменьшается при увеличении мощности ускоряющей СВЧ волны, снижении анодного напряжения СВЧ генератора, а также уменьшении длины ускоряющей секции и габаритов специальных помещений.

Для традиционных установок увеличение мощности ускоряющей СВЧ волны однозначно связано с повышением мощности питающего СВЧ генератора, а, следовательно, и его анодного напряжения и приводит к возрастанию стоимости высоковольтного и вспомогательного оборудования и всего ускорителя в целом. С другой стороны, применение систем компрессии энергии позволяет повышать импульсную мощность ускоряющей СВЧ волны без увеличения мощности генератора, то есть без изменения его стоимости. При этом также не требуется увеличение габаритов специальных помещений (хотя, при значительном увеличении энергии пучка может возникнуть необходимость усиления радиационной защиты).

Конкретная величина экономического эффекта применения систем компрессии энергии СВЧ поля в ЛУЭ зависит от особенностей каждой конкретной установки, поэтому не представляется возможным сделать соответствующие оценки в общем виде. В то же время, может быть дана ориентировочная оценка эффекта. Реальные оценки соотношения стоимостей элементов системы компрессии энергии и соответствующих источников СВЧ мощности (мощных

генераторов и усилителей с аналогичной выходной мощностью) показывают, что затраты на изготовление системы компрессии оказываются примерно на порядок меньше стоимости генераторов. Следовательно, применение систем компрессии практически не влияет на стоимость вспомогательного оборудования ускорителя. При этом стоимость энергии пучка, обратно пропорциональная мощности ускоряющей СВЧ волны (величина  $P_r$ ) и эффективности передачи энергии  $\eta$ , (КПД системы) в соответствии с (П.1) оказывается меньше исходной на величину  $K_p$ . Для ЛУЭ с типовыми параметрами реальные значения коэффициента  $K_p$  составляют около 5-6 при эффективности передачи энергии 0,6-0,7. Таким образом, стоимость энергии пучка ЛУЭ с системой компрессии оказывается меньше в 3-4 раза. Следует, однако, иметь в виду, что здесь не учитывался коэффициент усреднения  $Q$ , величина которого в данном случае из-за уменьшения длительности импульса тока снижается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябухин Ю.С., Шальнов А.А. Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980.
2. Лебедев А.Н, Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Fasio M.V., Haynes W.B., Carlsten B.E., Stringfield R.M. A 500 MW Annular Beam Relativistic Klystron. – 17nt Int. Linac Conf. (Linac 94 Tsukuba). Abstracts. August 21-26, 1994. Tsukuba, Japan.
5. Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Сулакшин И.С. и др. Формирование мощных импульсов при накоплении СВЧ энергии в резонаторе. // Радиотехника и электроника. 1980. Т.25. № 6. С.1227.
6. Birx D., Dick G.L., Little W.A. et.al. Microwave power gain utilizing superconducting resonant energy storage. Appl.Phys.Lett. 32(1), 1 January 1978, P.68-70.
7. Богданович Б.Ю., Гаврилов Н.М., Шальнов А.В. Ускорители с накоплением и генерацией высокочастотной энергии. М.: Энергоатомиздат, 1994.
8. Богданович Б.Ю., Игнатъев А.П., Останин В.А. и др. Автоускорение релятивистского сгруппированного пучка в резонансных системах. Препринт / МИФИ 036-86, М.: МИФИ, 1986.
9. Alvarez R.A., Birx D.L., Byrne D.P. et.al. Application of Microwave Energy Compression to Particle Accelerators.- Particle Accelerators, 1981, v.11, P. 125-130.
10. A 90 MeV Electron Linac of ИЯЭ / Electron Linac Group. - SLAC-Report-303, September 1986, P.505-507.
11. Богданович Б.Ю., Сенюков В.А., Шальнов А.В. Линейный ускоритель электронов с накоплением энергии в системе ВЧ-питания. Препринт/ МИФИ 039-88, М.: МИФИ, 1988.
12. Wilson P.B. Linear Accelerators for TeV Colliders. SLAC-PUB-3674, May 1985.
13. Balakin V.E., Syrachev I.V. A New Approach in RF Multiplication. - 2-nd Int. Workshop on Next Generation Linear Collider, LC-90, March 28 - April 5, 1990, КЕК, Tsukuba, Japan, P.643-654.

14. Kazakov S.Y. Pulse Shape Correction for RF Pulse Compression System. VLEPP-Note 92-01, March 1992, RF.
15. Balakin V., Syrachev I. Recent Progress in Operation of the X-Band "Open" Cavity RF-Pulse Compression System. - 17th Int. Linac Conf. (Linac 94 Tsukuba). Abstracts. August 21-26, 1994. Tsukuba, Japan.
16. Wilson P.B. Linear Accelerators for TeV Colliders. SLAC-PUB-3674, May 1985.
17. Schwarzkopf D.B. The Traveling Wave Resonator as a Short Pulse Generator. // Microwave Journal, Vol. V, October 1963, P.172-180.
18. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968.
19. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1983.
20. Ускорители заряженных частиц. Терминология. М.: Наука, 1977.
21. Справочник по диафрагмированным волноводам. / О.А.Вальднер, Н.П.Собенин, Б.В.Зверев., И.С.Щедрин; Изд.2-е. М.: Атомиздат, 1977.
22. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
23. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
24. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1, М.: Высшая школа, 1970.
25. Гусев Н.Г., Ковалев Е.Е., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Т.2. М.: Атомиздат, 1983.

Богданович Борис Юрьевич  
Каминский Владимир Ильич  
Сенюков Виктор Алексеевич

СИСТЕМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПИТАНИЯ  
ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ С  
НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ СВЧ ПОЛЯ

*Учебное пособие*

Редактор Н.В. Шумакова

Подписано в печать  
Печ. л. 6,0  
Изд. № 061-1

Уч.-изд. л. 6,0

Формат 60×84 1/16  
Тираж 120 экз.  
Заказ №

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет)

Типография МИФИ 115409, Москва, Каширское шоссе, 31