

Таврический государственный агротехнологический университет

На правах рукописи

Никифорова Лариса Евгеньевна

УДК 632.935.4:537.868

**НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АКТИВАЦИИ СЕМЯН
ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР**

Специальность 05.11.17 –
биологические и медицинские устройства и системы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научные консультанты:
заслуженный деятель науки и техники Украины,
доктор технических наук, академик УААН, профессор
Мартыненко Иван Иванович;

доктор технических наук, профессор
Червинский Леонид Степанович

Мелитополь - 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
----------------	---

РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ АКТИВАЦИИ СЕМЯН И ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

1.1. Уровень производства продукции овощеводства защищенного грунта в Украине.....	16
1.2. Анализ существующих методов активации семян.....	18
1.3. Электромагнитные технологии в растениеводстве.....	27
1.4. Анализ информационных процессов в биологических объектах под влиянием внешних электромагнитных полей.....	33
1.5. Анализ электрофизических методов и технических средств получения информации о состоянии растительных биообъектов.....	48
1.6. Обоснование требований к источникам электромагнитного излучения для информационно – резонансного воздействия на биологические объекты.....	57
1.7. Анализ технических средств электромагнитного излучения для воздействия на биологические объекты.....	59
1.8. Обоснование выбора направлений исследования.....	64
Выводы.....	65

РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВЧ ДИАПАЗОНА С СЕМЕНАМИ ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

2.1. Решение задачи о рассеянии плоской волны на биологическом объекте.	67
2.2. Численный анализ полученных результатов.....	85

2.3. Учет отклонения формы зерновки от сферической.	93
2.4. Воздействие низкоэнергетического электромагнитного излучения на транспорт питательных веществ в клетках ранний.....	101
Выводы.....	116

РАЗДЕЛ 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ПО ЧАСТОТЕ ИСТОЧНИКОВ КВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

3.1. Практические требования к источникам КВЧ излучения и методы повышения стабильности их частоты.....	118
3.2. Моделирование и расчет импеданса ЛПД КВЧ диапазона длин волн.....	128
3.3. Анализ частотных и энергетических характеристик ГЛПД радиально-волноводной системы.....	135
3.4. Обоснование возможностей повышения стабильности частоты ГЛПД.....	141
3.5. Сложение мощностей ГЛПД в открытом бочкообразном резонаторе.....	148
3.5.1. Анализ собственных частот ОБР.....	149
3.5.2. Обоснование по размещению ЛПД в открытом бочкообразном резонаторе.....	155
Выводы.....	157

РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРАЙНЕВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ НА СЕМЕНА ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

4.1. Цель и задачи экспериментальных исследований.....	159
--	-----

4.2.	Разработка и анализ технических параметров генератора КВЧ диапазона для предпосевной обработки семян тепличных культур.	160
4.3.	Обоснование технических средств для регистрации биоэлектрических характеристик семян и растений тепличных культур.	167
4.4.	Экспериментальные исследования с семенами тепличных культур после их облучения низкоэнергетическим электромагнитным излучением крайневыхочастотного диапазона.	177
4.4.1.	Обоснование параметров резонаторной камеры для обработки семян.	180
4.4.2.	Экспериментальные исследования по определению оптимальных технологических параметров ЭМП крайневыхочастотного диапазона для предпосевной обработки семян огурцов и томатов.	191
4.5.	Изучение влияния электромагнитных полей крайневыхочастотного диапазона на развитие тепличных культур.	201
4.5.1.	Влияние электромагнитного излучения крайневыхочастотной частоты на хромосомные абберации семян огурцов и томатов.	201
4.5.2.	Полевая всхожесть семян огурцов и томатов.	209
4.5.3.	Исследование пигментов хлорофилла «а» в листьях огурцов и томатов после обработки их семян электромагнитным излучением.	214
4.6.	Влияние ЭМП крайневыхочастотной частоты на урожайность огурцов и томатов.	224
	Выводы.	229

РАЗДЕЛ 5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ

5.1.	Общие положения методики низкоэнергетической электромагнитной обработки семян.	231
------	--	-----

5.2. Технические средства низкоэнергетической электромагнитной активации семян тепличных культур.	233
5.3. Производственная проверка технических средств и режимов низкоэнергетической электромагнитной активации семян.....	240
5.3.1. Оценка эффективности низкоэнергетической электромагнитной технологии активации семян тепличных культур.	241
5.3.2. Техничко – экономические показатели эффективности внедрения разработанной технологии.	248
Выводы.	252
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	253
Приложение А. Протокол о совместной научно-исследовательской работе.....	256
Приложение Б. Результаты статистической обработки экспериментов с семенами огурцов.....	259
Приложение В. Результаты статистической обработки экспериментов с семенами томатов.....	265
Приложение Г. Блок обработки электрофизической информации.....	271
Приложение Д. Протоколы.....	275
Список использованной литературы.....	281

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭМП	–	электромагнитное поле;
ЭМИ	–	электромагнитное излучение;
КВЧ	–	крайневысокочастотный;
СВЧ	–	сверхвысокочастотный;
НЭ	–	низкоэнергетический;
БЭП	–	биоэлектрический потенциал;
ЛПД	–	лавиннопролетный диод;
ГЛПД	–	генератор на лавиннопролетном диоде;
ГДГ	–	генератор на диоде Ганна;
ОБР	–	открытый бочкообразный генератор;
СР	–	стабилизирующий резонатор;
УПЧ	–	усилитель промежуточной частоты;
ФАП	–	фазовая автоподстройка;
ЭДС	–	электродвижущая сила;
ВЧГ	–	высокочастотный генератор;
ФВ	–	ферритовый вентиль;
ХМ	–	волномер;
ВЛ	–	измерительная линия;
ДН	–	диаграмма направленности;
ЭМВ	–	электромагнитные волны;
НГ	–	непрерывная генерация;
БО	–	биологический объект;
СФ	–	спектрофотометр.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В решении продовольственной проблемы Украины большую роль играет производство овощной продукции на протяжении всего года, что возможно лишь при использовании технологий защищенного грунта. В Украине на одного жителя приходится около $0,25\text{ м}^2$ площади защищенного грунта, тогда как во Франции - $5,6\text{ м}^2$, в Нидерландах - $5,4\text{ м}^2$. Для удовлетворения потребности населения страны в тепличной продукции, необходимо существующие площади увеличить в 2 раза. Рост площадей теплиц возможно при условии повышения их рентабельности и конкурентной способности выращиваемых культур. Вместе с тем, анализ литературы и опыт стран с развитой областью растениеводства свидетельствует, что перспективным является не простое наращивание посевных угодий, а максимальное повышение продуктивности растений.

Средняя урожайность огурцов и томатов на Украине (наиболее распространенных овощей в теплицах) составляет $8,5 - 9,0\text{ кг/м}^2$, тогда как их потенциальная урожайность может достичь $30 - 35\text{ кг/м}^2$. Однако, реализовать такой потенциал, в среднем по стране, удастся лишь на 20-30%. Главными факторами такого положения является несоблюдение технологии, использование семян с низкими посевными качествами и отклонение от нормы климатических факторов, которые влияют на рост и производительность тепличных растений. Доля применения некондиционных семян за последние годы выросла до 90%. Вследствие этого снижается урожайность до 30%, что ведет за собой повышение трудозатрат, энергозатрат и себестоимости продукции.

Следует также указать, что на получение всего 1% увеличения урожайности овощных приходится около 5% “антропогенных” затрат, снизить которые возможно при условии разработки новых, менее энергоемких технологий, в том числе технологий активации семян. В

начальный период своего развития растения тесно связаны с семенами, получая от них необходимые для роста и развития питательные вещества и строительный материал. В этот период внешние факторы наиболее сильно влияют на семена, вызывая в них структурные изменения и создавая предпосылки для стимуляции или угнетения процессов жизнедеятельности растений в следующие периоды их развития.

Наиболее эффективными, энергосберегающими и экологически чистыми являются электромагнитные технологии предпосевной обработки семян.

Руководствуясь информационно - резонансным взаимодействием электромагнитных излучений с биологическими объектами, появляется возможность изменения традиционных технологий на электромагнитные с информационным уровнем воздействия ЭМП на семена тепличных культур, с целью повышения их урожайности.

Накопленный опыт в изучении реакций биологических объектов на воздействие низкоэнергетического электромагнитного излучения показывает, что информационное влияние ЭМП на метаболические процессы в биообъектах происходит только при определенном сочетании технологических параметров ЭМП (частота, мощность, модуляция, стабильность частоты источников излучения).

Однако, актуальная проблема повышения урожайности культур растениеводства в закрытом грунте связана с существенными трудностями из-за отсутствия как теоретических работ, исследующих процесс взаимодействия низкоэнергетических ЭМП с биообъектами с учетом их морфологического строения, электрофизических свойств, внутренних ЭМП, так и источников крайне высокой частоты с выходной мощностью 4000 – 5000 мВт и относительной нестабильностью частоты 10^{-6} - 10^{-7} .

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, позволят создать новые электромагнитные технологии в

сельском хозяйстве и получить приоритетные для Украины результаты в областях науки и производства.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Исследования по теме диссертационной работы проводились на протяжении 1993 - 2006 гг. на базе Таврического государственного агротехнологического университета в соответствии с обще украинскими научными программами: обще украинской научно - технической программой на 1991-1995г. “Развитие исследований и использование СВЧ - энергии в АПК страны”, Постановлением кабинета министров Украины от 22.06.1994р №429 ”О реализации приоритетных направлений развития науки и техники”, “СВЧ - электроника - народному хозяйству Украины” (1991 – 2000гг), Постановлением кабинета министров Украины от 24 декабря 2001г № 1716 «Об утверждении перечня государственных научных и научно - технических программ приоритетных направлений развития науки и техники на 2002 - 2006 года», «Новые технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции»

По планам НИР и ОКР были выполнены следующие работы:

- научно-исследовательская работа на 2000-2005 года. «Разработка средств для обеспечения продовольственной безопасности Южного региона Украины» (ГР №012U000678);
- научно-исследовательская работа «Экспериментальные исследования по влиянию ЭМП КВЧ диапазона на биологические объекты в сельском хозяйстве» (ГР №0104U003721);
- научно-исследовательская работа «Анализ проблем, связанных с построением электротехнологий для обработки семян на основе ЭМП» (ГР №0107U008951);
- «Практические аспекты применения низкоэнергетического электромагнитного излучения в медицине и сельском хозяйстве» (ГР №0103U004246).

Цель и задачи исследований. Целью данной работы является повышение урожайности тепличных культур путем применения электромагнитных технологий предпосевной обработки семян на базе теоретических положений активации семенного материала под воздействием низкоэнергетического электромагнитного поля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать частотный диапазон, вызывающий активацию семян тепличных культур, на основе разработки математической модели резонансного поглощения электромагнитного поля;
- теоретически исследовать процесс влияния низкоэнергетического электромагнитного поля на мембранный транспорт веществ в клетках семян с целью определения плотности потока мощности и экспозиции для их обработки;
- исследовать и разработать высокостабильные источники КВЧ излучения, перестраиваемые по частоте, в твердотельном исполнении для использования в низкоэнергетических электромагнитных технологиях активации семян;
- исследовать и обосновать метод сложения мощностей нескольких источников крайневых высокочастотного излучения;
- разработать методику и оборудование технической системы контроля биоэлектрических характеристик семян для прогнозирования результатов электромагнитного облучения тепличных культур;
- провести экспериментальные исследования по влиянию НЭ ЭМП КВЧ диапазона на семена тепличных культур с целью уточнения технологических параметров, вызывающих повышение урожайности тепличных культур растениеводства.

Объект исследования. Процессы активации семян тепличных культур под влиянием низкоэнергетических электромагнитных полей.

Предмет исследования. Закономерности влияния низкоэнергетических электромагнитных полей на активацию семян и урожайность тепличных культур.

Методы исследования. Теоретическая составляющая разработки научно-технических основ создания низко энергетических электромагнитных технологий активации семян базируется на использовании элементов системного анализа; методов теоретической и математической физики; теоретических основ электродинамики, электроники и радиоавтоматики; методов решения дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений; теоретических методов биофизики.

Достоверность научных положений устанавливалась на основе соответствия теоретических исследований – математических моделирований и вычислительных экспериментов результатам экспериментальных исследований и производственных испытаний.

Экспериментальные исследования предусматривали использование математического метода планирования полного факторного эксперимента с использованием регрессионного и дисперсионного методов анализа полученных данных. Проведение вычислительных экспериментов, обработка экспериментальных данных базировалась на использовании программных средств.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что в данной работе:

- впервые, на основе разработанной математической модели, получены закономерности резонансного поглощения низкоэнергетического электромагнитного поля в семенах тепличных культур, позволяющие определить его частотный диапазон, обеспечивающий активацию семенного материала;
- впервые получены зависимости изменения ионного тока в клетках семян и мембранного транспорта веществ под воздействием

низкоэнергетического электромагнитного поля, позволяющие найти плотность потока мощности и экспозицию для обработки тепличных культур.

- получила дальнейшее развитие теория создания высокостабильных, перестраиваемых по частоте, устройств крайневыхочастотного излучения для предпосевной обработки семян;
- впервые разработан метод суммирования мощностей источников крайневыхочастотного излучения на основе открытых бочкообразных резонаторов;
- впервые предложен метод биоэлектрических потенциалов для определения технологических параметров электромагнитного поля, которые обеспечивают повышение урожайности тепличных культур;
- впервые математически интерпретирована зависимость между биоэлектрическими потенциалами семян тепличных культур и параметрами воздействующего на семена электромагнитного поля (частота, плотность потока мощности, экспозиция).

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что :

- разработана эффективная, энергосберегающая, экологически безопасная электромагнитная технология для повышения урожайности и качества тепличных культур, а также технические средства предпосевной обработки семян тепличных культур низкоэнергетическими электромагнитными полями крайневыхочастотного диапазона;
- для обеспечения оптимальных режимов обработки семян тепличных культур, приводящих к повышению урожайности, установлен частотный диапазон, плотность потока мощности и экспозиция воздействующего ЭМП;
- использование разработанной технологии и технических средств, в плодовоовощном хозяйстве "Южная сельскохозяйственная компания", г.

Николаев, тепличном комплексе ООО "Оксамит" Николаевской области Октябрьского района и фермерском хозяйстве "Фермерское хозяйство Мехтиев Ш.А." Мелитопольского района Запорожской области привело к повышению урожайности огурца и томата на 20 - 30% , при этом экономическая эффективность с площади 2000 м² составила 11-12 тыс. грн. за год (что подтверждено соответствующими актами внедрения);

- результаты теоретических и практических разработок используются с 2005 года в учебном процессе при преподавании курса „Электротехнологии в аграрном производстве” (Таврический государственный агротехнологический университет, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко).

Личный вклад соискателя. Новые научные результаты диссертации получены соискателем лично. В научных работах, написанных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: в научных работах [70,69] автору принадлежит разработка теоретических положений, связанных с влиянием резонансно-периодического режима облучения на рассаду огурцов и обоснование мониторинга биологических объектов на основе использования в них резонансных явлений; в работах [221,94] автор провел теоретические исследования по расчету резонансных частот электромагнитных излучений в клетках растительных биосистем; в работе [95] автор обосновал электрофизическую модель клетки и ее резонансные свойства; в работах [223,209] обоснована инновационная технология электромагнитной обработки семян.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований и материалы, включенные к диссертации, докладывались и были обсуждены на международных, ведомственных и вузовских научно-технических конференциях, симпозиумах: Международный симпозиум “Усовершенствование зональных систем машин (Киев, 1994),

международная научно-практическая конференции “Научно-технический прогресс в АПК”(г. Мелитополь, 1999-2007гг.); международная научно-практическая конференция “Проблемы энергообеспечения и энергосбережение в АПК Украины” (г.Харьков, 2000-2006 гг.); международная научно-техническая конференция “Земледельческая механика на рубеже веков” (г. Мелитополь, 2001г.); международная научно-практическая конференция “Применение лазеров в медицине и биологии” (г. Ялта, 2001-2007 гг.), международная научно-практическая конференция «Проблемы электрификации и автоматизации сельского хозяйства», (Киев, 18-20 декабря 2002 г.); международная конференция ”Научно-Технический прогресс в инженерной сфере АПК России - использование и технический сервис машинно-тракторного парка в сельском хозяйстве”. (г. Москва, ГОСНИТИ, 2004 г.), международная конференция ”Автоматизация сельскохозяйственного производства ” (г.Углич, РАСХН, ВНИИМЭСХ (ГНУ ВИМ), 2004 г.), международный экологический симпозиум «Перспективные информационные технологии и проблемы управления рисками на пороге нового тысячелетия» (г.Санкт-Петербург, 1-3 июня, 2000 г.), международная научно-практическая конференция “Актуальные проблемы развития АПК” (г. Волгоград 2005р.), 2-я международная научно - практическая конференция « Научно - инновационная деятельность и предпринимательство в АПК» (г. Минск, 2007г.), XV международная научно-техническая конференция “Технический прогресс в сельскохозяйственном производстве” (с.г.т. Глеваха, 17-18 октября 2007г, 2008г.)

Разработанные электромагнитные технологии и технические средства экспонировались на международной выставке «Урожай - 2004» (г.Мелитополь, 2004); международной выставке «АГРО- 2005»(г.Киев, 14-19 июня 2005), VII Московском международном салоне инноваций и инвестиций (5 - 8 февраля 2007 года, г.Москва).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 28

научных работах, в том числе 1 патенте на изобретение и 1 тезисе доклада на научной конференции.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из вступления, пяти разделов, выводов и приложений. Полный объем диссертации представляет 302 стр., список использованных источников содержит 224 наименований на 21 стр., имеет 70 иллюстраций на 64 стр., 11 таблиц на 9 стр., 5 приложений на 25 стр.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ АКТИВАЦИИ СЕМЯН И ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

1.1 Уровень производства продукции овощеводства защищенного грунта в Украине

Сельское хозяйство Украины переживает в данный момент кризисную ситуацию. Это связано с проведением ряда реформ, рыночными отношениями, сложной экономической ситуацией в аграрном секторе и, как следствие - изменение уровня производительности, сокращение посевных земельных угодий в целом и сооружений защищенного грунта в частности.

В 1990 году в Украине насчитывалось около 800 га стеклянных теплиц и около 2 тыс. га пленочных теплиц. Но после распада СССР, вместе со всей экономикой, тепличное хозяйство страны пришло в упадок. Тепличники потеряли рынки сбыта, спрос на продукцию снизился, оборудование и технологии устарели. Кроме того, с повышением стоимости газа, дали о себе знать энергорасходные технологии отопления сооружений закрытого грунта, что подняло себестоимость тепличной продукции. Работники теплиц столкнулись с еще одной проблемой — конкуренцией со стороны импортной продукции. Эксперты утверждают, что в 1995-1997 годах сохранилось в работающем состоянии не более 20-40% теплиц, которые работали в начале 90-х. Где-то с 1995 - 1997гг намечается позитивная динамика развития тепличного хозяйства [1]. По оценкам экспертов, ежегодный рост площадей защищенного грунта в Украине, в последние 5 лет, был на отметке - 15% ежегодно.

Основу потребления тепличной продукции составляют помидоры и огурцы. По данным официальной статистики, в Украину было импортировано в 2002 году около 420 тонн огурцов, в 2003 - около 220 тонн,

в 2004 -около 150 тонн. Импорт томатов в 2002 году, по данным той же статистики, составлял около 780 тонн, в 2003 - около 240 тонн, в 2004 - около 300 тонн [1]. По разным оценкам, официальный импорт составляет от 2 до 20% того объема томатов и огурцов, что попадает в Украину. В целом, по оценкам участников рынка, можно спрогнозировать, что в страну завозится, по меньшей мере, 7-10 тыс. тонн огурцов и томатов ежегодно.

Общая площадь сооружений закрытого грунта на сегодня составляет 2,5 тыс. га. Средняя урожайность, по данным крупных предприятий, составляет 10-15 кг/м², что на 40 – 50% ниже потенциально возможной [2].

Внедрение в Украине высокоэффективных иностранных технологий выращивания овощных культур требует значительных затрат. Это связано с необходимостью постоянных закупок ирригационных систем, удобрений, субстратов за границей (Голландия, Израиль), что является сложным для большинства предприятий. Многие овощные фабрики даже при высоких урожаях показывают низкий уровень рентабельности. Например, такие предприятия, как Киевская овощная фабрика, Уманский тепличный комбинат и др.

Таким образом необходима реконструкция теплиц с переводом на современный технологический уровень, снижение энерго- и ресурсо- затрат, повышение технологического уровня выращивания овощей с целью увеличения урожайности до 40-50 кг/м².

Для обеспечения высокой рентабельности теплиц необходимо использование высококачественных гибридных семян. Однако их запасы пополняются за счет импорта.

Что касается программы развития растениеводства на 2010 год, то товарные хозяйства будут обеспечены семенами, но в разрезе сортов возникают проблемы с производством сокоплодных - помидоров, огурцов, тыквы, патиссонов и баклажанов. Размещение этих культур и сортов в фермерских хозяйствах не дает возможности получить семена из-за отсутствия технических способов их переработки, сушки и доведения их

до посевных кондиций, в результате чего почти все семенные посевы приходится использовать на товарные цели.

Специализированные семенные хозяйства, где хранилась некоторая специальная техника, не могут обеспечить большое количество сортов и гибридов из-за изношенности, что ставит под угрозу последующее ведение семеноводства овощных и бахчевых культур.

Как показывает опыт стран с развитым аграрным сектором - Канада, Голландия, Дания, перспективным является экстенсивный путь развития овощеводства, который предполагает не только увеличение площадей под выращивание культур, но и увеличение потенциально возможной урожайности этих культур, что возможно лишь при использовании высококачественного семенного материала.

1.2 Анализ существующих методов активации семян

В обширной литературе по технологии подготовки семян агроприем предпосевной обработки различными внешними воздействиями называют активированием прорастания или активацией семян.

Урожайность сельскохозяйственных культур в значительной степени определяется высоким качеством семенного материала, которое зависит от условий формирования семян в период вегетации, своевременной и качественной подготовки в допосевной период.

Известны химические, биологические и физические способы воздействия на семенной материал и вегетирующие растения (рис 1.1).

К химическим методам обработки растительных биообъектов (РБО) можно отнести: обработку посевного материала (семян) регуляторами роста, ингибиторами, микроудобрениями, солями микроэлементов. Обработка вегетирующих растений производится, как правило, при достижении ими фазы кущения, появлении 3-го листа, выхода в трубку (5-6 стадия

органогенеза), стимуляторами роста, ингибиторами и микроэлементами.
Применение в качестве регуляторов роста химических



Рис. 1.1. Методы активации растений.

аналогов фитогормонов (ауксинов, гиббереллинов, цитокининов и т.п.) не получило в настоящий момент широкого распространения в связи со значительной стоимостью их производства [3].

Однако, цитокины и гиббереллины, синтезированные искусственным путем, применяются для обработки РБО в рабочих растворах (РР) крайне малой концентрации (0,001 - 0,005 %). Ими обрабатывают посевной материал с целью снятия состояния глубокого физиологического покоя [3-5]. Обработка растений в фазе трубкования, кущения, в период колошения ретардантами, блокирующими синтез гиббереллинов приводит к повышению устойчивости культур от полегания [6-10]. Наиболее широко применяется в качестве регулятора роста растений гумат натрия, (обработка, как семян, так и вегетирующих растений) в концентрации РР = 0,001 - 0,005 %, дающий прибавку всхожести семян зерновых - от 9 до 12% и овощных культур до 11 % [11].

Отечественной промышленностью освоен выпуск ингибиторов, тормозящих интенсивность протекания ферментативных реакций у семян различных сельскохозяйственных культур и улучшающих их лежкость. В опытных хозяйствах были опробованы и оценены действия следующих ингибиторов: ИМК, 2ХЭФК, Ивин-П, Люцис на клубнеплодах, плодово-ягодных, зерновых, овощных и кормовых культурах [7-9, 10, 11]. Так, препараты на основе янтарной кислоты давали прибавку урожая овощных на 18,2%, при этом отмечалось появление ранних всходов [6,11-14].

Использование в качестве подкормки растений микроэлементов положительно сказывается на урожайности обработанных культур [7,14]. Наивысшие прибавки урожайности дают РР на основе молибдена, меди, цинка, марганца и кобальта - зерновые увеличивают урожайность на 1,4 -3,9 ц/га, овощные до 12 -15%.

Наиболее часто возникает необходимость использовать искусственно синтезированные химические вещества для борьбы, как с семенной инфекцией, так и с болезнями вегетирующих растений. Так, зерновые

культуры, зараженные твердой и пыльной головней, корневой гнилью, пятнистостями и т.п. протравливают и обрабатывают следующими препаратами: фундозолом (80%), байтаном (15%), витаваксом (75%), витаурамом (80%), формалином (40%) [6, 7-9, 10]. В период вегетации, при появлении болезней, используют в качестве основ РР фунгициды: тилт (25%), байлетон (25%), поликарбацин (80%).

Основными недостатками химических средств обработки, как семян, так и вегетирующих растений является низкая экологическая чистота химических препаратов, их способность накапливаться в биомассе растения и влиять на генетическую структуру РБО [3-10]. Кроме того, в состав некоторых стимуляторов и гербицидов входят соли тяжелых металлов, не разлагающиеся в природных условиях и попадающих в организм человека и животных, приводя к интоксикации и хроническим заболеваниям [3-5,15].

К химическим методам обработки семян и растений можно отнести и биологические методы стимуляции ростовых процессов у РБО, на основе искусственно синтезированных веществ - витаминных экстрактов на основе витаминов группы «В» (пантотеновая кислота, тиамин, биотин, инозит), полипептидов и аминокислот (белкозин) [9], гидролитических ферментов [7,8].

Одним из новейших направлений является использование в качестве стимуляторов ростовых процессов препаратов на основе продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, грибов, суспензий бактерий, повышающих урожайность зерновых и кормовых культур до 10% (Биоэнергия, Никофан, Симбионт-универсал, Фузикоцин, активаторы прорастания семян, фотосинтеза, почвенной микрофлоры) [5].

Для защиты РБО от болезнетворных бактерий, микроорганизмов и насекомых применяют бактериальные средства защиты, созданные на основе кристалло образующих бактерий группы *Bacillus thuringiensis*: битоксибациллин (БТБ), гомелин, дендробациллин, лепидоцид,

этнобактерин, имеющих среднюю биологическую эффективность при сборе урожая 80 - 95% [3,5].

Главное отличие бактериальных препаратов от химических заключается в меньшей степени их воздействия на окружающую среду, благодаря биологическому происхождению, они намного быстрее инактивируются.

К недостаткам биологических средств обработки можно отнести затруднения в определении наиболее оптимальных доз внесения препаратов как в семенную массу (предпосевная обработка семян), так и процентной концентрации РР при опрыскивании вегетирующих растений. Кроме того, ряд биологических препаратов обладает аллергенным действием [6-8].

Наиболее распространенными недостатками, которыми обладают химические и биологические методы обработки РБО :

- дополнительные мероприятия при обработке посевного материала (промывка и просушка) [5,8-10];
- длительность обработки (от нескольких часов до суток и более) [11-13];
- инерционность действия (эффект от воздействия наступает через несколько часов или суток) [10];
- отсутствие оптимально выверенных доз внесения препаратов [3,14];
- значительная стоимость производства [5, 16-19];
- низкая экологическая чистота некоторых препаратов [16-20];
- низкая экологичность процесса производства препаратов [3, 8, 10];

Использование сложного специализированного, не всегда эффективного [15,20,21] оборудования по внесению химических и биологических веществ стимуляции ростовых процессов и защиты растений, а также значительные трудовые и экономические затраты являются главными факторами, тормозящими широкое применение данных методов в растениеводстве.

Отечественными и зарубежными исследователями к настоящему моменту разработано большое количество способов и методик обработки РБО физическими способами воздействия с целью активации внутриклеточных процессов, как в семенах, так и непосредственно в вегетирующих растениях [22-24]. К физическим методам обработки РБО можно отнести: термические, физико-механические, фотоэнергетические, радиационные, магнитные и электрофизические.

Термические методы воздействия применяются к семенам различных сельскохозяйственных культур с целью повышения их всхожести и снижения их зараженности патогенной микрофлорой. К данному виду воздействия можно отнести гидротермическую обработку семян и стратификацию (выдерживание семян при постоянной температуре в течение длительного периода). Термические методы воздействия относятся к длительным способам обработки семенного материала, обеспечивающим увеличение всхожести и силу роста. Благодаря термической обработке семян (1-2 часа при температуре в 70 - 80°C снижается их зараженность вирусной инфекцией - фимозом, бактериозом, альтернариозом [9].

Обработка подогретым паром с температурой 150°C значительно повышает всхожесть семян за счет воздействия на связанные цитокины [3]. Главным недостатком термического метода воздействия является длительность обработки посевного материала (от нескольких часов до нескольких месяцев [25]). Этот способ обработки является весьма энергоемким, и многоступенчатым (в случае гидротермической обработки)

Физико-механические методы затрагивают предпосевную обработку семенного материала способами барботации в водной среде воздухом или кислородом при нормальной физиологической температуре семян в 18–20 °C. Этот способ повышает проницаемость семенной кожуры для дальнейшего влагопоглощения [26-28], приводя к увеличению всхожести (в начальный период). Однако, несмотря на простоту цикла обработки, данный способ весьма длителен (несколько часов) и трудно контролируем - для

снижения травматического эффекта у проростков, необходимо своевременное определение проклюнувшихся семян визуальным способом [27, 28]. Особые требования при барботировании предъявляются к оборудованию - повышенная надежность, автоматический контроль, взрыво- и пожаробезопасность (работа с O_2).

Опыты по обработке семян ультразвуком проводились множеством исследователей [25, 29], отмечающих неоднозначность влияния звуковых колебаний на внутриклеточные процессы, проходящие в семени [29]. Значительная стоимость оборудования, источников ультразвуковых колебаний отодвигают по значимости данный метод в разряд весьма дорогостоящих.

Стратификацию и озонирование тоже можно отнести к физико-механическим методам обработки. Первую обычно сочетают с т.н. «гидравлическим ударом», приводящим к механическому пробою семенной кожуры [30]. Озонирование же эффективно обеззараживает семена перед посевом и основано на использовании бактерицидного действия ионизированного озона (O_3), что позволяет уменьшать зараженность в 2,7 раза и увеличивать урожайность на 16,6 % [31-32].

Фотоэнергетические методы обработки стимуляции ростовых процессов применимы как к семенному материалу, так и к вегетирующим растениям. Воздействие импульсным сфокусированным солнечным светом [33-34] на семена дает прибавку урожая до 11 % , на вегетирующие растения - увеличение интенсивности протекания фотосинтетических процессов [34]. Максимальный прирост урожая составляет 17,6% для овощных культур [35].

Применение источников искусственного сфокусированного света ИК- диапазона длин волн [27,28] и импульсного ВЧ электрического света показало неоднозначность реакции РБО на различные дозы светового потока. Однако в целом положительный эффект от обработки наблюдается в повышении всхожести [12-15,34] и ускорении фотосинтетических процессов. Это проявляется в увеличении выхода O_2 с листовой пластины.

Существует объяснение эффекту воздействия сфокусированного светового потока - влияние на потенциал внутриклеточных мембран и на их пропускную способность [35]. Кратковременная и повторно-кратковременная обработка РБО сфокусированным УФ- излучением дает прибавку урожайности зерновых культур в 10-15% [34,35].

К фотоэнергетическим методам относят и лазерную обработку посевного материала и вегетирующих растений [21,36-38]. Квантовые генераторы обладают такими преимуществами как: хорошая регулируемость параметров световых волн, мощности излучения, широкие пределы возможной концентрации энергии (от млрд. Вт/см² до мкВт/см²), способность замедлять или ускорять биохимические и физиологические процессы на клеточном уровне. Облучение семян овощных культур лазерным излучением малой интенсивности до 0,4 мВт/см² позволяет увеличить урожайность до 11 -12% [21,39], а зерновых культур - приводит к увеличению всхожести на 19% , а энергии прорастания - на 30 - 31% [21]. Обработка растений может вестись по принципу сканирования фотосинтетически активной поверхности (листовой пластины, стебля). Максимальный эффект стимуляции был достигнут при использовании лазерного излучения средней периодичности импульсов. Квантовые генераторы обладают следующими преимуществами - небольшой массой (до 10 кг), компактностью, низкой энергоемкостью ($P_{\text{потр.}} = 150 \text{ Вт}$), они просты и надежны в эксплуатации. Главным их достоинством является экологическая чистота обработки. Растения, прошедшие обработку лазерным излучением отличаются повышенной устойчивостью к болезням, ускоренным ростом, более высокой продуктивностью [21,37-38]. Созданные на базе лазерных установок (с выходной мощностью в 90 - 110 мВт) промышленные линии по предпосевной обработке семян имеют производительность по зерновым до 300 - 500 кг/ч [36].

Радиационные методы облучения РБО источниками ионизирующих излучений и изотопами давно проводились как отечественными, так и

зарубежными учеными и исследователям с целью выяснения реакции растений на внешнее стрессовое воздействие и при изучении метаболических и фотосинтетических процессов [27,39]. Целенаправленное облучение семян и вегетирующих растений позволило установить факт повышения всхожести и прибавки урожайности [39-41].

Результаты исследований говорят о незначительной прибавки урожайности при облучении γ - лучами семян и растений [27,42]. Конструктивные особенности установок по обработке РБО ионизирующими излучениями и изотопами не позволяют широко использовать их в качестве оборудования в сельскохозяйственном производстве, так как их эксплуатация сопряжена с повышенным риском радиоактивного заражения, как облучаемого объекта, так и обслуживающего персонала.

Магнитные методы обработки - представляют собой воздействие на семена и вегетирующие растения внешним постоянным магнитным полем (ПМП) различной напряженности с целью повышения проницаемости мембран клеточных структур, влияния на мембранный потенциал и ускорения ферментативных реакций [22,42]. Семена, прошедшие обработку в постоянном магнитном поле заметно улучшают всхожесть, а вегетирующие растения становятся более жизнеспособными и устойчивыми к изменению внешних погодных условий.

Импульсные магнитные поля по своему действию на РБО аналогичны действию постоянных магнитных полей, разница состоит во времени обработки (на порядок ниже) [43].

В последние годы появилось множество публикаций об использовании т.н. «живой» или магнитообработанной воды - воды, прошедшей обработку в поле постоянного магнита и длительное время сохраняющей в своей структуре биологически активное молекулярное соединение - «мерцающие кластеры». Увлажнение посевного материала и поливка вегетирующих растений магнитоактивированной водой дает увеличение энергии прорастания до 3-8% и прибавку урожайности до 16% [43-

45]. В связи с тем, что неясным остается механизм воздействия, данный прием обработки слабо изучен теоретически, но нашел широкое практическое применение в частном секторе (насадки, магнитные активаторы и т.п.). В сельскохозяйственном производстве способ обработки воды и питательных растворов в полях постоянных магнитов не обрел массового применения.

Методы внешнего воздействия на РБО, связанные с использованием переменных электрических полей являются самыми распространенными на сегодняшний день и позволяют создавать новые технологии, обладающие максимальной биологической и экономической эффективностью.

1.3. Электромагнитные технологии в растениеводстве

В сельскохозяйственном производстве электротехнологии направлены преимущественно на стимуляцию метаболических процессов в растительных биологических объектах с целью повышения их урожайности и качества.

Традиционно, первыми электротехнологиями были технологии, связанные с применением постоянных электрических и магнитных полей. Обработка семян в электростатических или коронных полях с электрической напряженностью (150...900) кВ улучшает их всхожесть на 15...20%, а энергию прорастания в 2...3 раза по сравнению с необработанными семенами. Максимальный стимулирующий эффект проявляется через 2 недели после обработки, а затем медленно убывает [46].

Электрические поля с высокими напряженностями 100...200 кВ/м используются и для воздействия на зеленые корма, выращиваемые на гидропонике [47]. Их действие увеличивает выход биомассы на 12...15% с сохранением биологической ценности корма. При обработке семян в поле коронного разряда отмечено увеличение урожая пшеницы на 5...17,5%. При обработке семян в поле коронного разряда отмечено увеличение

урожайности пшеницы на 5-17% [46,48]. Зеленой массы лука репчатого - на 12...38% [49]. Картофеля - на 5,4...21,6% [50-52]. Отмечены положительные результаты в улучшении роста, повышении урожайности и ускорении сроков созревания культур при воздействии электрических полей непосредственно в период их выращивания [49]. Имеет место влияние магнитных полей на всхожесть, развитие и урожайность хлопчатника, ржи, овса, пшеницы [53,54].

Установлено также, что действие ЭМП на семена и растения приводит не только к количественным изменениям, но и к качественным. Электрообработка клубней картофеля позволила повысить крахмалистость на 0,6...1,2% и увеличить содержание в клубнях аскорбиновой кислоты на 0,2...0,7 мг [51].

Особое внимание уделяется использованию электрических и магнитных полей для получения генетических эффектов на растениях [49]. Так, при электрообработке клубней картофеля было установлено, что приобретенные качества закрепляются и передаются потомству [50-53]. В опытах с чесноком, семенами и проростками гороха также были установлены хромосомные aberrации [51].

Исследования по воздействию электромагнитных полей высокой частоты (ВЧ), сверхвысокой частоты (СВЧ) и крайневой частоты (КВЧ) на семена и растения показывают, что при определенных параметрах воздействующего поля они могут стимулировать рост и развитие растений [55,56]. Приведенные исследования по предпосевной обработке семян кукурузы, подсолнечника, пшеницы, ячменя электромагнитными полями на различных частотах показали, что при последующем проращивании этих семян всхожесть и энергия прорастания возрастает на 10...20% по сравнению с контрольными образцами [57-59].

Отмечено, что растения восьми сортов озимой пшеницы, выращенные из обработанных семян электромагнитным полем КВЧ диапазона, взошли на несколько дней раньше контрольных, имели более

высокую всхожесть, преимущество по кустистости, выходу в трубку, колошению, цветению, вегетативной массе и по урожайности [54-58].

Предпосевная обработка семян озимой пшеницы электромагнитным излучением высокой энергии (мощность 1,5 кВт) на частоте 2,45 ГГц позволила получить прирост урожая от 3 до 7 ц/га. Растения из облученных семян раньше контроля вошли в трубку, заколосились, зацвели, набрали большую вегетативную массу и дали более высокий урожай [59].

На семенах озимой пшеницы была выяснена длительность биостимулирующего эффекта после обработки их СВЧ энергией. По истечении 5 месяцев после обработки семена не ухудшили свои новые посевные качества. Полученные результаты свидетельствуют о том, что сверхвысокочастотную предпосевную стимуляцию семян зерновых культур можно проводить задолго до их посева [59]. Заметная прибавка урожая пшеницы была достигнута при достаточно высоких показателях контроля (42,4...68,7 ц/га), что свидетельствует о чрезвычайной актуальности использования ЭМП для увеличения валовых сборов зерна [60].

Как показали полевые исследования, наиболее отзывчивы на электромагнитные поля СВЧ и КВЧ диапазонов следующие культуры: зернобобовые (до 21%), крупяные (до 20%), масленичные (до 18%) и злаковые (до 20%) [57-60]. Так, например, при предпосевной обработке семян гречки электромагнитным полем СВЧ диапазона ее урожай повышается на 15-20%. Растения из таких семян имеют преимущество перед контролем по полевой всхожести, высоте, вегетативной массе стеблей, листьев, корневой системы и др. Они раньше зацветают и созревают. При этом, для прибавки урожая не требуется каких-либо дополнительных затрат на удобрения, орошение, более высокую агротехнику. Предпосевная обработка семян гороха ЭМП СВЧ диапазона способна повысить его урожай на 15-20%. Кроме того, как показали исследования, растения гороха, выращенные из обработанных семян, более устойчивы к заражению семян опаснейшим вредителем этой культуры – гороховой зерновкой [60,61].

Представляется возможным за счет СВЧ энергии «доводить» некондиционные по всхожести семена до кондиционных, что имеет большое практическое значение. Это обусловлено тем, что сохраняются семенные ресурсы, укрепляется экономика хозяйств за счет исключения финансовых убытков от потери всхожести семенного материала [49].

В работе [55] показано, что под действием СВЧ излучения на частоте 2,45 ГГц происходит активизация биохимических процессов в период прорастания семян и вегетации растений. В семенах подсолнечника сортов «Прометей» и «Казачий» отмечено повышение белка до 105-108% от контрольных величин. При изучении корнеплодов сахарной свеклы, выращенных из обработанных электромагнитным полем семян, отмечено повышение содержания в них углеводов до 109,2%, витаминов В1, В2, В6 на 105,9...112,3%, каротиноидов на 113,1%.

При анализе данных по ряду биохимических показателей, полученных после обработки семян гороха сорта «Интенсивный-92», привлекает внимание повышение содержания белка, что составило 104% и 105% по сравнению с контролем. Максимальное повышение углеводов составило 104% по отношению к контрольной группе. Относительно содержания жиров, следует отметить незначительные колебания их уровня при различных режимах обработки. Содержание витаминов и минеральных веществ в семенах гороха, под влиянием ЭМП, существенно не изменялось, а содержание аминного азота снизилось [62]. Изменение соотношения концентрации белков и аминокислот может являться свидетельством того, что под влиянием электромагнитного поля с определенными технологическими параметрами происходит интенсификация процессов синтеза белка и, возможно, изменение состояния процессов протеолиза. Содержание сульфгидрильных групп в исследуемых образцах семян повышается, достигая 105% по сравнению с контролем. Отмеченные изменения свидетельствуют о стабилизации функциональных групп белковых веществ.

В семенах под влиянием миллиметрового ЭМП заметно повышается активность ферментов лактатдегидрогеназы, кислой фосфатазы и глюкозофосфатдегидрогеназы.

Результаты биохимических исследований урожая семян гороха сорта «Орловчанин элита» и «Орловчанин суперэлита», выращенных из обработанных семян и необработанных, свидетельствуют о выраженном влиянии ЭМП как на уровень основного компонента зернобобовых – белка, так и на содержание эссенциональных компонентов, а также активность исследуемых ферментов [57,60].

При исследовании уровня минеральных веществ в семенах зернобобовых культур при обработке их ЭМП СВЧ диапазона было выявлено повышение уровня сульфатов, хлоридов и таких эссенциальных компонентов, как витамины. В образцах гороха сорта «Орловчанин элита» отмечено наиболее высокое накопление таких витаминов, как В1, В2, РР и каротина.

Предпосевная обработка семян овощных культур: огурцов, кабачков, петрушки, капусты ЭМП на частоте 2,45 ГГц (мощность 1,5 кВт) позволяет получить увеличение их урожайности в среднем на 10-13% [62]. Незначительное повышение урожайности можно объяснить тем, что для овощных культур необходимо применять ЭМП с определенными технологическими параметрами (частота, мощность, экспозиция).

Анализ зависимости всхожести семян, энергии прорастания, интенсивности дыхания, качества и количества урожая от параметров воздействующего ЭМП показывает, что наряду с энергетическим существует и информационное взаимодействие ЭМП с биологическими системами. Опыты, проведенные как с растениями, так и с животными, показывают, что характер реакций организмов на ЭМП зависит не только от величины электромагнитной энергии, но и от модуляционно-временных его параметров. Причем, реагирование биообъектов увеличивается с

уменьшением мощности ЭМП, а иногда вообще не возникает при достаточно высоких значениях энергии ЭМП [63-68].

Изучение действия СВЧ излучения миллиметрового диапазона на различные биологические системы позволило установить, что биологическое действие этого вида излучения основано на резонансном характере воздействия и избирательно для различных биологических систем [66-71].

Например, в работе [67] показано, что при облучении сине-зеленых водорослей низкоэнергетическим ЭМП прирост биомассы составил в эксперименте 47% по отношению к контролю. При этом следует отметить, что увеличение экспозиции вызывает уменьшение стимулирующего эффекта, а именно: при экспозиции 2 часа этот показатель составляет менее 16% к контролю. Двенадцатичасовая экспозиция в эксперименте приводит к снижению биомассы на 70% по отношению к контролю.

В опытах с соей было установлено, что облучение семян ЭМП с технологическими параметрами: частота 42,2 ГГц; плотность потока мощности 15 мкВт/см²; экспозиция 10 мин; относительная нестабильность частоты генератора 10⁻⁷; круговая поляризация с правой циркуляцией вектора электрической напряженности ЭМП, приводит к хромосомным aberrациям на 11%, всхожести на 10-15%, содержанию азота в листьях сои на 7%, урожай на 31% по сравнению с контролем (необлученные семена) [68].

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что в последнее время в нашей стране и за рубежом появились многочисленные публикации, касающиеся воздействия низкоэнергетических ЭМП на биологические объекты. Только с 1990 года состоялись многочисленные международные симпозиумы, посвященные самым различным аспектам этой проблемы [65,66]. Одновременно проводятся научно-исследовательские работы данного направления и зарубежными центрами, причем наблюдается

тенденция к засекречиванию целого ряда направлений по изучению воздействия не только на растения и животных, но и человека [72-74].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для получения полезных изменений в биологическом объекте необходимо находить такую структуру внешнего ЭМП (частота, мощность, экспозиция, поляризация и т.д.), которая приводила бы к желаемому эффекту. Например, увеличению урожайности и выведению новых сортов зерновых и овощных культур, лечению животных, увеличению объема и качества тканевых структур в ветеринарии, борьбе с вредными насекомыми сельского хозяйства.

Однако следует отметить, что эффективное использование низкоэнергетических ЭМП КВЧ диапазона невозможно без разработки физико-математических моделей, учитывающих параметры воздействия ЭМП и электрофизические характеристики сельскохозяйственных объектов, без создания специализированных высокостабильных источников излучения, без применения устройств поиска оптимальных технологических параметров электромагнитного поля.

1.4 Анализ информационных процессов в биологических объектах под влиянием внешних электромагнитных полей

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет, проводимые в ФРГ институтом М. Планка, в Италии - Миланским университетом; в США - университетскими центрами Майами, Калифорнии; Нью-Йорке, в России - ИРЭ РАН под руководством Н. Девяткова, Ю. Гуляева, А. Девяткова, в Московском институте им. Гарячкина - под руководством И. Бородина, в Челябинском ИМЭСХе - Ф. Изакова, в Тульском ГУ - Е. Нефедова; в Киевском НАУ под руководством И. Мартыненко Г. Иноземцева, Л. Червинского; в Харьковском НТУСХ под руководством Л. Кучина, А. Черенкова, А. Черепнева, и др. свидетельствуют, о том что зависимость

метаболических процессов в биологических объектах от действия низкоэнергетических ЭМП связана с наличием информационных процессов на основе ЭМП.

Биологическое действие низкоэнергетических КВЧ - излучений отчетливо выражено на клеточном и организменном уровне и связано с резонансным характером поглощения электромагнитных излучений [75-83].

Изучение информационно - резонансных процессов в биологических объектах под влиянием ЭМП необходимо начать с обсуждения особенностей процесса управления этими объектами. При этом следует учитывать, что любой биообъект природы, в том числе и на клеточном уровне, представляет собой сложную систему. Такие системы состоят из огромного числа взаимосвязанных элементов.

В качестве научных предпосылок для анализа обменных процессов в биообъектах, находящихся под воздействием внешних ЭМП, используются следующие основные положения:

- семена являются сложными биокибернетическими системами, многообразие состояний должно отвечать многообразию воздействия внешней среды;
- исследуемый объект (семя) является гибкой системой, приспособленной к изменениям внешней среды;
- существуют такие воздействия внешней среды, отличающиеся по качественным и количественным признакам (резкопеременные, экстремальные, закритические, "ложные"), на которых следует ожидать ответную реакцию биологического объекта.

Характер и свойства внешних воздействий на биологический объект определяются свойствами среды, окружающей его, который адаптирован к этим воздействиям. Отсюда следует, что у биосистем действует принцип адекватности максимальной сложности биообъекта максимальному разнообразию внешних воздействий [84-90], что также означает наличие множества ответных реакций биообъекта на множество внешних воздействий. Это положение иллюстрируется на рис. 1.2.

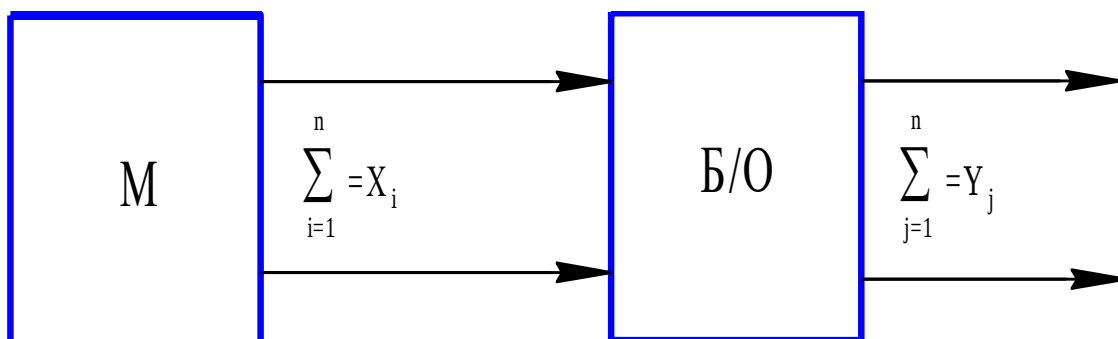


Рис. 1.2. Схема внешних воздействий окружающей среды на биологический объект:

М - среда;

Б/О - биологический объект;

X_i - внешние воздействия, в том числе и ЭМП;

Y_j - ответная реакция биообъекта;

n - число внешних воздействий;

m - число реакций биообъекта на внешние воздействия.

Многообразие и характер возмущающих воздействий среды можно проанализировать с помощью теории академика В.И.Вернадского и его последователей. Согласно этой теории биосфера в виде тонкой пленки захватывает атмосферу, гидросферу и литосферу. Биосфера - это единый живой организм, получающий энергию из космоса и возмущающие воздействия со стороны атмосферы, гидросферы и литосферы

Используя глобальный синтетический подход этой теории, среду, окружающую семя, можно представить, в виде взаимодействующих между собой систем, оказывающих влияние на него. Очевидно, что внешняя среда, представленная на рис. 1.3 в виде взаимодействующих между собой сфер, будет объектом воздействия со стороны космоса. На рис. 1.2 не показаны обратные реакции семени на элементы среды в силу их ничтожного влияния. Однако биологические объекты, в целом являясь частью биосферы, оказывают уже существенное влияние на элементы среды, представляющие собой экологическую систему, что отражено на рис. 1.3 взаимосвязями В с А, Н и L.

Анализируя схему (рис. 1.3), можно сказать, что по каждому из четырех внешних каналов на семя передается по несколько основных возмущающих воздействий, например, климатические воздействия (температура, свет, влажность), влияние газового состава атмосферы (кислород, углекислый газ), воздействия минеральных и органических веществ литосферы, космические излучения и т.д. Достаточно остановиться только на восьми внешних воздействиях, чтобы показать, как сложен биологический объект (семя растений).

Для анализа особенностей воздействия внешних ЭМП на семена растений воспользуемся следующими общими принципами:

а) Принцип системно-структурной организации объекта. Этот принцип отразится в методике системного подхода к исследованию объекта, который заключается в том, что он ориентирует на раскрытие и познание сложного целостного процесса, как жизнедеятельности системы его механизмов, так и на познание общего функционирования объекта через частные функциональные связи и критерии их функционирования. Этот принцип в биологическом объекте и его модели реализуется иерархической системой управления.

Методологический принцип ориентирует на раскрытие автономности биологических систем нижних уровней иерархии при реализации ими

частных физиологических функций и определение их подчиненности при отработке команд верхних уровней для обеспечения общих функциональных отправлений организма (семени).

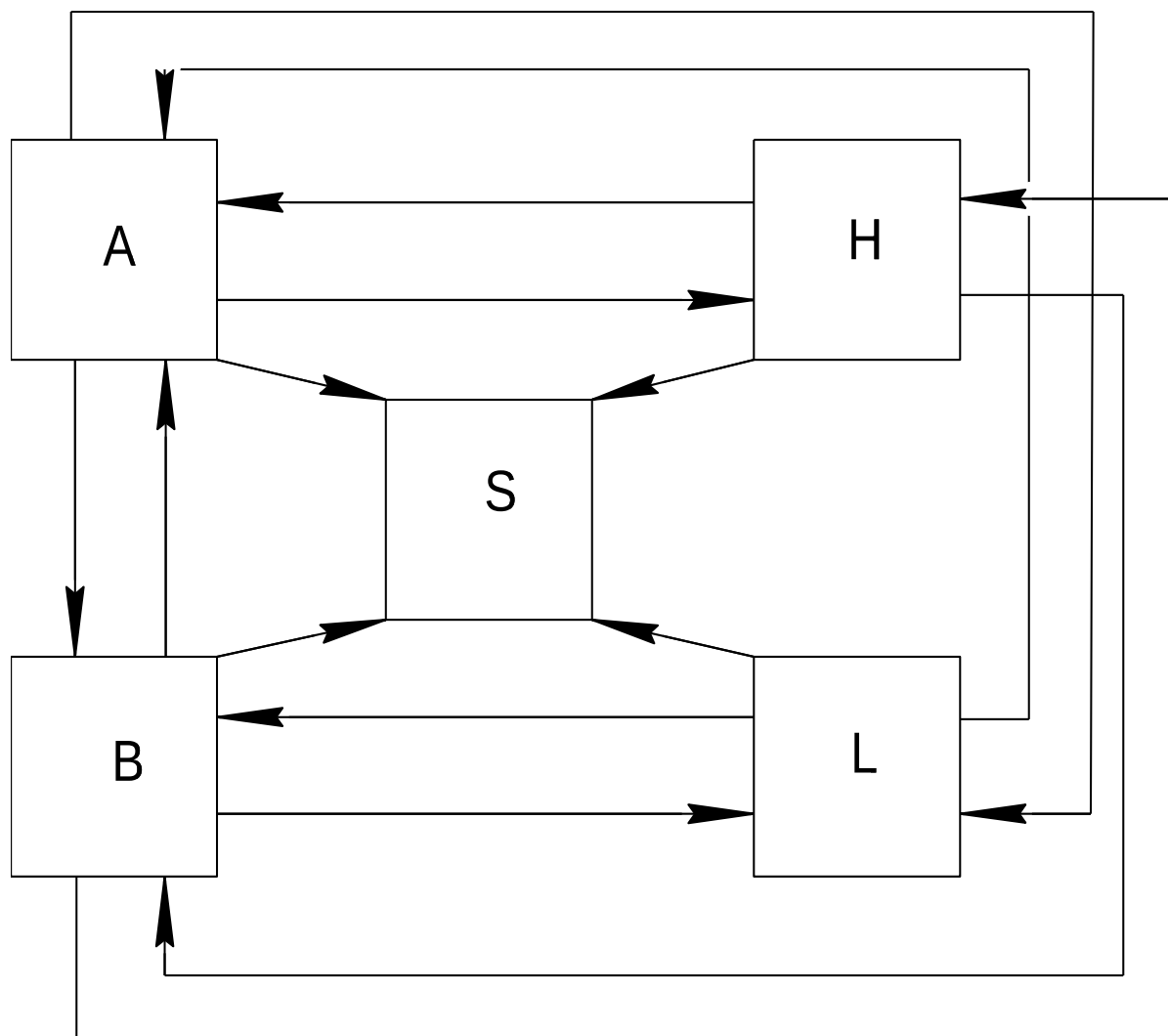


Рис. 1.3 Схема связей внешних воздействий и семени:

А – атмосфера;
 Н – гидросфера;
 L – литосфера;
 В – биосфера;
 S – семя.

б) Принцип обратной связи. Этот принцип помогает выяснить структуру и реализацию обратных связей на отдельных уровнях иерархии и обратных связей от нижних уровней к верхним и высшему. Он обуславливает, например, идею проведения эксперимента на живом семени с механически удаленным зародышем, поскольку алейроновый слой зерновки состоит из живых клеток. При такой операции можно исследовать специфическое физиологическое функционирование периферийных систем в отсутствии обратной связи с высшим уровнем.

в) Принцип сенситизации и передачи информации. Принцип методологически ориентирует на исследование механизма получения информации внешними рецепторами, ее передачи от системы к системе на различных уровнях внутренними рецепторами, а также на изучение непосредственных носителей такой информации (гормонов, ферментов, и других белковых тел) в семени. Используя понятия сигнатур, двужначности и эквивокации по теории информации можно уяснить принцип "гормон-рецепторного" взаимодействия физиологических процессов, обеспечивающих устойчивость фенотипа.

г) Принцип кодирования, считывания и передачи генной информации. В ряде новейших исследований, базирующихся на основных положениях биоэнергетики, подтверждается положение об электромагнитной передаче генной информации. Концепция волновой природы передачи генной информации предполагает, что взаимодействие ЭМП с биообъектами связано с механизмом переключения генной активности, который является важнейшим в процессе жизнедеятельности. Любые клетки одного и того же биологического объекта содержат одинаковый набор фрагментов ДНК, а функционально морфологическое разнообразие клеток биологического объекта объясняется тем, что в разных клетках включены (активированы) или выключены (репрессированы) разные гены. Активизация генов происходит под воздействием электромагнитных сигналов из цитоплазмы и клеточного окружения. Раскрытие этого принципа позволяет установить,

как обеспечивается устойчивость наследственности организма, как составляются, хранятся, тиражируются (считываются) и передаются такие программы, необходимые для обеспечения устойчивости генотипа.

д) Принцип специфичности реакций организма на различные внешние воздействия и их сочетания. Руководствуясь этим принципом можно определить оптимальные внешние воздействия на семя по различным критериям оптимальности (в том числе и по быстродействию, необходимому для разработки экспресс - методов анализа).

е) Принцип структурной изменчивости низших микроуровней. Принцип позволяет изучить механизм реакции объекта на различные внешние стационарные и нестационарные воздействия. Опираясь такими понятиями, как унификация, универсальность и взаимозаменяемость элементов систем микроуровней, можно будет уяснить, каким образом происходит перестройка системы (семени) и почему организм может быстро реагировать на неустановившиеся внешние воздействия.

Исследование структуры физиологических взаимосвязей целесообразно начинать с рассмотрения физиологических функций организма (дыхания, обмена веществ, возбудимости и др.), которые распознаются по внешним признакам проявления жизнеспособности организма и реализуются на его макроуровнях функциональной структуры (органо и организменном). Однако, при этом неизбежно обращение к микроуровням функциональной структуры (молекулярному и клеточному) для уяснения механизма действия функциональной системы организма.

Таким образом, в структурной модели физиологических взаимосвязей семенника целесообразно выделить четыре уровня по принципу их подчиненности:

- организменный макроуровень;
- органнй макроуровень;
- клеточный микроуровень;

- молекулярный микроуровень.

На макроуровнях проявляются основные физиологические процессы семян: дыхание, обмен веществ, поведенческие аспекты жизнедеятельности (покой, активация, возбуждение). Микроуровни обеспечивают функциональные взаимодействия субстратом, энергией, биологическими катализаторами (ферритами) и гормонами, являющимися белковыми элементами регуляторов клеточных процессов. Главным строительным материалом клетки являются белки (линейные полимеры), которые состоят из 20 типов стандартных мономеров - аминокислот. Из аминокислот на микроуровнях собираются многие тысячи разнообразных биологических устройств, ферментов, гормонов, трансформаторов энергии, защитных блоков (антител и интерферонов). В клетках семян хранятся гарантийные запасы "топлива" в форме крахмала. Все эти синтезируемые вещества могут снова разбираться и вновь собираться в различных сочетаниях. При этом сохраняются неизменными только аминокислоты, являясь унифицированным "строительным блоком".

Высший микроуровень материализуется зародышевой осью и ее функциональными связями с низшими уровнями. Назовем его центральным уровнем управления организмом. Высший макроуровень содержит всю генотипную информацию (информацию наследственности, закодированную в ДНК и содержащуюся в хромосомах клеточных ядер) и фенотипическую информацию, зависящую от генотипической информации, внешней информации и внутренней информации организма при помощи внешних и внутренних рецепторов и передаваемой с помощью гормонов - рецепторного воздействия.

Подчиненный нижестоящий макроуровень, его назовем периферийной системой управления физиологическими процессами (ПУ) материализуется органеллами (органами) алейронового слоя семени, так как других аналогичных частей, проявляющих признаки жизнедеятельности, в семеннике не существует. Попытки найти белок - синтезирующий аппарат,

включающий ДНК, РНК и рибосомы, в эндосперме семян не увенчались успехом. Периферийная система управления руководит синтезом функциональных белков и разложением запасных белков на аминокислоты.

Клеточный уровень (КУ) является "рабочим цехом", где размещены машины, собирающие по командам с высших уровней функциональные белки (ферменты, гормоны, антитела и др.) и демонтирующие запасные и ненужные организму функциональные белки на унифицированные блоки (аминокислоты), являющиеся строительным материалом для синтеза необходимых организму белков.

Молекулярный уровень (МУ) завершает подчиненность в иерархической системе управления физиологическими процессами семян. Этот уровень является материальным складом, располагающим "топливом" молекулы - крахмалом и жирными кислотами, для процессов ступенчатого биологического окисления с превращением энергии химических связей этих молекул в энергию связей универсального биологического источника энергии - аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ).

Современный анализ биохимических, биофизических и физиологических процессов в клетках биообъектов основан на том, что основным носителем в митохондриях клетки является АТФ [91].

Учитывая, что основой всех информационных обменов в ноосфере является электромагнитное поле, следует согласиться с гипотезой, согласно которой в клетках процесс биологического окисления завершается не созданием АТФ, а созданием высокочастотного ЭМП и ионизирующего протонного излучения, которые в своем неразрывном единстве и составляют энергонасыщенное биополе клетки.

Протонное излучение в живой клетке используется для передачи квантовых взаимодействий с ядрами атомов, причем несущие информацию протоны отражают специфические спектры белковых молекул [92, 93].

Поскольку протон, как элементарная частица, может ускоряться только в КВЧ ЭМП, то следует полагать, что в митохондрии каждая

молекула цитохрома (железосодержащий белок) является точечным источником КВЧ излучения, которые сливаются между собой, синхронизируются и дают эффект резонанса. Среди многих сотен реакций, запускаемых гидролизом АТФ, следует отметить реакцию синтеза биологических молекул, активный транспорт ионов через клеточные мембраны, а также реакции, обуславливающие колебания заряженных клеток мембран.

Макромолекулы, образующиеся в биосинтетических реакциях, переносят информацию, катализируют специфические реакции и организуются в исключительно упорядоченные структуры, как в клетке, так и во внеклеточном пространстве.

Новейшие исследования подтверждают положения и об электромагнитной основе передачи генной информации [91, 92]. Есть все основания полагать, что взаимодействие ЭМП с биообъектами связано с механизмом переключения генной активности, которая является важнейшим в процессе жизнедеятельности. Любые клетки одного и того же биологического объекта содержат одинаковый набор фрагментов ДНК, а функционально морфологическое разнообразие клеток биологического объекта объясняется тем, что в разных клетках включены (активизированы) разные гены. Активизация генов происходит под воздействием сигналов из цитоплазмы и из клеточного окружения. Этот сигнал имеет электромагнитную природу [91]. Между ядром клетки и клеточной оболочкой, заряженных разнополярно, находятся микроскопические магнетики-вибраторы, которые способны к резонансному приему и к индукции ЭМП. Электромагнитные поля отдельных молекул могут складываться и образовывать общее ЭМП данного вида молекул также под воздействием внешнего ЭМП, частота которого будет совпадать с частотой вибратора, определяющего вид гена. Эти резонансные частоты, как показывают расчеты, лежат в КВЧ диапазоне длин волн [92-95].

Структуру биологического поля клетки можно рассматривать и с точки зрения основных понятий радиофизики [91,96-99]. Предполагается, что в основе информационного влияния ЭМП лежит синхронизация в КВЧ-поле колебаний осциллятора с собственными частотами $0,5 \cdot 10^{10}$ Гц.

Исходным является предположение о том, что в живом организме и при отсутствии внешнего воздействия все или некоторая часть колебательных степеней свободы определенных биоструктур находятся в режиме автоколебаний, поддерживаемом энергией метаболизма. Действие внешнего электромагнитного излучения связано не с возбуждением автоколебаний в биоструктурах, а с изменением тех или иных характеристик уже существующих в живом организме автоколебаний, в частности, с изменением их спектра.

Любая биоструктура (молекулы белка, участки клеточных мембран и т.п.) представляет собой с колебательной точки зрения нелинейную систему с большим числом степеней свободы. Временные и спектральные характеристики автоколебаний в таких системах, как и их реакции на внешнее воздействие, могут быть весьма сложными и разнообразными. Чтобы разобраться в закономерностях такого воздействия, целесообразно, по возможности, исходить из простых моделей. Допустим, например, что автоколебания на СВЧ возникают в участках липидного остова мембраны, отделенных друг от друга крупными белковыми молекулами. Таких участков на всей поверхности мембраны, площадь которой для одной клетки составляет несколько квадратных микрон, может быть множество. Близким по структуре участкам мембран данной клетки или соседних с ней идентичных клеток соответствуют наборы нормальных колебаний с почти идентичным спектром. Поскольку различные участки мембран взаимодействуют между собой (в частности, благодаря значительным дипольным электрическим моментам), между нормальными колебаниями с близкими частотами существует слабая связь. Простейшей моделью такой структуры может служить совокупность большого числа элементарных

автогенераторов (осцилляторов), слабо связанных между собой. Всю совокупность можно разбить на несколько групп, в каждой из которых, соответствующей одному из нормальных колебаний, автогенераторы почти идентичны. Взаимодействие между автогенераторами различных групп, если их частоты не находятся в рациональном отношении друг к другу, пренебрежимо мало. В пределах каждой группы отдельные автогенераторы либо колеблются независимо друг от друга, если связь между ними слаба, а расстройка их собственных частот слишком велика, либо при достаточно близких частотах автоколебаний имеет место их взаимная синхронизация. В первом случае фазы колебаний различных осцилляторов распределены хаотически между $-\pi$ и $+\pi$, так, что среднее значение суммы фаз всех автоколебаний близко к нулю. Во втором случае можно выделить два основных режима - синфазный, при котором все взаимно синхронизированные автогенераторы колеблются с одной частотой синфазно, и противофазный, при котором частоты автоколебаний также одинаковы, а фазы колебаний большинства автогенераторов распределены между $-\pi$ и $+\pi$ более или менее равномерно, так что сумма всех фаз близка к нулю. Установление того или иного из этих режимов зависит от степени идентичности автогенераторов, их нелинейных характеристик и типа связи между ними. Как правило, при взаимной синхронизации большого числа слегка различающихся между собой автогенераторов устанавливается противофазный режим. С другой стороны, взаимной синхронизации автоколебаний отдельных элементов структуры препятствует быстрое ослабление с расстоянием связей между элементами, что приводит к локализации синхронных режимов в небольших участках структуры (так называемых "кластерах"), между которыми синхронизация отсутствует. Таким образом, как в отсутствии, так и при наличии взаимной синхронизации, автоколебания в различных участках структуры происходят так, что среднее значение суммы фаз всех автоколебаний близко к нулю. Соответственно близок к нулю и макроскопический - средний по большому числу однотипных

участков эффект таких колебаний - они оказывают минимальное воздействие на другие клеточные структуры и не загружают информационную систему организма.

Ситуация, однако, может существенно измениться при воздействии на клетки внешнего электромагнитного поля. Если частота внешнего воздействия приблизится достаточно близко к частоте автоколебаний одной из упомянутых групп почти идентичных осцилляторов (или к гармоникам и субгармоникам этой частоты), произойдет "захват" (синхронизация) автоколебаний внешним сигналом. Центр полосы синхронизации определяется средневзвешенной величиной парциальных частот осцилляторов данной группы и мало зависит от отклонений парциальных частот отдельных осцилляторов. Если система связанных осцилляторов имеет несколько устойчивых автоколебательных состояний с различными частотами, то слабый внешний сигнал может синхронизировать автоколебания на нескольких близких частотах. Синхронизация сопровождается фазировкой колебаний всех элементарных автогенераторов - фазы этих колебаний будут совпадать с фазой внешнего сигнала в данном участке структуры. Такие синфазные колебания идентичных участков клеточных мембран могут приводить к различным макроскопическим эффектам (например, к возбуждению электромагнитных или электроакустических волн в окружающей среде) и служить информационным сигналом для регуляторных систем организма. Для любой из упомянутых выше групп автогенераторов может существовать целый набор резонансных частот, на которых воздействие внешнего сигнала приводит к одному и тому же или близким биологическим эффектам. Поскольку другие биоструктуры или структурно отличные участки мембран имеют свой спектр автоколебаний, могут наблюдаться и другие наборы частот, на которых внешний сигнал вызывает иные биологические эффекты. Аналогичная ситуация может иметь место при синхронизации на гармониках или субгармониках частот автоколебаний. Характерной особенностью явления синхронизации автоколебаний является малая мощность требуемого для

синхронизации внешнего сигнала, пороговое значение которого зависит от уровня шумов в системе и разброса парциальных частот отдельных автогенераторов. Для реальных биологических объектов величина порога, естественно, зависит и от глубины расположения резонирующих структур относительно поверхности, подвергаемой электромагнитному облучению, и от интенсивности поглощения электромагнитных волн в приповерхностно расположенных тканях. Увеличение мощности внешнего сигнала над порогом не вносит качественных изменений в характер синхронизированных колебаний.

Хотя синхронизация - отнюдь не единственный эффект, которым может сопровождаться воздействие внешнего гармонического сигнала на сложную автоколебательную систему, представляется, что именно синхронизация наиболее естественно объясняет резонансное действие СВЧ излучения на живые объекты. При этом считают, что необходимость в возбуждении информационных сигналов, вызывающих изменение работы тех или иных систем организма появляется лишь в случае, когда требуется приспособление организма к изменившимся условиям (например, к внешним воздействиям). В обычном состоянии автоколебательные (или автоволновые) процессы в различных участках живой структуры расфазированы и создают лишь некоторый шумовой фон. При изменении условий существования или при резонансном воздействии внешнего излучения происходит фазировка этих автоколебаний, вызывающая появление информационного сигнала, воздействующего на информационные или регулирующие системы организма. Фазировка колебаний при синхронизации может, по-видимому, сопровождаться конформационными перестройками клеточных структур, например, отдельных участков мембран, так как, автоколебания могут влиять на устойчивость конформаций последних подобно тому, как это имеет место для механических систем. Эквивалентность (по биологическому эффекту) прерывистого ЭМИ непрерывному можно понять, если допустить, что новая конформация,

вызванная ЭМИ, метастабильна. При частоте пульсаций ЭМИ, превышающей обратное время релаксации этой метастабильной конформаций, его биологический эффект будет таким же, как при непрерывном ЭМИ, хотя "чистое" время воздействия ЭМИ в первом случае может быть значительно меньшим. Фиксация новых конформаций, происходящая с участием метаболических процессов в клетках, может объяснить эффект запоминания организмом длительного воздействия ЭМИ. Устойчивое изменение клеточных структур может, в свою очередь, определить и изменение характера реакции организма на внешние воздействия. Можно предположить, что автоколебания участков мембран в клетках живого организма являются не только средством передачи информации, но что их роль значительно шире. В частности, автоколебания, даже не синхронные, могут оказывать существенное влияние на ионный и молекулярный транспорт через мембраны. Колеблющийся участок мембраны играет при этом роль насоса, механизм действия которого основан на вибрационном перемещении частиц (в среднем в определенном направлении) под действием периодических (в среднем ненаправленных) сил. На разных участках мембраны, в зависимости от их структуры, одни и те же колебания могут способствовать перемещению одних молекул внутрь клетки, а других - наружу.

Синхронизация автоколебаний элементов мембран может существенно повлиять на процессы мембранного транспорта и, следовательно, на свойства и жизнедеятельность клеток [96].

Таким образом, синфазные колебания способны вызвать конформационные перестройки клеточных структур, влиять на проницаемость мембран и служит информационным сигналом для регуляторных систем всего биообъекта. Это связано с тем, что из-за влияния ЭМП молекулярные взаимодействия не могут быть абсолютно надежными. В течение действия ЭМП происходят даже энергетически невыгодные реакции. Аналогичным образом специфичность фермента в отношении

субстрата не может быть абсолютной, так как способность отличить одну молекулу от другой нарушается.

Эти ошибки играют важную роль при синтезе ДНК, так как в последовательности оснований ДНК заключена генетическая информация живой клетки.

Способность азотных оснований молекул различных нуклеиновых кислот «узнавать» друг друга путем нековалентного взаимодействия лежит в основе механизмов наследственности и мутаций [100].

Что касается информационно-энергетических характеристик биологических систем, то они зависят от модуляционно-временных параметров внешнего ЭМП, уровня шумов в биологической системе, структуры белковых молекул или внутриклеточных элементов и в несколько раз должны превышать уровень слабых нековалентных связей в макромолекуле вандервальсовых взаимодействий, водородных связей и ионных взаимодействий. Энергетичность клеточных структур (для информационных взаимодействий) составляет от единиц до десятков мкВт/см² [100,101].

1.5 Анализ электрофизических методов и технических средств получения информации о состоянии растительных биообъектов

Развиваемая в последнее время рядом авторов концепция фитомониторинга как теоретической базы современного растениеводства, предполагает комплексное и разностороннее получение статистической информации о физиологическом состоянии растений на разных стадиях органогенеза [103,104].

В условиях непрерывного обмена с окружающей средой веществом, энергией и информацией в растительных организмах создаются токи заряженных частиц, которые образуют внутри и за его пределами тонко организованные в пространственном и временном отношениях постоянные

и переменные электрические поля [42,105]. Квазипостоянные электрические поля организмов получили название биоэлектрических [102]. Биоэлектрическая полярность растений выражается в различиях метаболических потенциалов между отдельными органами, тканями, клетками в устойчивом стационарном состоянии [106-109]. Величина биоэлектрических потенциалов (БЭП) отражает реальные процессы обмена веществ и неразрывно связана с физиологическим состоянием живого организма, а устойчивое неравновесное состояние в растительных организмах поддерживается за счет непрерывно протекающих в них процессов обмена веществ. Нарушение нормального течения этих процессов ведет к утрате растительным организмом жизнеспособности и к исчезновению БЭП [109].

Общее биэлектрическое поле может влиять на видовой состав и регулировать скорость роста и развития. Обнаружено, что уровень БЭП прорастающих совместно семян кукурузы и пырея выше, чем у семян прорастающих изолированно друг от друга. Выше у первых и энергия прорастания [104-107].

Следует отметить, что БЭП являются одним из наиболее быстрых способов передачи информации между различными тканями и органами растительного организма [109-112]. В работах [109,112] отмечено, что в растениях потенциалы действия являются основной формой передачи информации и могут быть индуцированы температурными изменениями, механическими воздействиями, химическими агентами, изменением направления магнитного и гравитационного полей и электромагнитными излучениями.

Проведенный анализ показывает, что для оценки функционального состояния растений, жизнеспособности семян и изменения их функционального состояния после воздействия на них ЭМП можно применять методы измерения их биоэлектрических потенциалов.

Общим критерием для выбора существующих методов биоэлектрических измерений является степень повреждаемости растительных организмов и стабильность измеряемой величины в процессе исследований. Для измерения БЭП по поверхности различных органов и тканей растений, а также по поверхности семян применяются контактные и бесконтактные методы. При бесконтактных измерениях БЭП используются или вибрирующий электрод Скотта, или способ с ионизацией воздушного промежутка между поверхностью растения и измерительным электродом с ионизирующим излучением, например трития. Достоинство этих методов состоит в том, что нет непосредственного контакта с исследуемым объектом, а недостаток заключается в трудностях точной локализации места исследования из-за больших размеров измерительных электродов, площадь которых составляет примерно 10 см². Эксперименты показали, что бесконтактный и контактный способы измерения БЭП дают идентичные результаты [108,112-114].

Методы поверхностного отведения основаны на прямом контакте измерительного электрода с поверхностью стебля через слабый электролит. Локализация места отведения в этих методах определяется размером капли электролита. В качестве электролита используется 0,1 М раствор KCl, водопроводная вода, а также специальные электропроводящие контактные гели и раствор Кнопа, являющийся изотоническим раствором по отношению к внутриклеточной среде растения [104,115-118].

Для замера электрофизиологических параметров применяются две различные группы электродов: поляризующиеся и неполяризующиеся. В качестве поляризующихся электродов используются инертные металлы Au, Pt, Ni, W, Ta, Ag. Они в основном используются для исследования высокочастотных биоэлектрических явлений, характерных для живых организмов. В случае же измерения металлическими электродами постоянно и медленно меняющихся метаболических потенциалов в месте контакта

электрода с тканью возникает целый ряд физико-химических процессов, искажающих истинный потенциал.

На практике получили широкое распространение неполяризующиеся каломельные и хлорсеребряные электроды, которые через агаровые мостики, приготовленные на насыщенном растворе KCl, и контактный электролит соединяются с поверхностью исследуемого растительного объекта. Одинаковая подвижность в воде ионов K^+ и Cl^- практически предотвращает возникновение диффузного потенциала на границе раздела электролита [116-119].

Оптимальная площадь контакта электрода с поверхностью растения была определена в пределах $1 \dots 2 \text{ мм}^2$ в работе [118].

1.5.1 Технические средства получения электрофизической информации о состоянии растительного организма

Технические средства для изучения жизнедеятельности растений, связанные с измерением их биопотенциалов отличаются большим разнообразием. Большое разнообразие приборов и датчиков для измерения биоэлектрических параметров состояния связано с отсутствием единых технических и методических требований к аппаратуре для электрофизиологических исследований. Все технические средства для измерения электрофизиологических характеристик целостных растений основано на двух принципах:

- измерение разности биоэлектрических потенциалов БЭП и переходных процессов (БЭР) при действии резких возмущающих воздействий [120];
- определение электрического сопротивления (импеданса) живой растительной ткани [73].

Методические и технические вопросы биоэлектromетрии подробно рассмотрены в работах [120-123]. Конструктивные особенности и технические решения датчиков и преобразователей связаны главным образом со спецификой

растений как объектов исследований - их высокой чувствительностью к механическим и электрическим раздражениям и высокими значениями внутреннего сопротивления, достигающего $5 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [120-123]. Традиционное измерение биоэлектрических характеристик с использованием неполяризующихся (чаще всего хлорсеребряных) электродов осуществляется с помощью солевых жгутиков [124]. Однако жидкостные электроды влияют на физиологическое состояние растительных тканей вследствие проникновения жидкостного электролита в межклетники и нарушения водного и температурного режима растений [125]. Существенным недостатком контактных измерений является относительно длительный период дрейфа. Наличие столь инерционного процесса (1-1,5ч) делает практически невозможным одновременные измерения БЭП и БЭР в динамике жизнедеятельности. Кроме того, вследствие эффектов шунтирования контактным электролитом принципиально невозможны длительные измерения распределения потенциала на поверхности растений. Использование же металлических (цинковые, платиновые, стальные, золотые) электродов вызывает дополнительные трудности из-за возникающей в месте контакта с растительной тканью контактной разности потенциалов, сопоставимой по своей величине с абсолютными значениями измеряемых БЭП [126]. Имеется также опыт использования редокс-чувствительных электродов для электрофизиологических исследований корней и морфогенеза целостных растений [126,127]. Однако и в этом случае не удастся добиться стабильных характеристик в точке контакта датчика с растением.

В работах [126, 128,] проведен сравнительный анализ различных датчиков для измерения биоэлектрических потенциалов. Установлено, что различия между датчиками связаны только с величиной ЭДС поляризации и степенью объект-приборного взаимодействия, которая накладывает ограничения на длительность непрерывного эксперимента. Кроме того, при контактных измерениях значения измеряемой разности потенциалов существенно зависят от электрического сопротивления растения, которое может изменяться в широких

пределах. Поэтому необходимым условием адекватной интерпретации результатов контактных биоэлектрических измерений является одновременное измерение электросопротивления растительной ткани [23].

В связи с этим совершенствование датчиков для электрофизиологических исследований идет в направлении создания бесконтактных средств электрометрии. Уже разработаны и широко используются вибрирующие датчики, как правило, для исследования объемной картины распределения электрических зарядов и полей. Другой метод бесконтактных измерений БЭП основан на ионизации воздушного зазора между электродом и поверхностью растения. В качестве ионизатора использован тритий, являющийся источником мягкого β -излучения [112,129]. Однако значительные конструктивные недостатки датчика, наличие собственной ЭДС, а также высокого требования к измерительной аппаратуре привели к тому, что ионизирующий метод не нашел широкого применения в практике электрофизиологических исследований. Кроме того, не были отработаны методические аспекты измерений, в частности зависимость собственной ЭДС датчика и сопротивления от площади активной поверхности и величины воздушного зазора. Отдельными исследованиями [112,130] установлено, что при фиксированной площади и переменном зазоре собственная ЭДС тритиевого датчика около 0,15В, причем при малых значениях напряжения в цепи (до вольта) ток датчика изменяется линейно. Аналогичные зависимости характеристик датчика от площади активной поверхности не приведены, хотя известно, что площадь ионизирующей поверхности существенно влияет на результаты измерений на само растение. Учитывая, что собственный ток тритиевого датчика составляет 0,15 мкА/см [127], представляется весьма сомнительным обстоятельство, что при длительных (до 30 сут.) экспериментах датчик не оказывает ощутимого воздействия на растительную ткань. К сожалению необходимо констатировать фрагментарность имеющейся информации. Несмотря на перспективность использования бесконтактных датчиков, их характеристики еще недостаточно

исследованы. Ключевая в электрофизиологии проблема воспроизводимости данных остается нерешенной.

Основной проблемой остается построение достаточно стабильных и помехоустойчивых электрометрических преобразователей. Их слабая проработанность связана с недостаточной изученностью растения как объекта электрических измерений. Основным требованием к аппаратуре является высокое входное сопротивление (на пять порядков выше сопротивления объекта) и низкий уровень собственных шумов. На первых этапах исследований для регистрации разности биоэлектрических потенциалов использовались высокоомные милливольтметры постоянного тока, например лабораторные рН-метры рН-340, рН-121 или электрометры [127,131].

Решение отдельных целевых задач потребовало отказа от серийно изготавливаемой аппаратуры и разработки устройств, в наибольшей степени отвечающих требованиям полевых исследований или автоматизации научного эксперимента [132]. Подобные разработки решают проблему портативности, автономности и экономичности питания. Однако методические вопросы, связанные с неустойчивостью и воспроизводимостью получаемой информации, до настоящего времени остаются нерешенными. Специфика объекта исследований требует решения в первую очередь технических вопросов, связанных с минимизацией объект-приборного взаимодействия.

Низкая воспроизводимость информации потребовала детального учета всех процессов, происходящих в зоне взаимодействия. В соответствии с этим, современная аппаратура для измерения биопотенциалов нормирует величину давления датчика в точке контакта с растительной тканью [24], минимизирует площадь жидкостного контакта [127,133]. Большое внимание уделяется повышению точности измерений биоэлектрических потенциалов за счет сокращения периода отдельных измерений до 3-10 мин.

Анализ литературных данных показывает, что наиболее оптимальным с точки зрения помехоустойчивости является разделение входных электрометрических и выходных нормирующих каскадов преобразователя

разности потенциалов. Для достижения этой цели в первом каскаде усилителя используется электрометрическая лампа [134] или гибридная микросхема на полевых транзисторах [20]. Такие преобразователи имеют высокое входное сопротивление (10 Ом) и низкий уровень собственных шумов (0,7 мВ). Малая емкость входа позволяет регистрировать динамику процессов электрической активности в диапазоне частот до 10 Гц при коэффициенте передачи по постоянному току 0,98. Основным недостатком транзисторных преобразователей является большой временной и температурный дрейф, что требует периодического контроля и калибровки в процессе работы.

Поэтому для измерения медленно изменяющихся потенциалов, постоянную времени преобразователя увеличивают и используют для измерений принцип модуляции-демодуляции [135] или используют принцип коррекции нуля. Снижение температурного дрейфа обеспечивается благодаря использованию стабилизаторов на кремниевых полупроводниках и терморезисторах [20]. Важным условием для уменьшения искажений является согласование статических и динамических характеристик датчика биопотенциалов и растения. До настоящего времени в литературе этому вопросу практически не уделялось внимания

Сравнительные измерения электрического сопротивления (или проводимости) целостного растения до и после воздействия физического фактора среды традиционно используются для характеристики устойчивости растений к стрессам [23, 136].

Изменение электрического сопротивления отражает первичные повреждения клеточных мембран и используется поэтому как универсальный показатель функционального состояния растений [137,138].

Электрическое сопротивление растений используется при изучении морозоустойчивости, жаростойкости, засухоустойчивости, газоустойчивости, устойчивости к загущению, поражению патогенной микрофлорой [30-33, 35,36, 125].

Для измерения электросопротивления растений разработан ряд методов и технических средств. Обычно электрическое сопротивление растений определяется с помощью контактных датчиков. Для этой цели используются металлические, графитовые или хлорсеребряные жидкостные электроды [23, 43, 140-143]. Они либо прикладываются к поверхности, либо вводятся в растительную ткань. Основным недостатком является возникновение поляризации в точке контакта, которая искажает получаемые результаты и снижает воспроизводимость. Для повышения эффектов поляризации измерения сопротивления производят, как правило, на переменном токе, или переключая полярность прикладываемого напряжения. Для измерения ЭДС поляризации используются специальные пластинчатые электроды из легко окисляющегося и поляризующегося металла. В любом случае, основным требованием к измерительной аппаратуре для исследования электрического сопротивления является ее высокая чувствительность. Токи, протекающие во внешней цепи, должны находиться на уровне 10-10А. При меньших значениях тока существенную роль начинает играть поляризация, а при больших происходит тепловое повреждение растительной ткани.

Еще одним источником погрешностей является зависимость результата от специфических особенностей контактных измерений: силы прижима в точке контакта, диаметра стебля, видовых и сортовых морфологических особенностей [141, 142].

Общим недостатком всех рассмотренных технических средств является низкая точность измерения, сильное влияние поляризационных полей на объект исследования, малая экономичность при работе с автономными источниками питания.

Наиболее перспективным является измерение электрической емкости растений бесконтактным способом. При этом методе одновременно определяется диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, активная и реактивная составляющие полного сопротивления.

Данный метод был использован для биологических исследований водообеспеченности растений и объема сосущей части корней [124, 143, 144].

В этом случае по активной составляющей импеданса, измеряемой на частоте 50 Гц, судят о объеме сосущей части корней растения, а по реактивной на частоте 100 кГц – о общем объеме корневой системы.

Проведенный анализ методов и устройств показывает, что для измерения биоэлектрических характеристик семян и растений овощных культур, после предпосевной обработки семян ЭМП, следует использовать метод поверхностного отведения с неполяризующими коломельными или хлорсеребряными электродами, а регистрацию биоэлектрических характеристик осуществлять с помощью измерительных усилителей с входным сопротивлением 10^9 Ом.

1.6 Обоснование требований к источникам электромагнитного излучения для информационно - резонансного воздействия на биологические объекты

Теоретический и экспериментальный материал по проблеме воздействия ЭМП на биологические объекты свидетельствует о том, что на определенных резонансных частотах, внешние электромагнитные излучения имитируют сигналы управления, генерируемые в целях сохранения гомеостаза самим биообъектом [82].

Резонансное действие ЭМП на клетки биологических объектов связано с возбуждением акустоэлектрических волн в замкнутых клеточных мембранах [83].

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что добротность биологических мембран составляет $10^3 \dots 10^4$ [64, 117]. Поэтому с изменением частоты будет изменяться и характер распределения ЭМП как на поверхности мембран, так и в прилежащих к ней внутри и внеклеточном пространствах, а следовательно и характер управляющего действия ЭМП. В

то же время, управляющее действие внешних излучений может быть связано не только с пространственным распределением поля, но и с резонансными частотами тех или иных белковых молекул или внутриклеточных элементов.

Экспериментальные исследования показывают, что из-за нестабильности генератора ($10^{-2} \dots 10^{-3}$) фактическое время воздействия ЭМП на биологические объекты уменьшается на несколько порядков. Поэтому облучение биологических объектов необходимо проводить ЭМП, в качестве источников которых использовать генераторы с относительной нестабильностью частоты $10^{-6} \dots 10^{-7}$, позволяющие осуществить точную ($10^{-3} \dots 10^{-4}$) настройку на контур линии биологического объекта, что обеспечить 95% передачу энергии облучения биологической структуре и существенно уменьшить время воздействия.

В работе [82] приведено, что эффекты, наблюдаемые при некотором фиксированном времени воздействия электромагнитного излучения, не критичны к плотности потока электромагнитной энергии. Начиная с некоторой минимальной пороговой величины, составляющей для разных биообъектов $(0,01 \dots 100) \cdot 10^{-3}$ Вт/см², последующее увеличение потока энергии на несколько порядков, при разовом воздействии на биологический объект, как правило, не влияет на метаболические процессы биообъекта, а запоминающее действие электромагнитного излучения сохраняется длительное время лишь в тех случаях, когда облучение длилось от нескольких минут до десятков минут.

Следовательно, для более эффективного использования электромагнитных полей в технологических процессах сельскохозяйственного производства следует использовать высокостабильные источники электромагнитной энергии с выходной мощностью до 4...5 Вт.

1.7 Анализ технических средств электромагнитного излучения для воздействия на биологические объекты

Как было показано в предыдущем параграфе, для воздействия на биологические объекты необходимы источники КВЧ - колебаний с высокими требованиями по спектрально - флуктуационными и энергетическими характеристиками.

Анализ серийно выпускаемых генераторов КВЧ диапазонов по таким параметрам, как нестабильность частоты, погрешность установки выходной частоты, диапазон перестройки показал, что они не могут быть использованы в биомагнитологии [144-146].

Генераторы, выпускаемые в России и Литве, могут работать в диапазоне частот 20...80 ГГц, но обладают высокой относительной нестабильностью выходной частоты ($10^{-3}...10^{-4}$), низкой монохроматичностью сигнала и малой выходной мощностью.

Генераторы, выпускаемые за рубежом, обладают меньшей нестабильностью частоты (10^{-5}), но малой выходной мощностью (до 5мВт).

Для генерирования и усиления электромагнитных колебаний в КВЧ диапазоне длин волн применяются электровакуумные электронные приборы О и М- типов, которые могут обеспечить выходную мощность 30-100 Вт.

К приборам О -типа относятся лампы бегущей и обратной волны (ЛБВ, ЛОВ), клинотроны и клистроны. К этому же классу можно отнести и генератор дифракционного излучения (ГДИ).

К приборам М-типа следует отнести магнетроны. Отличительной особенностью приборов О - типа в генераторных режимах является низкий КПД, при выходной мощности десятки МВт, напряжением 2-10 кВ и относительной нестабильностью частоты 10^{-3} [147, 148]. В усилительном режиме приборы О - типа обеспечивают выходную мощность 30-100 Вт, при напряжении 8-13 кВ, КПД до 70% с коэффициентом усиления 6-40 дБ. Уровень выходной мощности ГДН в непрерывном режиме составляет

порядка 30-100 Вт при ускоряющем напряжении 6 кВ и нестабильности частоты 10^{-3} [147-153]. Максимально достижимый коэффициент полезного действия магнетрона в КВЧ диапазоне составляет 10-15%, при рабочем напряжении 2,5 кВ. Магнетронный генератор имеет жидкостное охлаждение и обеспечивает выходную мощность 30 Вт [154].

Проведенный анализ показывает, что устройствам с электровакуумными электронными приборами присущие существенные недостатки: большие объемно-массовые характеристики, они требуют для своей работы высоковольтные источники напряжения, системы жидкостного охлаждения, не обеспечивают требуемых параметров по спектрально-флуктуационным характеристикам и дорого стоят.

В настоящее время в КВЧ диапазоне находят применение полупроводниковые генераторы на кремниевых лавинно-пролетных диодах (ГЛПД), которые по большинству электрических (малые напряжения и рабочие токи) и эксплуатационных параметров (габариты, вес, надежность и т.д.) превосходят электровакуумные приборы. Кроме того, генераторы на ЛПД имеют более высокий уровень выходной мощности, чем генераторы с междоменным переходом (МЭП) или на диодах Ганна.

Использование генераторов на полупроводниковых приборах в магнитобиологии может быть оправдано в тех случаях, если они соответствуют заданным требованиям, в первую очередь, выходной мощности, КПД, уровню шумов, стабильности частоты, качеству спектра.

На рис.1.4 приведены уровни генерируемой мощности ГЛПД и ГДГ в диапазоне частот от 30 до 300 ГГц [155].

Рабочие частоты промышленных генераторов на ЛПД (ГЛПД) ограничены 150...200 ГГц, а на диодах Ганна (ГДГ) – 100...150 ГГц.

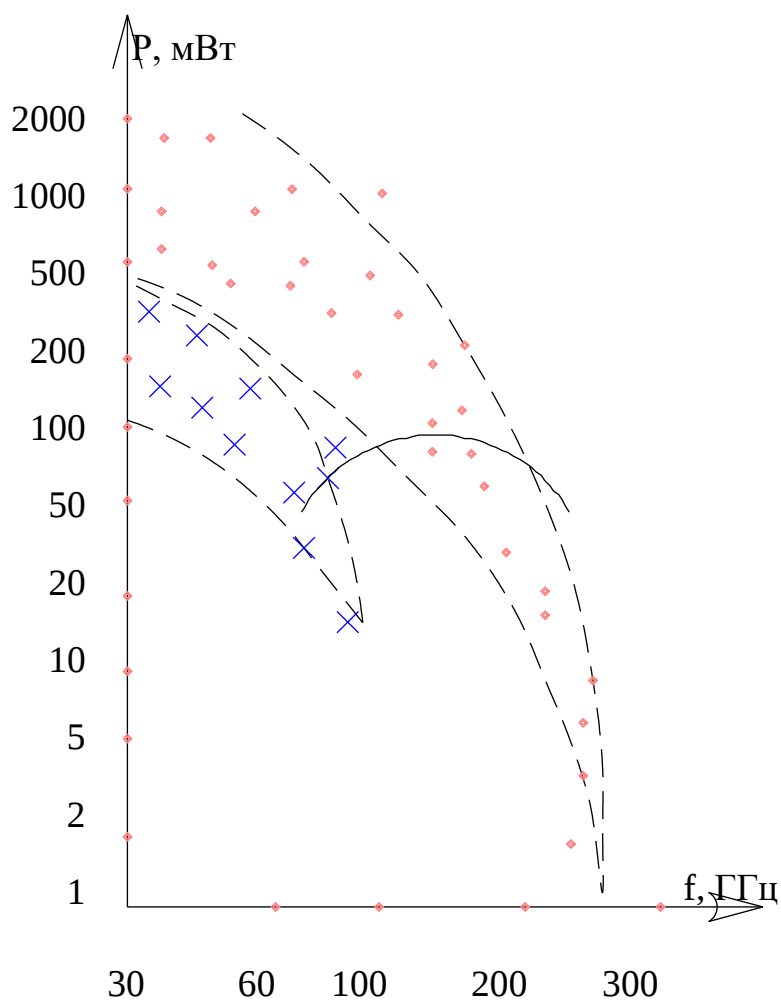


Рис. 1.4 Зависимости генерируемой мощности в диапазоне частот генераторами на диодах ЛПД и Ганна:

- - ГЛПД ;
- x – ГДГ

Как следует из приведенных зависимостей (рис. 1.4), генерируемая мощность ЛПД может меняться от 500 до 2000 мВт, а для диодов Ганна от 100 до 500 мВт.

В таб. 1.1 приведены характеристики серийно выпускаемых ЛПД непрерывного режима работы, разработанные в Украине, России и США [20, 21].

Таблица 1.1

Характеристики ЛПД непрерывного режима работы

Производитель	Наименование параметров	Параметры			
Украина	Рабочий диапазон частот, ГГц	30...37	58...62	92...96	120...140
	Генерируемая мощность, мВт	800	600	200	10
	Рабочее напряжение, В	34...42	24...30	16...18	13...15
Россия	Рабочий диапазон частот, ГГц	35...42	49...55	90...96	100...150
	Генерируемая мощность, мВт	500	300	100	5
	Рабочее напряжение, В	45	25	20	20
США	Рабочий диапазон частот, ГГц	33...37	58...62	92...96	135...145
	Генерируемая мощность, мВт	1000	800	400	20
	Рабочее напряжение, В	45	35	25	20

Эксплуатационные характеристики ГЛПД (выходная мощность, частота, КПД, диапазон перестройки, стабильность частоты, качество спектра), а также режим работы зависит не только от параметров ЛПД, но в значительной мере от конструкции корпуса и типа резонансной системы [156].

В КВЧ диапазоне наибольшее распространение получили волноводные резонаторы, так как в этом диапазоне их добротность выше, чем у коаксиальных и полосовых систем. Кроме того, в волноводных резонаторах проще осуществлять механическую

перестройку частоты и теплоотвод. Из волновых резонансных систем широко используются волноводно-штыревой и радиально-волноводный резонаторы [157]. В ГЛПД волноводно-штыревой конструкции на частоте (36,5...39,0) ГГц получена выходная мощность (420...470) мВт с КПД (6...7)% и диапазоном механической перестройки частоты (11...19)% [151].

В ГЛПД радиально-волновой конструкции на частоте 50 ГГц получена мощность 630 мВт с КПД 10% и перестройкой частоты (10...15)%.

Проведенный анализ показал, что производимые в Украине кремневые однопролетные ЛПД КВЧ диапазона по энергетическим характеристикам не уступают зарубежным аналогам и поэтому могут быть использованы для разработки генераторов КВЧ диапазона.

Однако, если ГЛПД в отношении генерируемой мощности и КПД превосходят генераторы на других полупроводниковых и электровакуумных приборах, то в отношении нестабильности частоты они проигрывают, т.к. температурный дрейф частоты нестабилизированного ГЛПД имеет величину $(0,5...1,5) \cdot 10^{-4} \text{ 1/к}$ [158].

Поэтому, для удовлетворения требований по стабильности частоты, необходимо провести теоретическое обоснование метода стабилизации частоты ГЛПД в КВЧ диапазоне.

В связи с тем, что генератор на ЛПД с радиальной конструкцией может обеспечить мощность 600-700 мВт, то для получения мощности 5000 - 6000 мВт необходимо использовать метод сложения мощностей, который требует теоретического обоснования для диапазона КВЧ излучений.

1.8 Обоснование выбора направлений исследования

Из проведенного анализа литературных источников следует, что для повышения урожайности тепличных культур следует использовать низкоэнергетические ЭМП КВЧ диапазона.

Для получения полезных изменений в биологическом объекте необходимо находить такую структуру ЭМП (частота, мощность, экспозиция, и т.д.), которая приводила бы к увеличению урожайности и выведению новых сортов овощных культур. При этом следует отметить, что эффективное использование низкоэнергетических ЭМП КВЧ диапазона невозможно без разработки физико-математических моделей, учитывающих параметры ЭМП и электрофизические параметры тепличных культур, без создания специализированных источников излучения КВЧ диапазона, без применения устройств поиска оптимальных технологических параметров ЭМП.

Учитывая вышеизложенное, целью данной работы является разработка эффективной, энергосберегающей экологически безопасной технологии для повышения урожайности тепличных культур с использованием информационно-резонансного воздействия низкоэнергетических ЭМП КВЧ диапазона для предпосевной обработки семян.

Современное состояние вопроса, актуальность указанных задач определяют следующие основные направления, требующие решения в связи с указанной проблемой:

- исследовать состояние проблемы и пути повышения урожайности тепличных культур на основе электромагнитной технологии;
- разработать математическую модель информационно-резонансного воздействия низкоэнергетического электромагнитного излучения на семена тепличных культур и теоретически определить частотный диапазон, вызывающий стимуляцию метаболических процессов в семенах;

- теоретически исследовать процесс влияния низкоэнергетических ЭМП на мембранный транспорт веществ в клетках семян тепличных культур и определить плотность потока мощности и экспозицию, вызывающих активизацию семян тепличных культур;
- теоретически рассмотреть вопросы создания высокостабильных источников КВЧ излучения перестраиваемых по частоте в твердотельном исполнении;
- теоретически обосновать схему сложения мощностей нескольких источников КВЧ - излучения;
- разработать методику и оборудование технической системы контроля биоэлектрических характеристик семян для прогнозирования результатов электромагнитного облучения тепличных культур;
- провести экспериментальные исследования по влиянию низкоэнергетических ЭМП КВЧ диапазона на семена тепличных культур с целью уточнения оптимальных технологических параметров, вызывающих повышение урожайности тепличных культур растениеводства.

Выводы

1. На основании обобщения фактического материала отечественных и зарубежных научных публикаций следует, что для повышения урожайности тепличных культур, их семена целесообразно обрабатывать низкоэнергетическими ЭМП, для чего необходимо создать эффективную, энергосберегающую и экологически чистую электротехнологию активации посевного материала.
2. Для определения технологических параметров ЭМП (частота, мощность, экспозиция), вызывающих желаемый биологический эффект в семенах тепличных культур, необходимы теоретические исследования моделей, учитывающих информационно-резонансное воздействие ЭМП на

семена и на мембранный транспорт веществ в клетках семян, обработанных ЭМП.

3. Для разработки электромагнитной технологии предпосевной обработки семян тепличных культур необходимы исследования электрофизических процессов в семенах на клеточном уровне и создание высокостабильных по частоте ($10^{-6} \dots 10^{-7}$) источников КВЧ излучения с выходной мощностью 4000 - 5000 мВт.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВЧ ДИАПАЗОНА С СЕМЕНАМИ ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

2.1 Решение задачи о рассеянии плоской волны на биологическом объекте

Из материалов раздела 1 следует, что одним из возможных факторов положительного воздействия низкоэнергетического электромагнитного излучения на развитие сельскохозяйственных растений является его влияние на транспорт питательных веществ из эндосперма внутрь зерновки. Очевидно, что исследование этого процесса возможно только лишь в том случае, когда известно, как распределяются воздействующие электромагнитные поля внутри зерновки семян. Следовательно, для получения необходимых результатов должна быть построена математическая модель, позволяющая находить амплитуды внутренних электромагнитных полей в указанных структурах. При этом следует иметь в виду, что наибольшее влияние электромагнитное поле оказывает на увлажненные семена.

Как показано в работе [141] семена тепличных культур можно представить в виде эллипсоида, заполненного эндоспермом, внутри которого находится зерновка. Эллипсоид окружён тонкой кожурой. Если рассматривать данную систему как низкодобротный резонатор, то вполне очевидно, что она обладает спектром резонансных частот. Относительная диэлектрическая проницаемость влажной эндоспермы составляет величину порядка 60, зерновки – порядка 70, а кожуры – порядка 2 [22, 45]. Размер самой зерновки для разных культур составляет величину порядка 0,4 - 0,6 мм, размер семени – 3 - 7 мм, а толщина кожуры – достигает значений 10 мкм [22, 161, 162].

Таким образом, из сказанного выше следует, что необходимо решить задачу о рассеянии падающей плоской электромагнитной волны на многослойной структуре, имеющей форму вложенных эллипсоидов. Поскольку кожура семени имеет диэлектрическую проницаемость практически равную проницаемости воздуха, то есть она существенно отличается от проницаемости эндосперма, то можно считать, что в семени лишь два слоя: эндосперм и зерновка. С другой стороны, поскольку рассматривается случай облучения семян ЭМП с частотами, которые соответствуют длине волны 8 мм, внутри эндосперма длина волны будет примерно равна 0,9 мм (что связано с его диэлектрической проницаемостью [163, 164]). Поскольку эта величина существенно меньше размеров семени, то можно считать, что для таких длин падающей волны внутри семени резонансы не возникнут, но при проникновении в зерновку длина волны будет примерно равна 0,5 мм, что приведет к появлению в ней резонансных явлений, так как размеры зерновки совпадут с длиной волны электромагнитного излучения. Таким образом, необходимо рассмотреть резонансные явления, возникающие внутри зерновки семян тепличных культур. Построение математической модели, позволяющей определить количественные характеристики указанных резонансов, будет свидетельствовать о наличии таких частотных диапазонов воздействующей волны, которые оказывают на зерновку наибольшее влияние.

Итак, пусть центр семени совпадает с центром прямоугольной декартовой системы координат. Для определенности будем считать, что плоская волна распространяется нормально поверхности семени, и ее электрический вектор направлен по касательной к поверхности (рис. 2.1). Кроме того, для простоты положим, что центр зерновки совпадает с центром семени, а само семя и зерновка имеют сферическую форму. Зависимость от времени определяется множителем $e^{j\omega t}$, который в дальнейшем будет опущен. В произвольном случае распространения падающей на семя растения электромагнитной волны всегда можно найти проекцию ее

электрической составляющей на тангенциальное к поверхности кожуры направление.

Как известно [163], в общем случае электромагнитное поле внутри рассматриваемого объекта не может быть получено из одной скалярной функции, зависящей от координаты и времени. Это возможно только в прямоугольной системе координат, где в трехмерном скалярном волновом уравнении переменные легко разделяются. Что касается сферической системы координат, то, несмотря на возможность разделения переменных в трехмерном скалярном волновом уравнении, из полученного решения нельзя получить составляющие электромагнитного поля. Вследствие этого необходимо находить решение векторного волнового уравнения. Для этого электромагнитное поле должно быть разложено на две составляющих, каждая из которых получается из одной скалярной функции, удовлетворяющей волновому уравнению [163, 164].

Будем считать, что каждый из слоев семени является однородным, то есть имеет постоянную диэлектрическую проницаемость. Диэлектрическую проницаемость среды, окружающей семя, обозначим ε_0 , такой же будем считать и проницаемость кожуры; проницаемость эндосперма обозначим ε_1 , а зерновки – ε_2 . Поскольку и окружающая семя среда и само семя являются немагнитными, то их магнитная проницаемость одинакова и равна $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Гс}}{\text{А}}$. Как сказано выше, для решения задачи разложим падающее поле по двум векторным сферическим волновым функциям $\vec{M}$ и $\vec{N}$ [163 - 165]. Решение будет получено с использованием сферической системы координат (r, φ, θ) (рис. 2.1). На указанном рисунке 1 соответствует коже семени, 2 – его эндосперму, 3 – зерновке.

Проникшее из свободного пространства в эндосперм электромагнитное поле представим в сферической системе координат. В

работе [163] показано, что в этом случае электрическая $\vec{E}^{na\partial}$ и магнитная $\vec{H}^{na\partial}$ компоненты падающего поля могут быть записаны в виде:

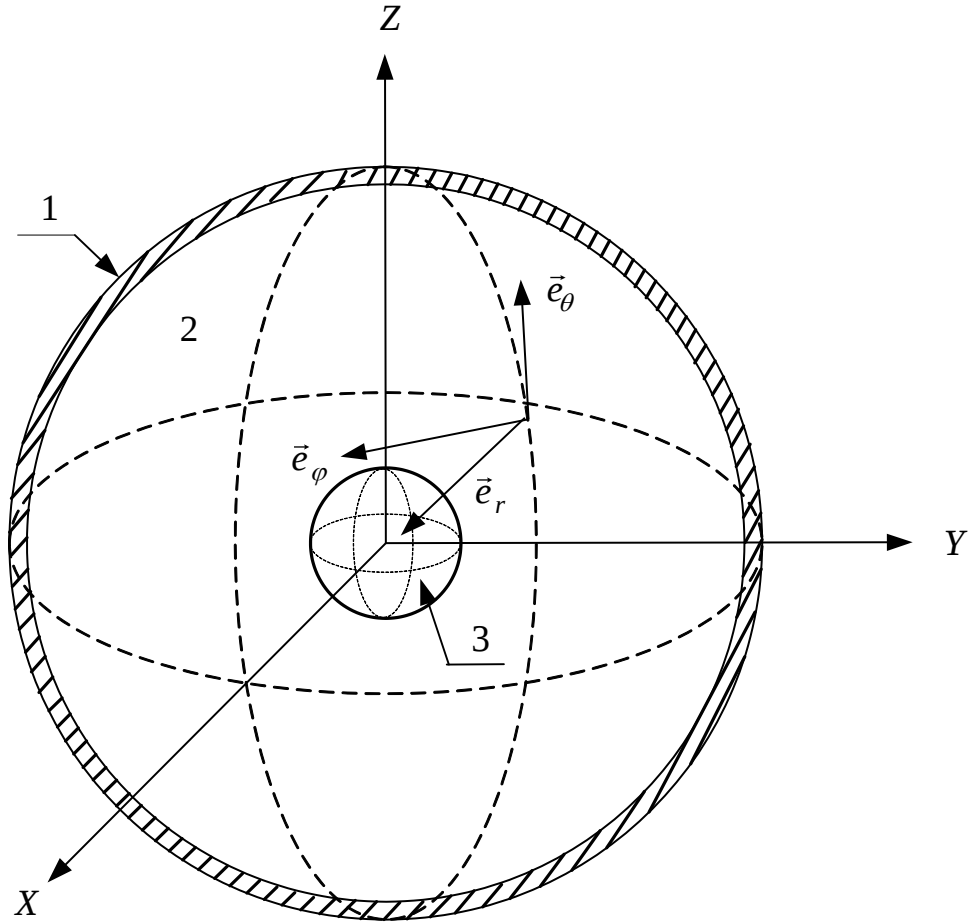


Рис. 2.1. Падение плоской электромагнитной волны на семя

$$\begin{aligned}\vec{E}^{na\partial} &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{no}^+ - i \vec{N}_{ne}^+); \\ \vec{H}^{na\partial} &= -\frac{k_1 E_0}{\mu_0 \omega} \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{ne}^+ + i \vec{N}_{no}^+),\end{aligned}\tag{2.1}$$

где n – номер гармоники падающего поля;

E_0 – амплитуда электрической составляющей падающего поля;

$$i = \sqrt{-1};$$

$$\vec{M}_{n_e^o}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \left[\pm \vec{e}_\theta \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\sin}^{\cos} \varphi - \right. \\ \left. - \vec{e}_\varphi \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\cos}^{\sin} \varphi \right]; \quad (2.2)$$

$$\vec{N}_{n_e^o}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{k_1 r} \left\{ \vec{e}_r \frac{n(n+1)}{\sqrt{k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\cos}^{\sin} \varphi + \right. \\ \left. + \vec{e}_\theta \left[\sqrt{k_1 r} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\cos}^{\sin} \varphi \pm \right. \\ \left. \pm \vec{e}_\varphi \frac{1}{\sin \theta} \left[\sqrt{k_1 r} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\sin}^{\cos} \varphi \right\}; \quad (2.3)$$

$P_n^{(1)}(\cos \theta)$ – присоединенные функции Лежандра;

индексы o или e означают выбор верхнего или нижнего варианта тригонометрической функции и знака;

$J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)$ – функции Бесселя первого рода полуцелого порядка;

$\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_\theta$ – координатные орты;

производная берется по переменной $(k_1 r)$;

$k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_0}$ – волновое число в окружающей зерновку среде;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота падающей волны.

Компоненты рассеянной волны $\vec{E}^{pacc}, \vec{H}^{pacc}$ в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned}
\vec{E}^{pacc} &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n^{pacc} \vec{M}_{no}^- - i b_n^{pacc} \vec{N}_{ne}^- \right); \\
\vec{H}^{pacc} &= -\frac{k_1}{\omega \mu_0} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n^{pacc} \vec{M}_{ne}^- + i a_n^{pacc} \vec{N}_{no}^- \right),
\end{aligned} \tag{2.4}$$

где a_n^{pacc} и b_n^{pacc} – коэффициенты отражения для электрической и магнитной составляющей падающего ЭМП.

Функции $\vec{M}_{n_e^o}^-$ и $\vec{N}_{n_e^o}^-$ получаются из $\vec{M}_{n_e^o}^+$ и $\vec{N}_{n_e^o}^+$ посредством замены $J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)$ на функцию Ханкеля второго рода полуцелого порядка $H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r)$, при этом следует отметить, что знак плюс относится к падающим полям, а минус – к рассеянным.

Наконец, внутреннее поле определяется с помощью выражений:

$$\begin{cases} \vec{E} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n \vec{M}_{no} - i b_n \vec{N}_{ne} \right); \\ \vec{H} = -\frac{k_2}{\omega \mu_0} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n \vec{M}_{ne} + i a_n \vec{N}_{no} \right). \end{cases}, \tag{2.5}$$

где a_n и b_n – коэффициенты прохождения электрической и магнитной составляющей падающего ЭМП внутрь зерновки.

Здесь $\vec{M}_{n_e^o}$ и $\vec{N}_{n_e^o}$ имеют тот же вид, что и в (2.2) и (2.3), но в них

$k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_0}$ заменено на $k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_0}$.

Используя граничные условия на поверхности сферы, которые сшивают тангенциальные составляющие внешних и внутренних полей, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \left[\vec{e}_r, \left(\vec{E}^{nad} + \vec{E}^{pacc} \right) \right] = \left[\vec{e}_r, \vec{E} \right]; \\ \left[\vec{e}_r, \left(\vec{H}^{nad} + \vec{H}^{pacc} \right) \right] = \left[\vec{e}_r, \vec{H} \right]. \end{cases} \quad (2.6)$$

Для решения данной системы и определения коэффициентов a_n , b_n , a_n^{pacc} и b_n^{pacc} подставим в нее выражения (2.1), (2.4), (2.5). В результате получаем:

$$\begin{cases} \left[\vec{e}_r, \left(\sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(\vec{M}_{no}^+ - i \vec{N}_{ne}^+ \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n^{pacc} \vec{M}_{no}^- - i b_n^{pacc} \vec{N}_{ne}^- \right) \right) \right] = \\ = \left[\vec{e}_r, \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n \vec{M}_{no} - i b_n \vec{N}_{ne} \right) \right]; \\ \left[\vec{e}_r, k_1 \left(\sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(\vec{M}_{ne}^+ + i \vec{N}_{no}^+ \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n^{pacc} \vec{M}_{ne}^- + i a_n^{pacc} \vec{N}_{no}^- \right) \right) \right] = \\ = \left[\vec{e}_r, k_2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n \vec{M}_{ne} + i a_n \vec{N}_{no} \right) \right]. \end{cases} \quad (2.7)$$

Учтем, что $\vec{M}_{n_e^o} = M_{\theta n_e^o} \vec{e}_\theta + M_{\varphi n_e^o} \vec{e}_\varphi$,

$\vec{N}_{n_e^o} = N_{r n_e^o} \vec{e}_r + N_{\theta n_e^o} \vec{e}_\theta + N_{\varphi n_e^o} \vec{e}_\varphi$. Тогда, основываясь на правиле

вычисления векторного произведения [166], приходим к выводу, что уравнения в системе будут содержать только θ и φ компоненты векторов.

Иными словами:

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[\left(-M_{\varphi no}^+ + i N_{\varphi ne}^+ \right) \vec{e}_{\theta} + \left(M_{\theta no}^+ - i N_{\theta ne}^+ \right) \vec{e}_{\varphi} \right] + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[\left(-a_n^{pacc} M_{\varphi no}^- + i b_n^{pacc} N_{\varphi ne}^- \right) \vec{e}_{\theta} + \right. \\
& \left. + \left(a_n^{pacc} M_{\theta no}^- - i b_n^{pacc} N_{\theta ne}^- \right) \vec{e}_{\varphi} \right] = \\
& = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[\left(-a_n M_{\varphi no} + i b_n N_{\varphi ne} \right) \vec{e}_{\theta} + \left(a_n M_{\theta no} - i b_n N_{\theta ne} \right) \vec{e}_{\varphi} \right]; \\
\\
& k_1 \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[\left(-M_{\varphi ne}^+ - i N_{\varphi no}^+ \right) \vec{e}_{\theta} + \left(M_{\theta ne}^+ + i N_{\theta no}^+ \right) \vec{e}_{\varphi} \right] + \right. \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[\left(-b_n^{pacc} M_{\varphi ne}^- - i a_n^{pacc} N_{\varphi no}^- \right) \vec{e}_{\theta} + \right. \\
& \left. + \left(b_n^{pacc} M_{\theta ne}^- + i a_n^{pacc} N_{\theta no}^- \right) \vec{e}_{\varphi} \right] \Big\} = \\
& = k_2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[\left(-b_n M_{\varphi ne} - i a_n N_{\varphi no} \right) \vec{e}_{\theta} + \left(b_n M_{\theta ne} + i a_n N_{\theta no} \right) \vec{e}_{\varphi} \right].
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Поскольку равенство векторов может быть лишь при условии равенства их соответствующих компонент, получаем систему из четырех линейных алгебраических уравнений для определения четырех неизвестных коэффициентов. Данная система выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(M_{\varphi no}^+ - i N_{\varphi ne}^+ \right) + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n^{pacc} M_{\varphi no}^- - i b_n^{pacc} N_{\varphi ne}^- \right) = \\
& = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n M_{\varphi no} - i b_n N_{\varphi ne} \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(M_{\theta no}^+ - i N_{\theta ne}^+ \right) + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n^{pacc} M_{\theta no}^- - i b_n^{pacc} N_{\theta ne}^- \right) = \\
& = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n M_{\theta no} - i b_n N_{\theta ne} \right); \\
& k_1 \left[\sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(M_{\varphi ne}^+ + i N_{\varphi no}^+ \right) + \right. \\
& \left. + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n^{pacc} M_{\varphi ne}^- + i a_n^{pacc} N_{\varphi no}^- \right) \right] = \\
& = k_2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n M_{\varphi ne} + i a_n N_{\varphi no} \right); \\
& k_1 \left[\sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(M_{\theta ne}^+ + i N_{\theta no}^+ \right) + \right. \\
& \left. + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n^{pacc} M_{\theta ne}^- + i a_n^{pacc} N_{\theta no}^- \right) \right] = \\
& = k_2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(b_n M_{\theta ne} + i a_n N_{\theta no} \right). \tag{2.9}
\end{aligned}$$

Приведем данную систему к стандартному виду линейной неоднородной системы алгебраических уравнений [166]:

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(-a_n M_{\varphi no} + i b_n N_{\varphi ne} \right) + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(a_n^{pacc} M_{\varphi no}^- - i b_n^{pacc} N_{\varphi ne}^- \right) = \\
& = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(-M_{\varphi no}^+ + i N_{\varphi ne}^+ \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n M_{\theta no} - i b_n N_{\theta ne}) + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (-a_n^{pacc} M_{\theta no}^- + i b_n^{pacc} N_{\theta ne}^-) = \\
& = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (M_{\theta no}^+ - i N_{\theta ne}^+); \\
& k_2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (-b_n M_{\varphi ne} - i a_n N_{\varphi no}) + \\
& + k_1 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n^{pacc} M_{\varphi ne}^- + i a_n^{pacc} N_{\varphi no}^-) = \\
& = k_1 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (-M_{\varphi ne}^+ - i N_{\varphi no}^+); \\
& k_2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n M_{\theta ne} + i a_n N_{\theta no}) + \\
& + k_1 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (-b_n^{pacc} M_{\theta ne}^- - i a_n^{pacc} N_{\theta no}^-) = \\
& = k_1 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (M_{\theta ne}^+ + i N_{\theta no}^+). \tag{2.10}
\end{aligned}$$

Как известно [166], подобные системы имеют единственное решение, если их дискриминант не равен нулю. Подстановка в (2.10) компонент собственных векторных функций $\vec{M}$ и $\vec{N}$, полученных из (2.2), (2.3), а именно:

$$M_{\varphi no}^+ = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \tag{2.11}$$

$$M_{\varphi no}^- = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \tag{2.12}$$

$$M_{\varphi no} = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.13)$$

$$M_{\theta no}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.14)$$

$$M_{\theta no}^- = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.15)$$

$$M_{\theta no} = \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.16)$$

$$M_{\varphi ne}^+ = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.17)$$

$$M_{\varphi ne}^- = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.18)$$

$$M_{\varphi ne} = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.19)$$

$$M_{\theta ne}^+ = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.20)$$

$$M_{\theta ne}^- = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.21)$$

$$M_{\theta ne} = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.22)$$

$$N_{\varphi no}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \frac{1}{\sin \theta} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.23)$$

$$N_{\varphi no}^- = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \frac{1}{\sin \theta} \left[H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.24)$$

$$N_{\varphi no} = \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} \frac{1}{\sin \theta} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.25)$$

$$N_{\theta no}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.26)$$

$$N_{\theta no}^- = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \left[H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.27)$$

$$N_{\theta no} = \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.28)$$

$$N_{\varphi ne}^+ = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \frac{1}{\sin \theta} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.29)$$

$$N_{\varphi ne}^- = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \frac{1}{\sin \theta} \left[H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.30)$$

$$N_{\varphi ne} = -\sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} \frac{1}{\sin \theta} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \sin \varphi; \quad (2.31)$$

$$N_{\theta ne}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.32)$$

$$N_{\theta ne}^- = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} \left[H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi; \quad (2.33)$$

$$N_{\theta ne} = \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} \left[J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi, \quad (2.34)$$

позволяет вычислить дискриминант системы (2.10) и убедиться в том, что он не равен нулю. Таким образом, неизвестные коэффициенты a_n , b_n , $a_n^{\delta\alpha\tilde{n}\tilde{n}}$ и $b_n^{\delta\alpha\tilde{n}\tilde{n}}$ можно вычислить однозначно, пользуясь, например, методом Крамера [166]. При этом:

$$a_n^{pacc} = \left\{ -\sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \left[\sqrt{k_1 R} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 R) \right]' + \right. \\ \left. + J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 R) \left[\sqrt{k_2 R} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \right]' \right\} \left\{ \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \left[\sqrt{k_1 R} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R) \right]' - \right. \\ \left. - H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R) \left[\sqrt{k_2 R} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \right]' \right\}^{-1}; \quad (2.35)$$

$$b_n^{pacc} = \left\{ -J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 R) \left[\sqrt{k_2 R} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \right]' + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \times \right. \\ \left. \times \left[\sqrt{k_1 R} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 R) \right]' \right\} \left\{ H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R) \left[\sqrt{k_2 R} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \right]' - \right. \\ \left. - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R) \left[\sqrt{k_1 R} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R) \right]' \right\}^{-1}; \quad (2.36)$$

$$a_n = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \frac{J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 R) + a_n^{pacc} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R)}; \quad (2.37)$$

$$b_n = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \frac{J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 R) + b_n^{pacc} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{J_{n+\frac{1}{2}}(k_2 R)}, \quad (2.38)$$

где R – радиус зерновки.

Из полученных результатов следует, что вначале необходимо вычислить коэффициенты отражения a_n^{pacc} и b_n^{pacc} , а затем по их значениям определить коэффициенты прохождения электромагнитного поля a_n и b_n внутрь зерновки.

Как следует из полученных выше выражений, все внешние и внутренние электромагнитные поля можно представить в виде разложения по пространственным гармоникам, амплитуды которых с ростом номера убывают, поэтому ограничимся вычислением лишь первой, наиболее существенной для практических вопросов гармонике. Именно она будет оказывать наиболее существенное влияние на протекание обменных процессов. В результате получаем расчетные формулы для амплитуд внутренних электромагнитных полей:

$$\begin{cases} \vec{E} = \frac{3}{2} i E_0 (a_1 \vec{M}_{1o} - i b_1 \vec{N}_{1e}); \\ \vec{H} = -i \frac{3k_2}{2\omega\mu_0} E_0 (b_1 \vec{M}_{1e} + i a_1 \vec{N}_{1o}), \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\text{где } a_1 = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \frac{J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) + a_1^{pacc} H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{J_{\frac{3}{2}}(k_2 R)}; \quad (2.40)$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \frac{J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) + b_1^{pacc} H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{J_{\frac{3}{2}}(k_2 R)}; \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} a_1^{pacc} = & \left\{ -\sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 R) \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_1 R)}{2\sqrt{k_1 R}} + \sqrt{k_1 R} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_1 R) - J_{\frac{5}{2}}(k_1 R)}{2} \right] + \right. \\ & + J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 R)}{2\sqrt{k_2 R}} + \sqrt{k_2 R} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_2 R) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 R)}{2} \right] \left. \right\} \left\{ \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 R) \times \right. \\ & \times \left[\frac{H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{2\sqrt{k_1 R}} + \sqrt{k_1 R} \frac{H_{\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R) - H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{2} \right] - \\ & \left. - H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R) \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 R)}{2\sqrt{k_2 R}} + \sqrt{k_2 R} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_2 R) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 R)}{2} \right] \right\}^{-1}; \quad (2.42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1^{pacc} = & \left\{ -J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 R)}{2\sqrt{k_2 R}} + \sqrt{k_2 R} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_2 R) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 R)}{2} \right] + \right. \\ & + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 R) \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) - J_{\frac{5}{2}}(k_1 R)}{2} \right] \left. \right\} \left\{ H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R) \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 R)}{2\sqrt{k_2 R}} + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sqrt{k_2 R} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_2 R) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 R)}{2} \left[- \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 R) \left[\frac{H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{2\sqrt{k_1 R}} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sqrt{k_1 R} \frac{H_{\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 R) - H_{\frac{5}{2}}^{(2)}(k_1 R)}{2} \right] \right]^{-1} ; \quad (2.43)
\end{aligned}$$

$$M_{\varphi 1_e^o} = - \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \cos \theta_{\cos}^{\sin} \varphi ; \quad (2.44)$$

$$M_{\theta 1_e^o} = \pm \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \cos \theta_{\sin}^{\cos} \varphi ; \quad (2.45)$$

$$N_{r 1_e^o} = \sqrt{\frac{2\pi}{k_2^3 r^3}} J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \sin \theta_{\cos}^{\sin} \varphi ; \quad (2.46)$$

$$N_{\varphi 1_e^o} = \pm \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{k_2 r} \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{2\sqrt{k_2 r}} + \sqrt{k_2 r} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r)}{2} \right] \cos \theta_{\sin}^{\cos} \varphi ; \quad (2.47)$$

$$N_{\theta 1_e^o} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{k_2 r} \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{2\sqrt{k_2 r}} + \sqrt{k_2 r} \frac{J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r)}{2} \right] \cos \theta_{\cos}^{\sin} \varphi \quad (2.48)$$

Подставляя значения векторных собственных функций (2.44) - (2.48), а также выражения, описывающие коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных полей внутрь зерновки (2.40) - (2.43), в систему (2.39),

получаем все компоненты как электрической, так и магнитной составляющей внутреннего ЭМП:

$$\begin{aligned}
 \vec{E} = i \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2k_2 r}} E_0 \left\{ a_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) (\vec{e}_\theta \cos \varphi - \vec{e}_\varphi \cos \theta \sin \varphi) - \right. \\
 \left. - i b_1 \left[\vec{e}_r \frac{2}{k_2 r} J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \sin \theta \cos \varphi + \right. \right. \\
 \left. + \vec{e}_\theta \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\cos \theta \cos \varphi}{2} - \right. \\
 \left. \left. - \vec{e}_\varphi \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\sin \varphi}{2} \right] \right\}; \quad (2.49)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \vec{H} = -i \frac{3}{2\omega\mu_0} \sqrt{\frac{\pi k_2}{2r}} E_0 \left\{ -b_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) (\vec{e}_\theta \sin \varphi + \vec{e}_\varphi \cos \theta \cos \varphi) + \right. \\
 \left. + i a_1 \left[\vec{e}_r \frac{2}{k_2 r} J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \sin \theta \sin \varphi + \right. \right. \\
 \left. + \vec{e}_\theta \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\cos \theta \sin \varphi}{2} + \right. \\
 \left. \left. + \vec{e}_\varphi \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\cos \varphi}{2} \right] \right\}. \quad (2.50)
 \end{aligned}$$

Из выражений (2.49), (2.50) окончательно получаем:

$$E_r = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2k_2^3 r^3}} E_0 b_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \sin \theta \cos \varphi; \quad (2.51)$$

$$E_\varphi = i3 \sqrt{\frac{\pi}{8kr_2}} E_0 \left[-a_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \cos \theta \sin \varphi + \right. \\ \left. + ib_1 \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\sin \varphi}{2} \right]; \quad (2.52)$$

$$E_\theta = i3 \sqrt{\frac{\pi}{8k_2 r}} E_0 \left[a_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \cos \varphi - \right. \\ \left. - ib_1 \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\cos \theta \cos \varphi}{2} \right]; \quad (2.53)$$

$$H_r = \frac{3}{\omega \mu_0} \sqrt{\frac{\pi}{2r^3 k_2}} E_0 a_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \sin \theta \sin \varphi; \quad (2.54)$$

$$H_\varphi = i \frac{3}{\omega \mu_0} \sqrt{\frac{\pi k_2}{8r}} E_0 \left[b_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \cos \theta \cos \varphi - \right. \\ \left. - ia_1 \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\cos \varphi}{2} \right]; \quad (2.55)$$

$$H_\theta = i \frac{3}{\omega \mu_0} \sqrt{\frac{\pi k_2}{8r}} E_0 \left[b_1 J_{\frac{3}{2}}(k_2 r) \sin \varphi - \right. \\ \left. - ia_1 \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right) \frac{\cos \theta \sin \varphi}{2} \right]. \quad (2.56)$$

Приведенные выше выражения описывают внутреннее электромагнитное поле внутри однородной зерновки сферической формы. Используя полученные результаты можно провести численный анализ этого распределения и дать теоретический прогноз значениям биотропных параметров электромагнитного поля, оказывающего положительное воздействие на облучаемый биологический объект.

2.2 Численный анализ полученных результатов

Расчеты были проведены для распределения по радиусу зерновки модуля амплитуды электрической составляющей прошедшего внутрь электромагнитного поля. С этой целью были использованы выражения (2.51) - (2.53). При этом модуль амплитуды вычисляется по формуле:

$$|\vec{E}| = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\varphi|^2 + |E_\theta|^2}. \quad (2.57)$$

После подстановки соответствующих значений составляющих E_r , E_φ , E_θ в (2.57) окончательно получаем соотношение, позволяющее провести его численный анализ:

$$|\vec{E}| = 3 \sqrt{\frac{\pi}{8k_2 r}} E_0 \left\{ J_{\frac{3}{2}}^2(k_2 r) \left[\frac{4b_1^2}{k_2^2 r^2} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + a_1^2 (\cos^2 \varphi + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi) \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right)^2 \frac{b_1^2}{4} (\cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \right\}. \quad (2.58)$$

При расчетах размеры зерновки и ее электрофизические характеристики были взяты такими, как указано выше. Амплитуда электрической составляющей падающего поля E_0 равнялась единице, что позволяет легко произвести перерасчет для любого конкретного ее значения. Для углов сферической системы координат взяты следующие значения: $\varphi = 0$, $\theta = \frac{\pi}{2}$. Данный выбор соответствует распределению поля вдоль положительного направления оси OX . Поскольку размеры зерновки, как было сказано, могут меняться от 0,4 до 0,6 мм, для получения качественных результатов были взяты минимальное и максимальное их значение.

Подстановка указанных значений углов φ и θ в выражение (2.58) приводит его к виду:

$$|\vec{E}| = 3 \sqrt{\frac{\pi}{8k_2 r}} E_0 J_{\frac{3}{2}}^2(k_2 r) \left(a_1^2 + \frac{4b_1^2}{k_2^2 r^2} \right) \quad (2.59)$$

или

$$|\vec{E}| = \frac{3}{k_2^3} \sqrt{\frac{\pi k_1}{8r^5}} E_0 \left[k_2^2 r^2 \left(J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) + a_1^{pacc} H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R) \right)^2 + 4 \left(J_{\frac{3}{2}}(k_1 R) + b_1^{pacc} H_{\frac{3}{2}}^{(2)}(k_1 R) \right)^2 \right]. \quad (2.60)$$

Вначале была исследована зависимость напряженности электрической составляющей поля в центре зерновки и на ее поверхности от частоты (рис. 2.2 – 2.5).

Для размера 0,4 мм экстремальное значение поля в центре наблюдается на частоте порядка 37,9 ГГц. Ширина этого резонансного всплеска по половине мощности равна примерно 200 МГц (рис. 2.2). Естественно, что в данном случае речь идет об одном из возможных пространственных резонансов. Кроме него имеют место и другие резонансные явления, но они происходят на более

высоких частотах, что затрудняет проникновение данных полей внутрь биологического объекта из-за их быстрого затухания. Кроме того, численный анализ показывает, что амплитуды более высоких гармоник значительно меньше и, соответственно, слабо влияют на обменные процессы, происходящие в зерновке растения.

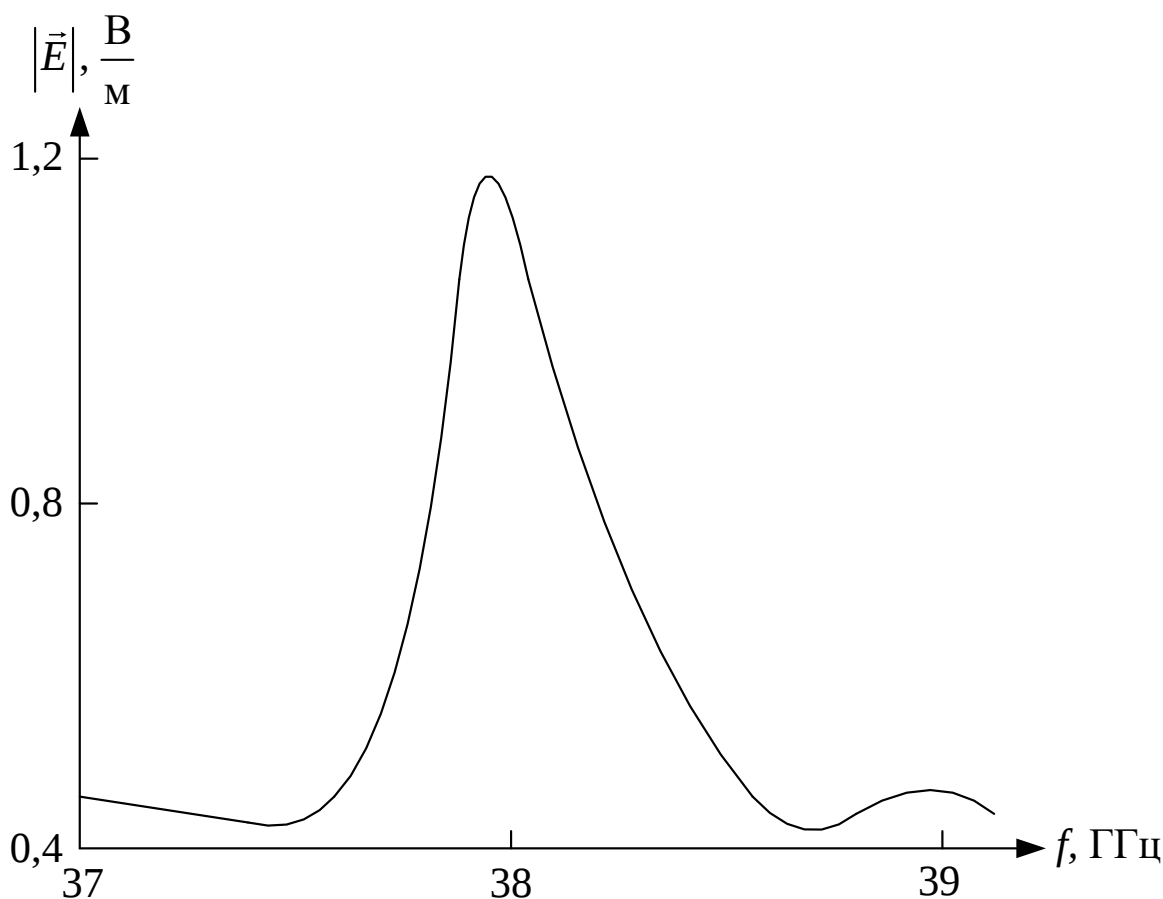


Рис. 2.2. Зависимость модуля напряженности электрического поля в центре зерновки от частоты, когда ее диаметр равен 0,4 мм

Анализ напряженности электрического поля на поверхности зерновки показывает, что в этой зоне резонансные явления появляются на более высоких частотах (38,6 ГГц) и их полоса шире (рис. 2.3). Данный факт может быть связан с тем, что при переходе электромагнитной волны из окружающей среды в зерновку и при проникновении сквозь ее мембрану

скачки относительной диэлектрической проницаемости приводят к появлению дополнительного слоя у внешней поверхности зерновки, в котором и появляются более высокочастотные резонансные пики.

Кстати, данное явление более эффективно воздействует на транспорт ионов, поскольку время их проникновения внутрь зерновки, как будет показано далее, становится ближе к периоду колебаний ЭМП КВЧ.

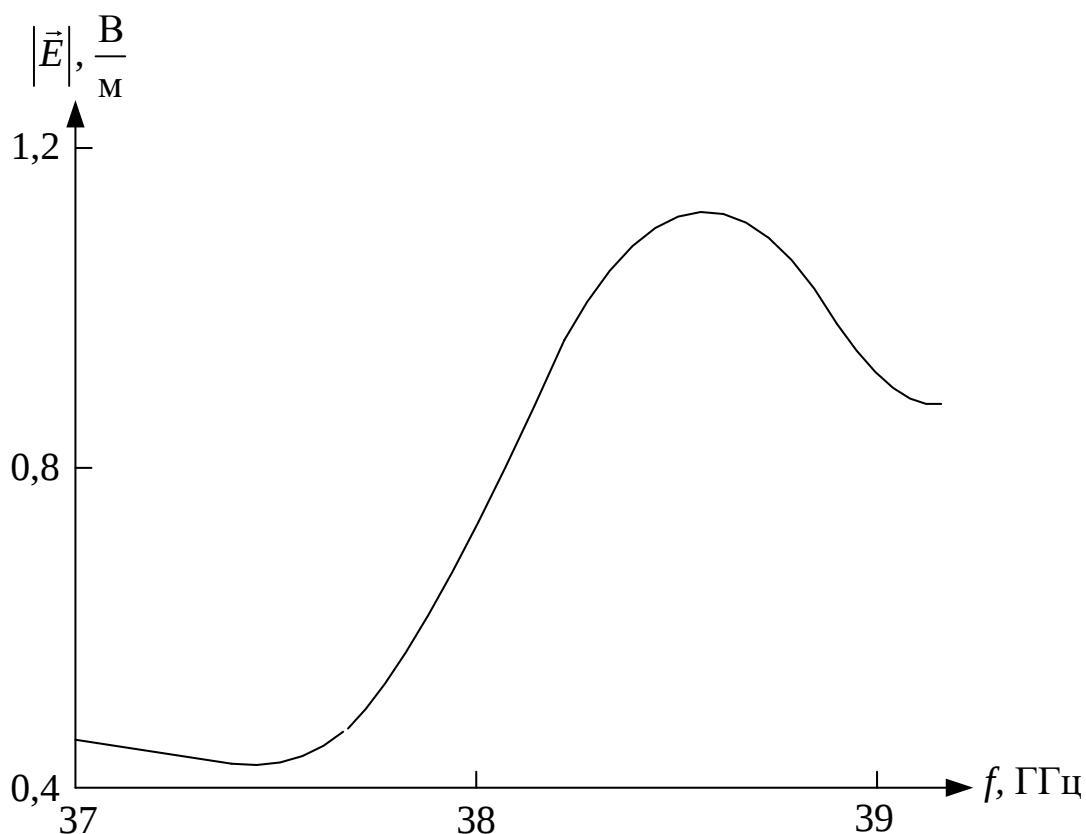


Рис. 2.3. Зависимость модуля напряженности электрического поля на поверхности зерновки от частоты, когда ее диаметр равен 0,4 мм

У зерновки, имеющий диаметр 0,6 мм, резонансные явления в ее центре появляются на частоте 37 ГГц, причем сам резонанс довольно узкий (рис. 2.4), и на поверхности резонанс смещается до частоты 37,2 ГГц (рис. 2.5).

Сравнивая полученные численные результаты можно сделать вывод, что с увеличением размера зерновки резонансные явления смещаются в сторону

более низких частот, как в центре, так и на ее поверхности. При этом сами резонансные пики становятся более высокими. Так у зерновки с диаметром 0,6 мм напряженность внутреннего электрического поля увеличивается от полутора до двух раз по сравнению с падающим полем. Увеличение размера зерновки приводит к сужению резонансных всплесков.

Зависимость величины резонансных частот от размеров зерновки объясняется самым понятием резонанса электромагнитной волны в замкнутом объеме.

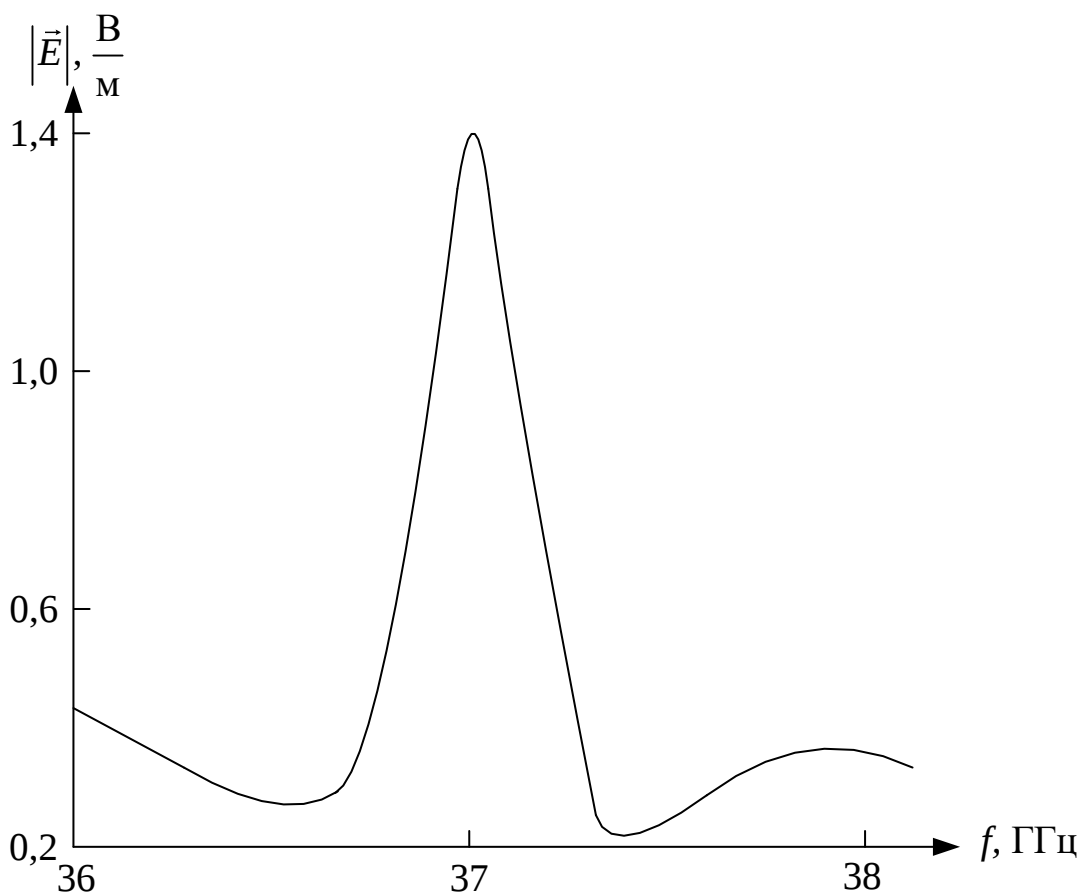


Рис. 2.4. Зависимость модуля напряженности электрического поля в центре зерновки от частоты, когда ее диаметр равен 0,6 мм

Что касается увеличения амплитуды электромагнитного поля в пиковом значении, то это связано с тем, что в большем объеме происходит накопление большей энергии. Следовательно, результат электромагнитного

воздействия на зерновку большего размера будет проявляться более существенно.

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно сказать, что резонансные явления внутри зерновок семян сельскохозяйственных культур лежат в диапазоне 37...38 ГГц, что ставит соответствующие требования к используемой для стимуляции растений аппаратуре.

Естественно, что более точное значение частот стимулирующего электромагнитного поля должно определяться экспериментально, и эти частоты могут существенно изменяться в зависимости от типа облучаемого растения.

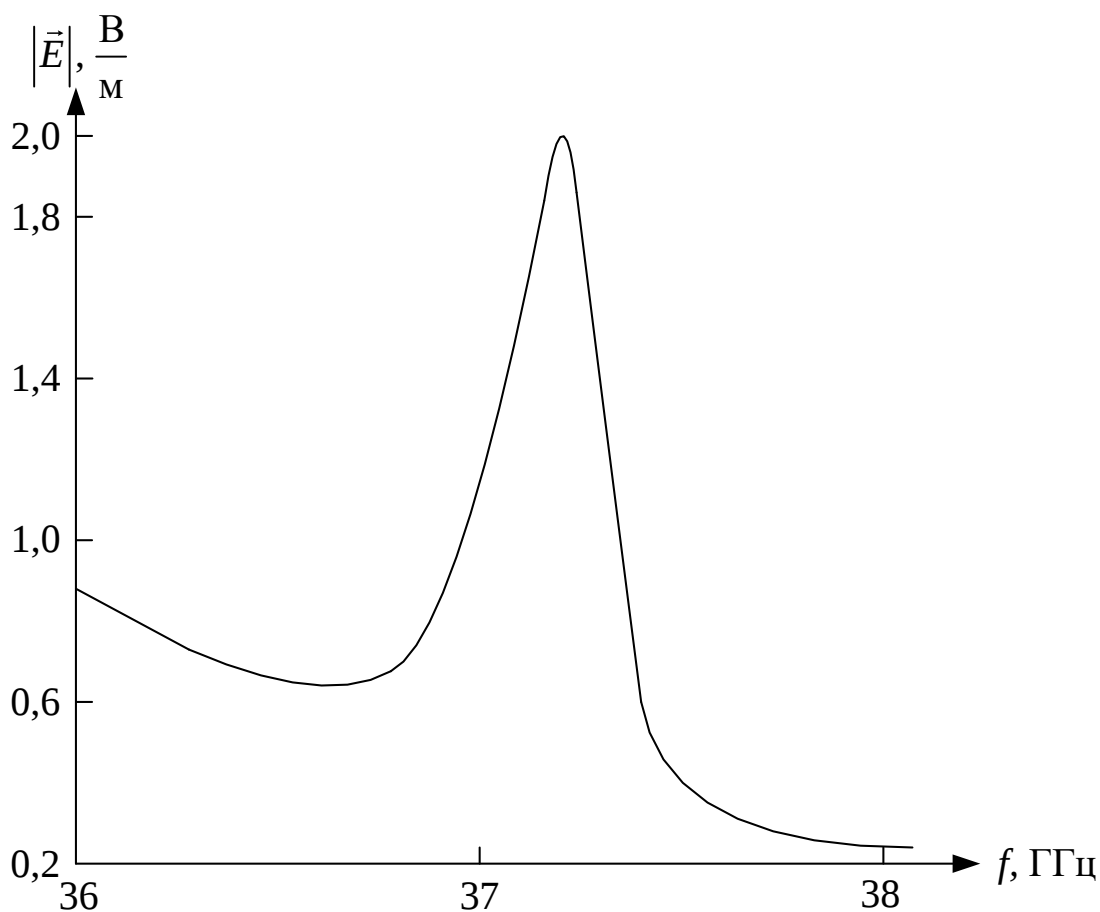


Рис. 2.5. Зависимость модуля напряженности электрического поля на поверхности сферической клетки от частоты, когда ее диаметр равен 0,6 мм

Рассмотрим теперь, как распределяется модуль напряженности электрической составляющей поля внутри зерновки по ее радиусу. В том случае, когда речь идет о зерновке, диаметр которой равен 0,4 мм, результаты расчетов представлены на рис. 2.6.

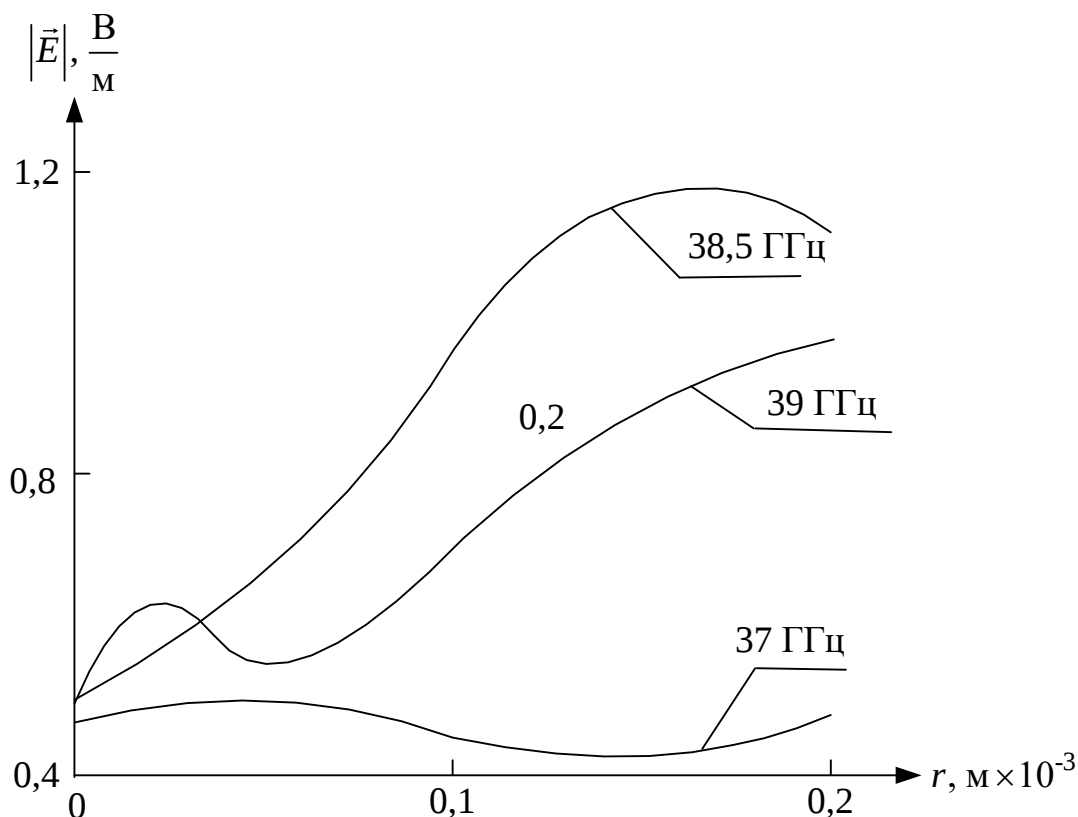


Рис. 2.6. Распределение модуля напряженности электрического поля по радиусу зерновки, когда ее диаметр равен 0,4 мм

Из графика следует, что наиболее благоприятной частотой для воздействия на семена сельскохозяйственных культур, имеющих зерновки указанного размера, является частота 38,5 ГГц. Именно на этой частоте напряженность электрического поля на поверхности зерновки наибольшая. Следовательно, именно в этом случае буде оказано наиболее существенное воздействие на обменные процессы, происходящие внутри зерновки, а, следовательно, и на жизненные процессы, происходящие внутри растения.

При смещении частоты внешнего электромагнитного поля в более длинноволновый или более коротковолновый диапазон напряженность электрической составляющей внутреннего поля падает, и эффективность электромагнитной стимуляции снижается. При этом видно, что все-таки более приемлемым является смещение в коротковолновый диапазон. Во-первых, при этом не так существенно уменьшается амплитуда внутреннего поля, а во-вторых, более высокие частоты, о чем будет сказано ниже, становятся более сравнимыми со временем движения ионов внутрь зерновки.

Если диаметр зерновки равен 0,6 мм, то картина несколько меняется (рис. 2.7).

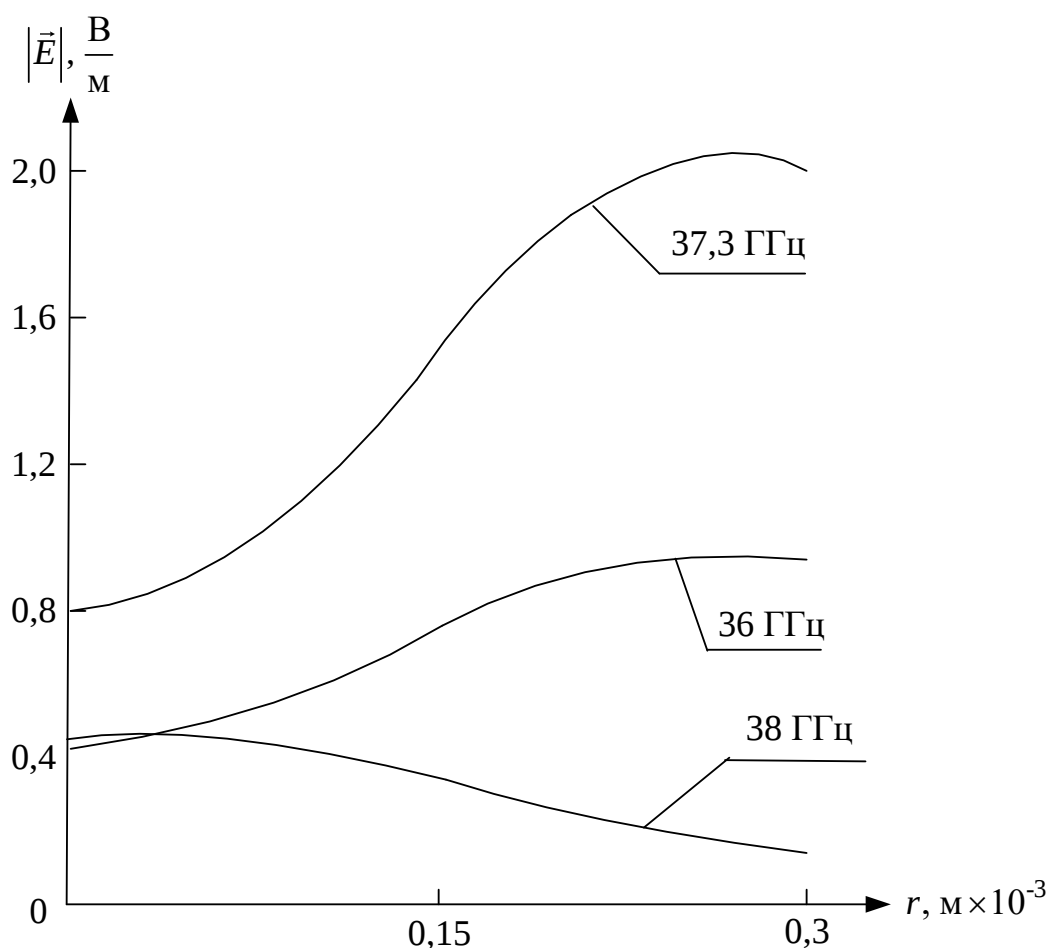


Рис. 2.7. Распределение модуля напряженности электрического поля по радиусу зерновки, когда ее диаметр равен 0,6 мм

Наиболее благоприятной частотой воздействия на растение в данном случае является, очевидно, частота, равная 37,3 ГГц, что говорит о достаточно большом разбросе частот стимулирующего электромагнитного воздействия в зависимости от типа сельскохозяйственной культуры и геометрических характеристик ее клеточной структуры.

Таким образом, представленные графики уточняют результаты расчетов, показанных на рис. 2.2 - 2.5. Из них следует, что предположительный частотный диапазон электромагнитного воздействия на растения с зерновками, размер которых колеблется от 0,4 мм до 0,6 мм, лежит в диапазоне 37,3...38,5 ГГц. Еще раз подчеркнем, что экспериментально этот диапазон должен быть уточнен, поскольку и размеры зерновок и их электрофизические характеристики могут существенно меняться при рассмотрении различных типов сельскохозяйственных культур.

2.3 Учет отклонения формы зерновки от сферической

Выше было рассмотрено теоретическое и численное решение задачи о распределении электромагнитных полей внутри зерновки, имеющей сферическую форму. Однако на практике зерновка чаще всего имеет форму, несколько отличающуюся от сферической, то есть имеет определенную деформацию. Выясним, каким образом данная деформация влияет на распределение внутренних электромагнитных полей, и не будет ли она существенно влиять на полученные выше результаты по определению частоты воздействующего поля. С этой целью воспользуемся методом, описанным в работах [166, 167].

Рассмотрим область, которая близка к сферической. В этом случае поверхность этой области можно представить в виде сферы с небольшими колебаниями ее радиуса, подчиняющимися в простейшем случае синусоидальному закону:

$$r[1 + \alpha(\sin l\varphi + \sin m\theta)] = R, \quad (2.61)$$

где r, φ, θ – сферические координаты;

α – малый параметр, характеризующий отклонение поверхности зерновки от сферы и не менее, чем на порядок меньший линейных размеров радиуса клетки;

R – радиус сферы;

l, m – количество периодов колебаний, укладываемых на одном полном обходе сферы в плоскости XOY и YOZ соответственно (рис. 2.1).

Введем новые переменные ρ, β, γ по следующему правилу:

$$\begin{aligned} \rho &= r[1 + \alpha(\sin l\varphi + \sin m\theta)]; \\ \beta &= \varphi; \\ \gamma &= \theta. \end{aligned} \quad (2.62)$$

На основании введенных координат можно утверждать, что область деформированной зерновки превращается в сферу $\rho = R$.

Действительно, новые угловые координаты β и γ совпадают со старыми координатами φ и θ , а новый постоянный радиус $\rho = R$ связан со старым переменным на основе соотношения

$$r = \frac{\rho}{1 + \alpha(\sin l\varphi + \sin m\theta)} = \frac{R}{1 + \alpha(\sin l\varphi + \sin m\theta)}. \quad (2.63)$$

Очевидно, что введенная система координат производит преобразование деформированной сферы в сферу с постоянным радиусом.

В этом случае выражения (2.51) - (2.56) будут содержать малый параметр α , входящий в первое соотношение (2.62). Разложим (2.51) - (2.56)

в степенной ряд по данному малому параметру [168]. Воспользуемся при этом известными соотношениями, связывающими между собой функцию Бесселя полуцелого порядка и тригонометрические функции [169]:

$$J_{\frac{1}{2}}(z) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sin z}{\sqrt{z}}; \quad (2.64)$$

$$J_{\frac{3}{2}}(z) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{\sin z}{z} - \cos z \right)}{\sqrt{z}}; \quad (2.65)$$

$$J_{\frac{5}{2}}(z) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{3 \sin z}{z^2} - \sin z - \frac{3 \cos z}{z} \right)}{\sqrt{z}}, \quad (2.66)$$

где в качестве z у нас выступает $k_2 r$ или $k_1 r$.

Как известно [168], разложение произвольной функции $f(x)$, непрерывной вместе со всеми своими производными в точке x_0 и некоторой ее окрестности, в степенной ряд Тейлора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} (x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!} (x - x_0)^2 + \dots + \\ + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n + \dots \end{aligned} \quad (2.67)$$

В рассматриваемом нами случае как функция (2.63), которая входит в $k_2 r$ и $k_1 r$, так и тригонометрические функции в выражениях (2.64) - (2.66) удовлетворяют требованиям непрерывности и дифференцируемости в окрестности точки $r = R$. Следовательно, разложение в степенной ряд всех

составляющих электромагнитного поля внутри зерновки произвести возможно.

В процессе разложения ограничимся членами, которые линейны относительно параметра α , то есть возьмем нулевой и первый член ряда (2.67). При этом для функции (2.63) будет использоваться биномиальный ряд:

$$(1+x)^m = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \frac{m(m-1)(m-2)}{3!}x^3 + \dots,$$

для функции $\sin z$ – ряд

$$\sin z = \sin z_0 + \cos z_0(z - z_0) - \sin z_0(z - z_0)^2 - \dots$$

для функции $\cos z$ – ряд

$$\cos z = \cos z_0 - \sin z_0(z - z_0) - \cos z_0(z - z_0)^2 + \dots$$

В результате использования указанных выше формул получаем следующие выражения для электрических и магнитных составляющих внутреннего поля зерновки:

$$E_r = \frac{3E_0 b_1}{k_2^2 r^2} \sin \theta \cos \varphi \left\{ \frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \\ \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + 3 \cos k_2 r \right] \right\}; \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned}
E_{\varphi} = & i \frac{3E_0}{2k_2 r} \left\{ a_1 \sin \varphi \cos \theta \left[\cos k_2 r - \frac{\sin k_2 r}{k_2 r} + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(\frac{2}{k_2 r} - k_2 r \right) - 2 \cos k_2 r \right] + \\
& + i b_1 \sin \varphi \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\}; \quad (2.69)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\theta} = & i \frac{3E_0}{2k_2 r} \left\{ a_1 \cos \varphi \left[\frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{2}{k_2 r} \right) + 2 \cos k_2 r \right] - \\
& - i b_1 \cos \varphi \cos \theta \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\}; \quad (2.70)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_r = & \frac{3E_0 a_1}{\omega \mu_0 k_2 r^2} \sin \theta \sin \varphi \left\{ \frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \\
& \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + 3 \cos k_2 r \right] \right\}; \quad (2.71)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{\varphi} = i \frac{3E_0}{2\omega\mu_0 r} & \left\{ b_1 \cos\theta \cos\varphi \left[\frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{2}{k_2 r} \right) + 2 \cos k_2 r \right] - \\
& - i a_1 \frac{\cos\varphi}{2} \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\}; \quad (2.72)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{\theta} = i \frac{3E_0}{2\omega\mu_0 r} & \left\{ b_1 \sin\varphi \left[\frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{2}{k_2 r} \right) + 2 \cos k_2 r \right] - \\
& - i a_1 \frac{\sin\varphi \cos\theta}{2} \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\}. \quad (2.73)
\end{aligned}$$

В отличие от выражений (2.51) - (2.56), полученных в п. 2.1, соотношения (2.68) - (2.73) позволяют выяснить, каким образом влияет на распределение внутренних электромагнитных полей в зерновке ее деформация. Очевидно, что степень искажения рассматриваемого распределения будет зависеть от степени деформации, то есть от величины параметра α .

На основании выражения (2.57) были проведены расчеты зависимости амплитуды электрической составляющей поля внутри деформированной зерновки от частоты падающего поля. При расчетах величина коэффициентов l и m бралась равной единице, что соответствует сжатию клетки вдоль осей OY

и OZ , $\alpha = 0,1R$. Так же как и в предыдущих расчетах было взято направление $\varphi = 0$, $\theta = \frac{\pi}{2}$, что позволяет сравнить между собой результаты п. 2.2 и представленные ниже.

Результаты получены для зерновок, диаметр которых колебался около 0,4 мм и 0,6 мм. Указанные графики представлены на рис. 2.8 и показывают зависимость модуля амплитуды электрической составляющей внутреннего электромагнитного поля в центре зерновки.

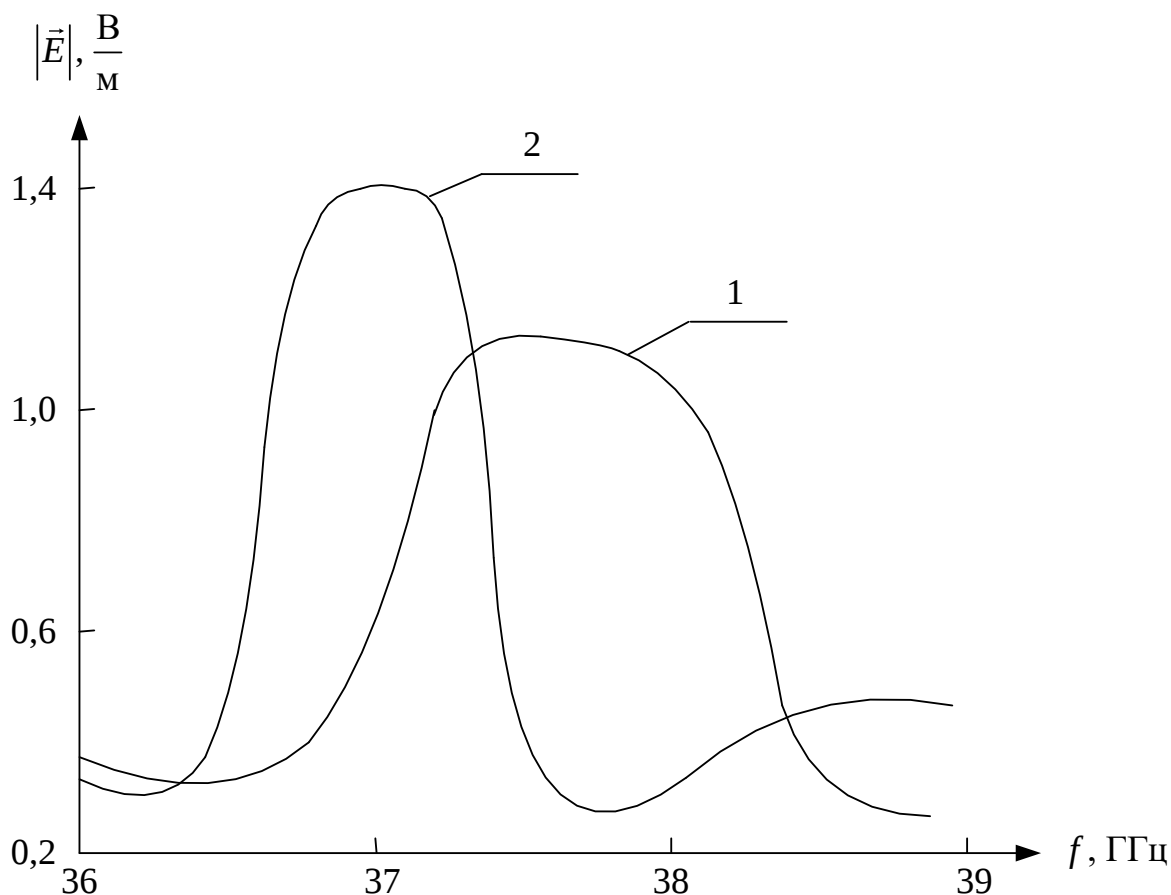


Рис. 2.8. Зависимость модуля электрической составляющей внутреннего ЭМП в центре деформированной зерновки от частоты:

1 – средний диаметр зерновки равен 0,4 мм;

2 – средний диаметр зерновки равен 0,6 мм

Сравнивая полученные результаты с зависимостью амплитуды электрической составляющей ЭМП в центре недеформированной зерновки (рис. 2.2, 2.4), можно сделать вывод, что деформация ведет к расширению резонансной полосы и некоторому смещению центра этой полосы в сторону более низких частот. Анализ данного факта показал, что увеличение степени деформации, то есть величины α , постепенно размывает явление резонанса, как с точки зрения его полосы, так и амплитуды. Но при этом значения центральных частот находятся в диапазоне 37...38 ГГц и могут быть уточнены в результате экспериментальных исследований. Расширение резонансной полосы связано с тем, что вместо строгого линейного размера (радиуса) недеформированной сферы появляется определенный диапазон изменений этого радиуса, что, в свою очередь, ведет к одновременным резонансам на разных частотах. Данный результат аналогичен случаю понижения добротности резонатора.

Вместе с тем необходимо отметить и зависимость максимальных амплитуд внутри зерновки от ее размеров. Так при уменьшении среднего диаметра зерновки от 0,6 мм до 0,4 мм максимальная амплитуда уменьшается от 1,4 до 1,1 - 1,2 значения амплитуды внешнего электромагнитного поля. Следовательно, так же как и сказано выше (п. 2.2), более существенное влияние от электромагнитного воздействия испытывают на себе зерновки с большими размерами.

Итак, проведенные на основе представленной математической модели расчеты распределения внутренних электромагнитных полей в деформированных зерновках позволили определить тот диапазон частот, который можно использовать для более существенного воздействия на обменные процессы, происходящие внутри этих зерновок. Из полученных результатов следует, что деформация зерновки не приводит к существенному изменению величины центральной резонансной частоты, но увеличивает полосу резонанса. Это увеличение тем больше, чем больше степень деформации.

2.4. Воздействие низкоэнергетического электромагнитного излучения на транспорт питательных веществ в клетках растений

Представленные выше математические модели и проведенные на основании их расчеты зависимости амплитуды электрической составляющей воздействующего на зерновки растений внутреннего электромагнитного поля позволяют сделать следующий шаг, а именно, выяснить, каким же образом данные поля влияют на процессы переноса питательных веществ через мембрану клеток данных зерновок.

Как известно [170], каждая клетка растений снаружи окружена мембраной. Эта мембрана играет чрезвычайно важную роль в регулировании состава клеточного содержимого, так как через нее в клетку поступают все питательные вещества и выходят наружу все отходы или продукты секреции, причем интенсивность этих процессов определяет жизненную активность растения. Практически все функции клеток связаны с процессами мембранного транспорта [171]. Поэтому важнейшим условием существования клетки, а, следовательно, и оптимального развития зерновки и самого растения является нормальное функционирование биологических мембран.

Химическая и физическая природа мембраны выяснена еще не до конца. Согласно имеющимся исследованиям [171, 172], это трехслойная пленка толщиной около 10 - 12 нм. Наружный и внутренний слои, каждый толщиной около 2 - 3 нм, состоят из белка, а между ними лежит слой фосфолипидных молекул, имеющий толщину порядка 3,5 нм (рис. 2.9).

Мембрана клетки пронизана микроскопическими порами или каналами, через которые проходят определенные вещества [172]. Возможность прохождения вещества через мембрану зависит не только от величины молекул, но и от электрического заряда диффундирующей частицы, от присутствия и числа молекул воды, связанных с поверхностью

этих частиц, от растворимости частиц в липидах и от присутствующего на поверхности мембраны электрического

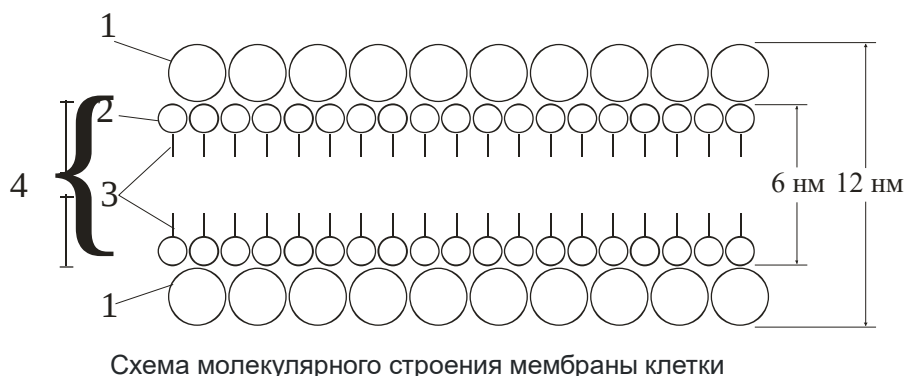


Рис. 2.9. Схема, иллюстрирующая молекулярное строение биологических мембран:

- 1 - молекулы белка;
- 2 - гидрофильная часть молекулы;
- 3 – углеводородные цепи;
- 4 - двойной слой фосфолипидных молекул

потенциала [171]. Таким образом, полученные выше результаты по распределению электромагнитного поля внутри клетки, а, следовательно, и на ее поверхности при соответствующей стимуляции растения дадут возможность выяснить, как меняется проникновение внутрь клетки питательных веществ при наличии увеличившегося электрического потенциала. Это, в свою очередь, и является причиной активизации процессов жизнедеятельности растения.

У растений многие клетки имеют, кроме того, толстую клеточную стенку, состоящую из целлюлозы и лежащую снаружи от плазматической мембраны. Клеточная стенка имеет мельчайшие отверстия, через которые протоплазма одной клетки соединяется с протоплазмой других, соседних с ней клеток. Через эти отверстия вещества могут переходить из одной клетки в другую, регулируя и поддерживая тем самым активность процессов во всем растении.

Рассмотрим вначале, каким образом формируется электрический ток свободных радикалов и ионов через мембрану клетки без наличия стимулирующего влияния внешнего низкоэнергетического электромагнитного поля. Данный ток является следствием ионного транспорта сквозь мембрану, который может быть активным и пассивным [172-174]. Для описания этого транспорта удобно использовать подход, основанный на электродиффузионной модели. В рамках данной модели мембрана представлена в виде непрерывной гомогенной среды, в которой происходит диффузия точечных невзаимодействующих частиц [172].

Пусть ионы какого-либо типа i двигаются сквозь мембрану, перпендикулярно ее поверхности, совпадающей с направлением $\vec{l}$. Тогда плотность тока этих ионов J_i определяется выражением:

$$J_i = n_i u_i \left(-\frac{d\mu_i}{dl} \right), \quad (2.74)$$

где n_i – концентрация ионов;

u_i – подвижность ионов;

μ_i – электрохимический потенциал ионов данного типа.

Электрохимический потенциал определяется выражением:

$$\mu_i = \mu_{i0} + k_B T \ln n_i + z_i e \varphi, \quad (2.75)$$

где μ_{i0} – стандартный химический потенциал, зависящий от природы жидкой среды;

k_B – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

z_i – валентность иона;

e – заряд электрона;

φ – электрический потенциал на мембране клетки.

Чтобы получить плотность тока ионов, продифференцируем выражение (2.75) по l :

$$\frac{d\mu_i}{dl} = k_B T \frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dl} + z_i e \frac{d\varphi}{dl} \quad (2.76)$$

и подставим (2.76) в (2.74). Тогда:

$$J_i = -u_i \left(k_B T \frac{dn_i}{dl} + z_i n_i e \frac{d\varphi}{dl} \right). \quad (2.77)$$

Данное выражение описывает диффузию ионов в гомогенной мембране под воздействием существующего в ней потенциала и является не чем иным, как уравнением Нернста–Планка [171, 172].

Чтобы получить величину тока ионов I_i сквозь мембрану клетки необходимо, очевидно, умножить плотность тока (2.77) на площадь поверхности мембраны S . Поскольку мембрану можно рассматривать как поверхность сферы с радиусом R , то есть $S = 4\pi R^2$, то

$$I_i = -4\pi R^2 u_i \left(k_B T \frac{dn_i}{dl} + z_i n_i e \frac{d\varphi}{dl} \right). \quad (2.78)$$

Выясним теперь, каким образом изменятся выражения (2.77), (2.78), если появляется внешнее сверхвысокочастотное электромагнитное поле, призванное активизировать происходящие в клетках процессы. Очевидно, что в уравнении Нернста - Планка должен добавиться дополнительный член, характеризующий поток различных ионов, возникший вследствие

действия СВЧ - излучения. Это вызвано тем, что ионы, будучи заряженными частицами, начинают взаимодействовать с внешним полем, что меняет характер их движения.

Как показали исследования клеточных суспензий, диэлектрические свойства тканей и клеточных суспензий в области радиочастот определяются мембранами [175], которые играют существенную роль в процессах поляризации биологической среды. Интерпретация полученных данных облегчается сравнительно простой формой, которую имеют клетки. Основной механизм диэлектрической поляризации в радиочастотном диапазоне связан с накоплением на мембранах зарядов из вне- и внутриклеточных жидкостей. Для сферических частиц такой механизм удастся описать проще всего.

Результаты проведенных исследований приводят к важному выводу о том, что удельная емкость всех биологических мембран по порядку величины составляет $1 \frac{\epsilon \hat{O}}{\tilde{\omega}^2}$. Это значение практически не зависит от частоты во всем радиочастотном диапазоне.

Исходя из значения удельной емкости мембран, можно оценить величину разности потенциалов на мембране, возникающей в сверхвысокочастотном поле. При интенсивности внешнего источника СВЧ излучения около $10 \frac{\epsilon \hat{A} \hat{O}}{\tilde{\omega}^2}$ разность потенциалов на мембране может достигать 50 мкВ. Согласно литературным источникам [171], такие разности потенциалов оказывают существенное биологическое воздействие на жизненные процессы, происходящие в клетке.

Чтобы оценить вклад, который дает внешнее электромагнитное поле в величину тока ионов, проходящих через мембрану клетки, сравним время движения сквозь мембрану с периодом падающего поля. При величине разности потенциалов от 10 до 100 мВ [171, 176], время движения, например, ионов хлора сквозь мембрану клетки лежит в

диапазоне $0,19 \cdot 10^{-12} \dots 0,43 \cdot 10^{-11}$ с. В то же время период колебаний электромагнитного поля с частотой 37 ГГц равен примерно $0,27 \cdot 10^{-12}$ с. Приведенные цифры, в частности, подтверждают, что на транспорт ионов более существенное влияние оказывает коротковолновая часть резонансных пиков, возникающих в зерновке. Это означает, что при рассмотрении процессов жизнедеятельности клетки необходимо учитывать токи, создаваемые высокочастотными полями. Наличие вязкой среды уменьшает среднюю скорость перемещения ионов, что приводит к уменьшению величины конвекционного тока, но мало влияет на изменение значений тока смещения, вызываемого наличием высокочастотного поля.

Учитывая вышесказанное, следует сделать вывод, что плотность тока ионов $j_{\text{и}}^{\text{и}}$, вызванная внешним электромагнитным полем, будет равна сумме плотности тока проводимости $j_{\text{и}}^{\text{д}}$ и тока смещения $j_{\text{и}}^{\text{с}}$.

Учитывая, что процессы, происходящие в мембране, рассматриваются в зависимости от одной координаты $\vec{l}$, полная плотность тока ионов равна:

$$j_{\text{ЭМП}} = j_{\text{пр}} + j_{\text{см}} = -\sigma E - \frac{\varepsilon_{\text{м}} \varepsilon_0 \partial E}{\partial t} \quad (2.79)$$

где σ – проводимость мембраны;

$\varepsilon_{\text{и}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость мембраны;

E – напряженность электрической составляющей падающего электромагнитного поля поперек мембраны;

t – время.

В (2.79) знак минус связан с направлением вектора электрического поля и тем, что рассматривается движение отрицательно заряженных ионов.

Переходя от выражения для плотности тока к выражению для силы тока, получаем:

$$I_{\text{ЭМП}} = -4\pi R^2 \left[\sigma E + \varepsilon_m \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right]. \quad (2.80)$$

Именно это слагаемое и должно быть добавлено к выражению (2.78), чтобы учесть влияние внешнего сверхвысокочастотного электромагнитного поля на ионный ток сквозь мембрану клетки:

$$I_i = -4\pi R^2 \left(k_B T u_i \frac{dn_i}{dl} + z_i n_i e u_i \frac{d\varphi}{dl} + \sigma E + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right). \quad (2.81)$$

В (2.81) первое слагаемое описывает составляющую полного тока, обусловленную градиентом концентрации, второе – градиентом статического потенциала, третье и четвертое – наличием внешнего СВЧ поля. Уравнение для тока положительных ионов получается аналогично. Значение величины электрической составляющей напряженности ЭМП в клетке определяется выражением (2.57) для этой составляющей внутри зерновки, то есть $E = |\vec{E}|$, где компоненты E_r , E_φ , E_θ берутся либо для случая сферической (2.51) - (2.53), либо деформированной (2.68) - (2.70) зерновки. В случае сферической зерновки, как показано выше (2.58), для первой гармоники

$$|\vec{E}| = 3 \sqrt{\frac{\pi}{8k_2 r}} E_0 \left\{ J_{\frac{3}{2}}^2(k_2 r) \left[\frac{4b_1^2}{k_2^2 r^2} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + a_1^2 (\cos^2 \varphi + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi) \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{J_{\frac{3}{2}}(k_2 r)}{k_2 r} + J_{\frac{1}{2}}(k_2 r) - J_{\frac{5}{2}}(k_2 r) \right)^2 \frac{b_1^2}{4} (\cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \right\}.$$

Значения концентрации ионов различного типа и статического потенциала берутся из литературных источников (например, [170, 171, 176, 177]).

Используя полученные выражения, становится возможным, зная значения электрофизических характеристик среды, подвижности ионов и удельной проводимости, произвести расчет силы тока ионов через мембраны клеток с помощью выражения (2.81).

Ниже приведены результаты численного моделирования зависимости тока ионов натрия через мембрану растительной клетки по соотношению (2.81) при температуре 37 °C ($T = 310$ K).

На представленных ниже графиках изображена зависимость ионного тока натрия от пространственной координаты l , причем значение $l = 0$ м соответствует поверхности мембраны, граничащей с внешней средой, а $l = 10^{-8}$ м – с внутренней.

Прямая 1 на рис. 2.10, показывает зависимость ионного тока натрия от пространственной координаты при отсутствии внешнего СВЧ поля, кривые 2, 3 и 4 отражают ту же зависимость при наличии поля с частотой 37,3 ГГц и разными плотностями потока мощности. Расчеты проведены для недеформированной сферической зерновки с диаметром 0,6 мм.

Из рис. 2.10, в частности, следует, что падающее СВЧ поле с плотностью потока мощности меньше $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ практически не оказывает влияния на величину ионного тока. С другой стороны, увеличение плотности потока мощности падающего поля до $20 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ резко увеличивает силу ионного тока (почти в шесть раз), что, в свою очередь, может привести к пробою мембраны и, соответственно, к разрушению клеток зерновки и гибели растения.

На рис. 2.11 приведена зависимость ионного тока натрия от пространственной координаты при постоянной плотности потока мощности

падающего поля равной $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, но при разных его частотах. Данный график подтверждает полученные выше результаты об оптимальной частоте воздействия падающего низкоэнергетического электромагнитного поля на сельскохозяйственные растения, когда их зерновки имеют размер, равный 0,6 мм. Эта частота находится в окрестности 37,3 ГГц.

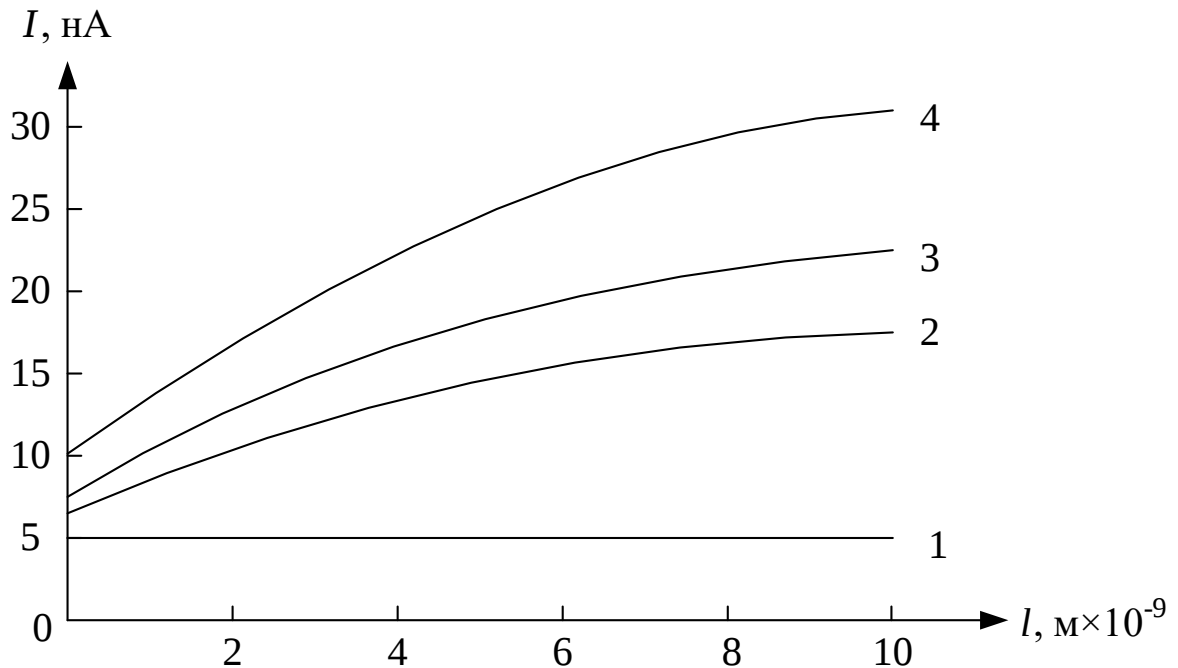


Рис. 2.10. Зависимость ионного тока натрия от пространственной координаты:

1 – при отсутствии внешнего СВЧ поля;

2 – внешнее СВЧ поле имеет плотность потока мощности $10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

3 – внешнее СВЧ поле имеет плотность потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

4 – внешнее СВЧ поле имеет плотность потока мощности $20 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Из анализа графиков на рис. 2.10, 2.11 следует, что сила ионного тока на внутренней поверхности мембраны больше, чем на внешней, что можно

объяснить большими значениями концентраций ионов внутри клетки, чем на ее внешней поверхности. При этом на резонансной для этого размера зерновки частоте 37,3 ГГц происходит наибольшее возрастание ионного тока. Следует также подчеркнуть, что именно в этом диапазоне частот время прохождения иона сквозь мембрану и период СВЧ колебания примерно равны друг другу,

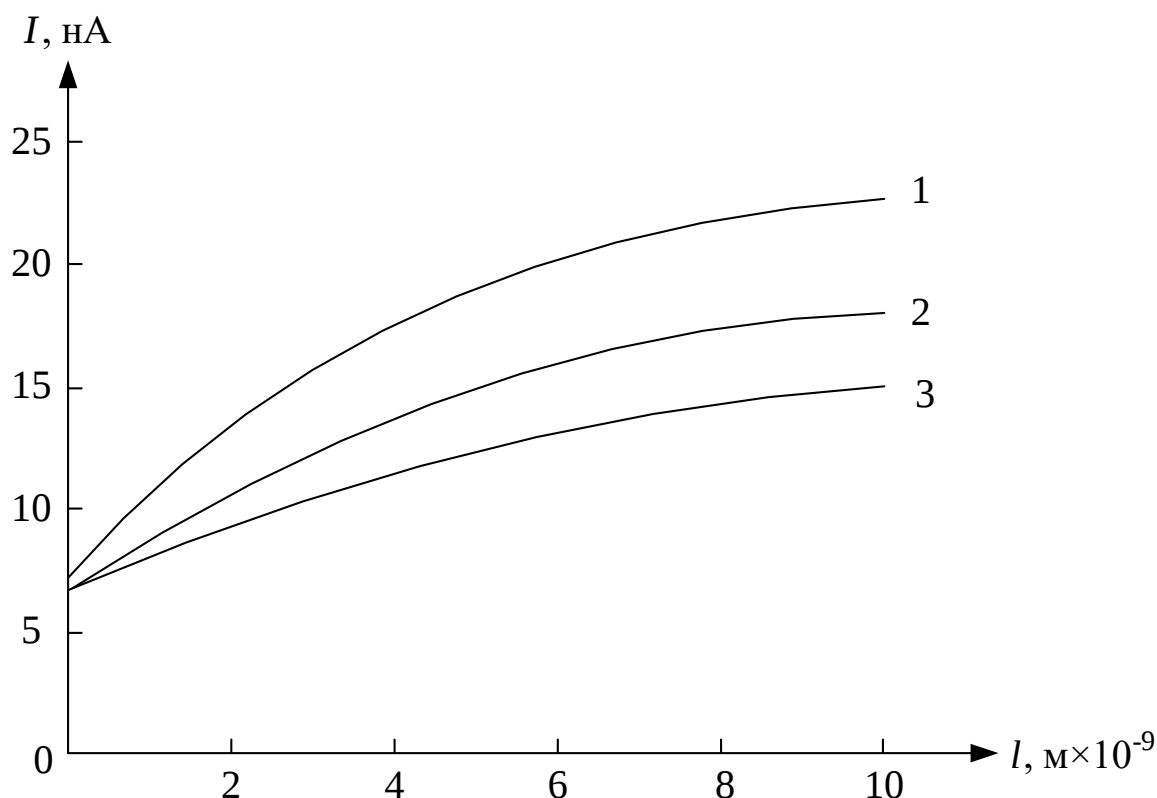


Рис. 2.11. Зависимость тока ионов натрия от пространственной координаты при плотности потока мощности падающего поля $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$:

1 – частота падающего поля 37,3 ГГц;

2 – частота падающего поля 37,0 ГГц;

3 – частота падающего поля 37,6 ГГц

что еще более усиливает эффект влияния внешнего ЭМП на обменные процессы клетки. Полученный результат подтверждает и зависимость тока

ионов натрия в мембране клетки от частоты падающего поля при постоянной плотности потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ на глубине 6 нм (рис. 2.12).

Таким образом, полученные в данном разделе результаты подтверждают факт влияния внешнего низкоэнергетического электромагнитного поля сверхвысокой и крайне высокой частоты на обменные процессы в клетках, которые связаны с изменением скорости переноса ионов из внешней среды внутрь клетки. При этом наиболее эффективно данное влияние на частотах, лежащих в окрестности 37,3 ГГц для зерновок с линейными размерами 0,6 мкм, и на частотах порядка 38,5 ГГц для зерновок с линейными размерами 0,4 мкм. Плотности потока мощности при этом должны лежать в диапазоне $10 \dots 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

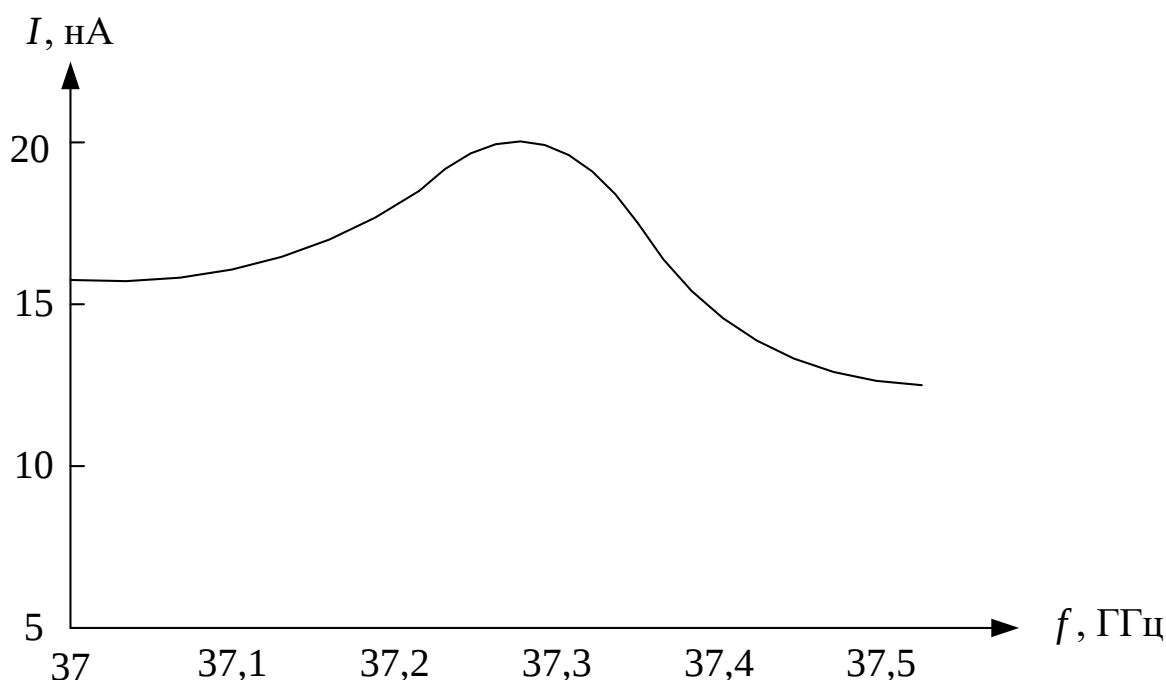


Рис. 2.12. Зависимость тока ионов натрия в мембране клетки от частоты падающего поля при постоянной плотности потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ и постоянной глубине 6 нм

Следует иметь в виду, что полученные выше результаты будут отличаться друг от друга для различных типов ионов. Для более точного определения зависимости тока ионов различных типов от частоты падающего поля и плотности потока мощности можно воспользоваться методикой, приведенной в [172,175].

В приближении постоянного поля $\frac{\partial \varphi}{\partial l} = \text{const}$ решение уравнения

Нернста-Планка дает выражение для силы ионного тока I_i :

$$I_i = 4\pi R^2 \frac{z_i^2 F^2 \varphi P_i}{RT} \frac{n_i^{\text{ext}} - n_i^{\text{int}} e^{\frac{z_i F \varphi}{RT}}}{1 - e^{\frac{z_i F \varphi}{RT}}}, \quad (2.82)$$

где z_i – зарядовое число иона i ;

$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Äö}}{\text{î î ëü}}$ – постоянная Фарадея;

φ – электрический потенциал;

P_i – коэффициент проницаемости иона;

$R = 8,31 \frac{\text{Äæ}}{\text{Ê · î î ëü}}$ – газовая постоянная;

n^{ext} и n^{int} – концентрации ионов i вне и внутри мембраны, соответственно.

Учитывая, что согласно закону Ома проводимость мембраны σ_i для конкретного типа ионов i определяется выражением $\sigma_i = \frac{d j_i}{d \varphi}$, из (2.82) с учетом толщины мембраны l и площади поперечного сечения канала сквозь мембрану S получаем

$$\sigma_i = \frac{z_i^2 F^2 \varphi P_i l}{RT} \frac{n_i^{int} e^{\frac{2z_i F \varphi}{RT}} + e^{\frac{z_i F \varphi}{RT}} \left[\frac{z_i^2 F \varphi}{RT} (n_i^{ext} - n_i^{int}) - n_i^{ext} - n_i^{int} \right] + n_i^{ext}}{\left(e^{\frac{z_i^2 F^2 \varphi}{RT}} - 1 \right)^2}. \quad (2.83)$$

Подставляя выражение (2.83) в (2.80), окончательно получаем:

$$I_{ЭМП} = -4\pi R^2 \left[\frac{z_i^2 F^2 \varphi P_i l}{RT} \times \right. \\ \left. \frac{n_i^{int} e^{\frac{2z_i F \varphi}{RT}} + e^{\frac{z_i F \varphi}{RT}} \left[\frac{z_i^2 F \varphi}{RT} (n_i^{ext} - n_i^{int}) - n_i^{ext} - n_i^{int} \right] + n_i^{ext}}{\left(e^{\frac{z_i^2 F^2 \varphi}{RT}} - 1 \right)^2} E + \right. \\ \left. + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right], \quad (2.84)$$

что определяет силу ионного тока, обусловленного действием СВЧ поля, в котором учтена зависимость удельной проводимости среды от типа и концентрации ионов. Иными словами данное выражение позволяет точнее вычислить значения силы ионного тока.

Следует отметить также, что соотношение (2.84) позволяет, кроме всего, выяснить влияние экспозиции низкоэнергетического электромагнитного воздействия на силу ионного тока через мембрану.

На рис. 2.13 представлена зависимость тока ионов натрия сквозь мембрану сферической клетки с диаметром 10 мкм, вызванного воздействием электромагнитного поля, от экспозиции этого воздействия на частоте 37,3 ГГц при разных плотностях потока мощности излучения на глубине 6 нм по толщине мембраны.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что стабилизация ионного тока при плотностях потока мощности 12 и 15 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ наступает примерно на 10 мин., в то время как при плотности потока мощности 17 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ток непрерывно возрастает, что должно привести к последующему пробоем мембраны клетки. При этом 15 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ является более благоприятной величиной, поскольку в данном случае сила тока стабилизируется при более высоких значениях. Следует отметить, что при плотности потока мощности 15 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ стабилизация ионного тока наступает два раза: через 6 и 10 мин.

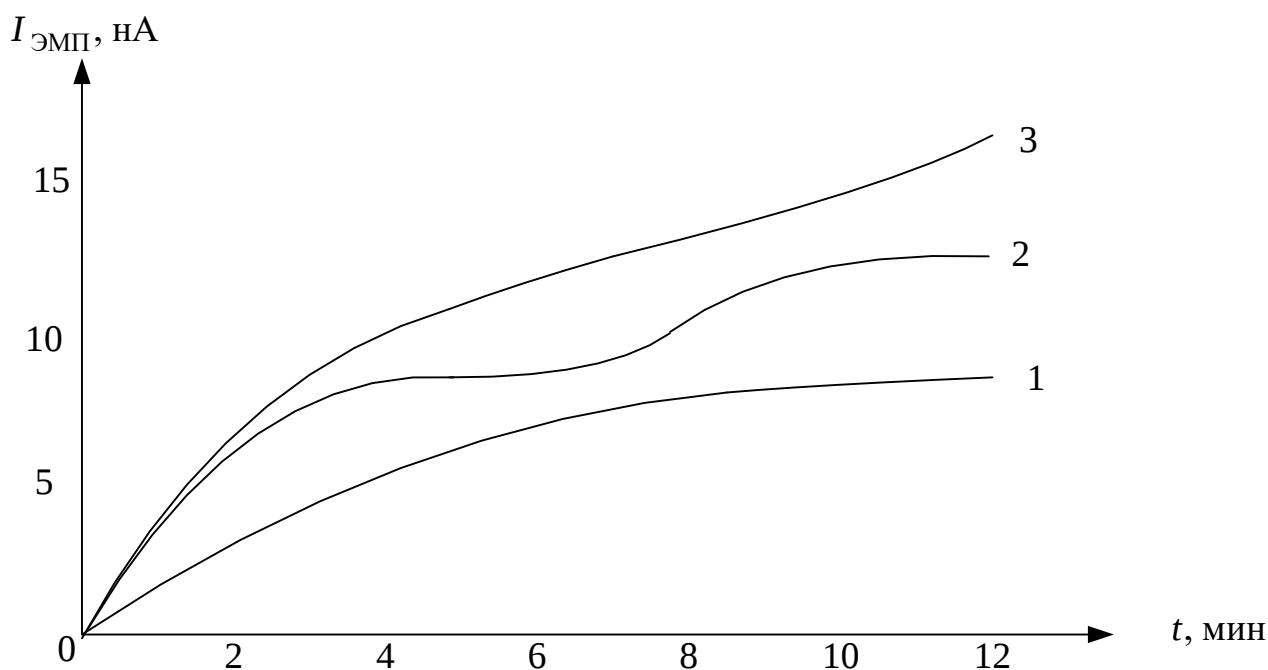


Рис. 2.13. Зависимость тока ионов натрия сквозь мембрану сферической клетки, вызванного воздействием электромагнитного поля, от экспозиции этого воздействия на частоте 37,3 ГГц при разных плотностях потока мощности излучения на глубине 6 нм по толщине мембраны:

1 – плотность потока мощности $12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

2 – плотность потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

3 – плотность потока мощности $17 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Было рассмотрено влияние экспозиции низкоэнергетического электромагнитного поля на ток ионов в сферической клетке с диаметром 10 мкм при постоянной плотности потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ на глубине по толщине мембраны 6 нм, но на разных частотах (рис. 2.14).

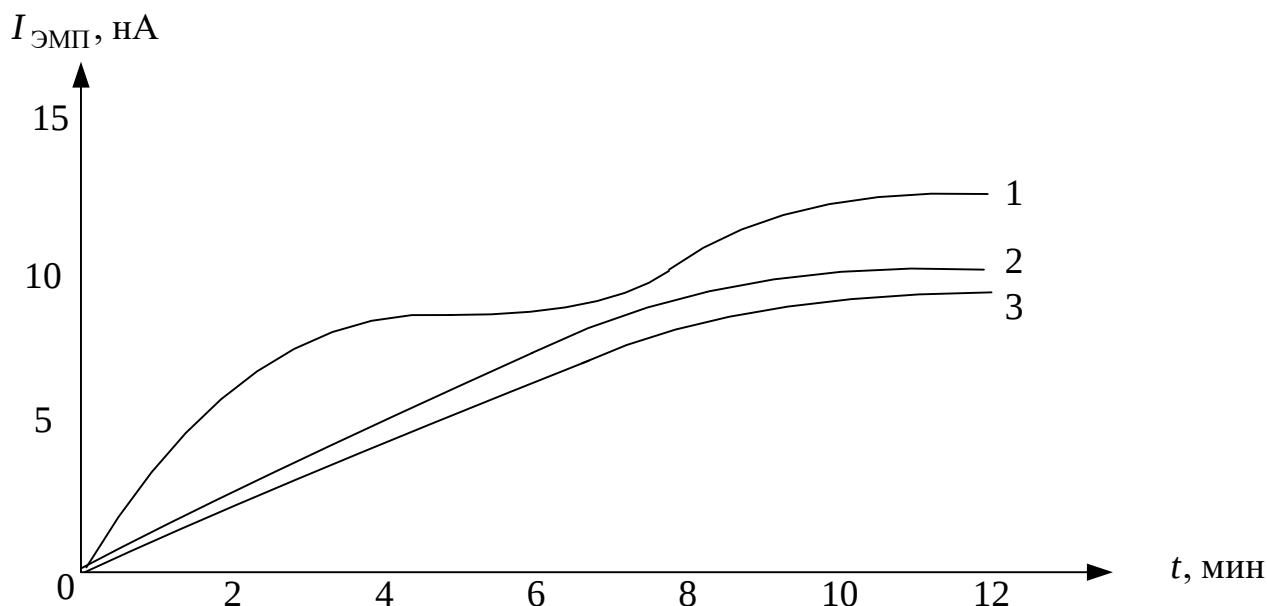


Рис. 2.14. Влияние экспозиции низкоэнергетического электромагнитного поля на сферическую клетку при постоянной плотности потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ на разных частотах:

1 – частота падающего поля 37,3 ГГц;

2 – частота падающего поля 37 ГГц;

3 – частота падающего поля 37,6 ГГц

Полученные результаты говорят о том, что время насыщения ионного тока, вызванного внешним электромагнитным полем с плотностью потока мощности $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, независимо от частоты наступает через 10 мин. от начала экспозиции. Однако на частоте 37,3 ГГц значение величины тока наибольшее по сравнению с другими частотами.

Выводы

1. Одним из возможных факторов положительного воздействия низкоэнергетического электромагнитного излучения на развитие сельскохозяйственных растений является его влияние на транспорт ионов через мембрану клетки. Очевидно, что исследование этого процесса возможно только лишь в том случае, когда известно, как распределяются воздействующие электромагнитные поля внутри зерновки, где находятся данные клетки.

2. Предложена математическая модель, которая позволяет находить внутренние низкоэнергетические электромагнитные поля внутри сферической зерновки с учетом ее электрофизических характеристик и геометрических параметров.

3. Используя полученные теоретические результаты, проведен численный анализ распределения внутренних электромагнитных полей в сферической зерновке. Показано, что для диаметра зерновки 0,4 мм экстремальное значение поля в центре наблюдается на частоте порядка 37,9 ГГц, Ширина этого экстремального всплеска по половине мощности равна примерно 200 МГц. У зерновки, имеющий диаметр 0,6 мм, резонансные явления в ее центре появляются на частоте 37 ГГц, причем сам резонанс довольно узкий.

4. Построена модель, позволяющая находить внутренние электромагнитные поля в зерновке при условии ее незначительной деформации.

5. Проведена оценка влияния деформации сферической зерновки на значения резонансных частот. Сравнивая полученные результаты с зависимостью амплитуды электрической составляющей ЭМП в центре недеформированной зерновки, сделан вывод, что деформация ведет к расширению резонансной полосы и некоторому смещению центра этой полосы в сторону более низких частот.

6. На основе полученного распределения внутренних электромагнитных полей зерновки проведен анализ их влияния на транспорт ионов сквозь мембрану составляющих зерновку клеток. Показано, что наиболее благоприятной и с точки зрения транспорта ионов под воздействием внешнего электромагнитного поля также является частота 37,3 ГГц, плотность потока мощности при этом лежит в районе $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

7. Анализ уравнения, описывающего влияние внешнего электромагнитного поля на транспорт ионов сквозь мембрану клетки, показал, что оптимальной экспозицией этого воздействия является время, равное 10 мин.

8. Полученные результаты говорят о том, что указанные выше частоты внешнего электромагнитного воздействия, его мощность и экспозиция стимулируют максимальное увеличение ионного тока сквозь мембрану клетки, что, в свою очередь, является причиной стимуляции обменных процессов в тканях сельскохозяйственных растений.

РАЗДЕЛ 3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ
ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ПО ЧАСТОТЕ ИСТОЧНИКОВ КВЧ
ИЗЛУЧЕНИЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ3.1. Практические требования к источникам КВЧ излучения и методы
повышения стабильности их частоты

Теоретические исследования взаимодействия низкоэнергетических ЭМП с семенами тепличных культур показали, что для практических целей, связанных с их предпосевной обработкой, необходимы источники в диапазоне частот 36 - 39 ГГц и относительной нестабильностью частоты $10^{-6} \dots 10^{-7}$.

Проведенный обзор существующих источников СВЧ колебаний позволил выявить ряд недостатков этих приборов. К ним относятся большие габариты многих из них, обусловленные применением электровакуумных приборов. Это же обуславливает и большое потребление электроэнергии, невысокую экономичность и срок службы.

Аппаратура, предназначенная для информационного (нетеплового) воздействия на биологический объект, должна обеспечивать, помимо необходимой мощности и частоты сигнала, высокие требования по стабильности частоты и степени подавления дискретных составляющих в спектре выходного сигнала. Необходимость работы такой аппаратуры не только в лабораторных условиях, но и на участках защищенного грунта, накладывает на нее определенные требования по компактности, экономичности, сроку службы, высокой устойчивости к механическим воздействиям.

Отсутствие источников СВЧ колебаний, отвечающих вышеизложенным требованиям, выдвинуло необходимость создания такого прибора.

С учётом поставленных задач и математического описания процесса взаимодействия электромагнитного поля с семенами тепличных культур программа исследований технических средств СВЧ диапазона предусматривает:

- анализ методов построения высокостабильных источников электромагнитного излучения КВЧ диапазона;
- получение исходных данных для обоснования структурной и принципиальной схем источника КВЧ излучения;
- проведение теоретического анализа энергетических и спектральных характеристик источника электромагнитного излучения КВЧ диапазона.

Отмеченные выше последние достижения в создании полупроводниковых приборов ВЧ диапазона и применение новых технологических процессов изготовления различных устройств этого диапазона, наложили соответствующий отпечаток на существующие методы формирования ВЧ колебаний.

Ряд преимуществ ВЧ источников колебаний на полупроводниковых приборах перед генераторами малой и средней мощности на электровакуумных приборах, таких, как повышенный срок службы, чрезвычайно высокая устойчивость к механическим воздействиям, экономичность, широкие возможности миниатюризации, делают их перспективными при разработке радиоэлектронной аппаратуры.

Полупроводниковые источники КВЧ колебаний могут быть выполнены либо на основе транзисторно-варакторных цепочек, либо на диодах Ганна или лавинно-пролетных диодах.

Выбор структуры полупроводниковых источников ВЧ колебаний определяется видом воздействия ЭМП на биологический объект: тепловым или информационным (низкоэнергетическим). При тепловом воздействии основными параметрами, определяющими структуру СВЧ источника колебаний, являются мощность и частота [178]. При информационном воздействии наряду с указанными параметрами (мощность и частота)

необходимо учитывать требования по стабильности частоты и степени подавления дискретных составляющих в спектре выходного сигнала источника КВЧ колебаний [179]. Экспериментальные опыты на растениях и животных при нетепловом воздействии показывают, что для определения длины волны и плотности потока мощности, при которых наблюдается биологический эффект, необходимы источники ВЧ колебаний с относительной нестабильностью 10^{-7} - 10^{-8} и ослаблением дискретных составляющих в спектре выходного сигнала на 40 - 50 дБ [179].

Наиболее простым и известным методом построения структурных схем формирования колебаний в СВЧ диапазоне является применение многокаскадных линеек умножения частоты кварцевого генератора. Такие линейки должны содержать, кроме каскадов умножения частоты на транзисторах и варакторах, также каскады усиления мощности и различные селектирующие устройства. Такие схемы формирования СВЧ высокостабильных колебаний находят широкое применение в технике СВЧ. Однако получение высокой спектральной чистоты выходного сигнала является трудной задачей.

В спектре выходного сигнала многокаскадной линейки умножения частоты присутствует бесконечное число составляющих с дискретностью, равной значению частоты входного колебания линейки. Естественно, что степень подавления дискретных составляющих в спектре выходного сигнала определяется избирательными свойствами применяемых селектирующих устройств и при микрополосковом исполнении КВЧ части умножения не может быть более 30-40 дБ по отношению к несущей.

Не лучшим образом обстоит дело с флуктуационными составляющими входного спектра. При умножении частоты уровень фазовых шумов опорного входного генератора возрастает в N^2 раз, где N - общий коэффициент умножения последующих каскадов. Так, применение кварцевого генератора с выходной частотой 5 или 10 МГц и типовым для

них значением уровня фазовых шумов, равным 130 - 140 дБ/Гц при расстройках от несущей 1-10 кГц с последующим умножением частоты до 10 ГГц ($N = 2 \cdot 10^4 - 10^3$), приводит к возрастанию уровня фазовых шумов на 60 - 85 дБ/Гц.

Дальнейшее умножение для получения выходной частоты в миллиметровом диапазоне волн приведет к значительному возрастанию уровня боковых флуктуационных и дискретных составляющих в спектре выходного сигнала. Если при этом еще учесть и флуктуации фазы, вносимые каскадами умножения частоты и усилителей мощности, то соответствующий уровень флуктуации будет еще выше отмеченного.

Паразитная фазовая модуляция (ФМ), флуктуации фазы, наводки в многократных умножителях частоты определяются, главным образом, входными каскадами [180,181].

Рассмотрим основные причины возникновения паразитной ФМ в гармонических умножителях с частотно-избирательными фильтрами при многократном умножении частоты и методы ее снижения.

Прежде всего, следует отметить недостаточно совершенное подавление колебаний гармоник умножаемой частоты на выходе первого каскада [181], которое появляется в виде амплитудной модуляции (АМ) по экспоненциальному закону с частотой огибающей, равной умножаемой. Во втором каскаде умножителя под воздействием таких амплитудно-модулированных колебаний возникает временно-импульсная модуляция импульсов тока нелинейного элемента, вследствие чего выходное напряжение этого и последующих каскадов оказывается модулированным по фазе с частотой огибающей АМ. Чем больше затухание фильтра и коэффициент умножения первого умножителя, тем большей будет ФМ, возникающая во втором каскаде умножителя частоты. Аналогичные процессы происходят и в последующих умножительных каскадах. В результате выходной сигнал многократного умножителя частоты модулируется по фазе умножаемой частотой и ее гармониками, номера

которых определяются коэффициентами умножения отдельных каскадов. Боковые составляющие паразитной ФМ выходного сигнала первого каскада умножения наиболее близки к выходной частоте многократного умножителя и при большом общем коэффициенте умножения могут оказаться в полосе пропускания фильтра последнего каскада. Поэтому паразитная ФМ наиболее опасна во входных каскадах.

Борьба с этим видом ФМ возможна путем уменьшения глубины возникающей АМ, чему способствуют следующие меры:

- выбор малых значений коэффициентов умножения частоты входных каскадов;
- обеспечение высокой добротности и избирательности фильтров с целью подавления побочных гармоник, в частности, применение фильтров сосредоточенной селекции (ФСС) [182];
- построение умножителей по двухтактной схеме [183];
- выбор оптимальных углов отсечки [183, 184];

Однако, выбор малых значений коэффициентов умножения частоты входных каскадов находится в противоречии с практическими рекомендациями по обеспечению высоких спектральных характеристик выходных сигналов многокаскадных линеек умножения частоты. Минимальный коэффициент умножения первого каскада приведет к увеличению общего коэффициента умножения последующих каскадов, в результате чего возрастает уровень побочных составляющих в спектре выходного сигнала.

Высокочастотная ФМ может возникнуть в любом каскаде умножителя, если выходное сопротивление этого каскада или входное сопротивление следующего представляет собой нелинейное комплексное сопротивление. В этом случае изменение амплитуды выходного или входного напряжения приводит к различной расстройке избирательного фильтра, включенного между умножительными каскадами, и, следовательно, к изменению фаз этих напряжений. Наиболее заметно этот

эффект может проявляться в транзисторных умножителях на высоких частотах [182].

Снижению влияния этого вида ФМ, помимо указанных мер уменьшения глубины АМ, способствуют также:

- согласование сопротивлений избирательных фильтров и нелинейных элементов;
- использование высокочастотных нелинейных элементов на достаточно низких частотах;
- выбор оптимальных режимов работы нелинейных элементов по постоянному току.

Наличие естественных флуктуации в активных и пассивных элементах вызывает флуктуации амплитуды и фазы выходных сигналов умножителей частоты [184]. Для их уменьшения применяют:

- высокостабильные малошумящие элементы;
- специальные схемные решения и режимы работы каскадов;
- фильтры с малой крутизной фазовой характеристики в полосе пропускания.

Относительно высокий уровень флуктуации фазы выходных сигналов многокаскадных линеек умножения частоты обусловлены, кроме всего прочего, и тем фактом, что в низкочастотных высокостабильных кварцевых генераторах трудно обеспечить одновременное удовлетворение требований по высокой долговременной стабильности частоты и минимальному уровню фазовых шумов. Компромиссное решение этих вопросов можно реализовать в устройствах на основе фазовой автоподстройки частоты. В этих схемах *входной* кварцевый генератор выбирается из условий обеспечения заданной долговременной стабильности частоты в требуемых условиях эксплуатации. Высокочастотный кварцевый генератор на частоту 5...10 МГц подстраивается системой фазовой автоподстройки (ФАП) по низкой частоте и разрабатывается с максимальным отношением сигнал - шум [185]. Для

реализации таких характеристик целесообразно применить мощный арсенидо-галлиевый полевой транзистор и работать на предельной мощности рассеивания на кварцевом резонаторе. Полоса пропускания или постоянная времени системы ФАП выбирается таким образом, что в СВЧ кварцевом генераторе компенсируются только медленные уходы частоты, а уровень быстрых флуктуаций фазы выходного сигнала полностью определяется соответствующей характеристикой СВЧ кварцевого генератора. Как показали расчеты и экспериментальные исследования, их уровень будет ниже уровня флуктуации умноженного по частоте сигнала низкочастотного кварцевого генератора. Дальнейшее умножение частоты СВЧ кварцевого генератора в сантиметровом диапазоне волн приведет к возрастанию их уровня лишь на 10 - 15 дБ/Гц, что является приемлемым, так как при этом получаем уровень фазовых шумов равным 120 -130 дБ/Гц при расстройках от несущей более чем на 1 кГц.

Аналогичные результаты по спектрально - флуктуационным характеристикам можно получить и в структурной схеме, [186]. Здесь система ФАП настроена непосредственно на заданную выходную частоту, а ее опорный сигнал получен путем умножения частоты низкочастотного кварцевого генератора. Линейка умножения частоты маломощная ($P_{\text{вых}} \leq 0,002$ Вт). В качестве подстраиваемого СВЧ генератора применяется автогенератор на арсенидо-галлиевом полевом транзисторе с высокодобротным ($Q \geq 10^4$) диэлектрическим резонатором, связанным с отрезком микрополосковой линии в цепи затвора транзистора. Резонатор изготавливается из диэлектрического материала с $\epsilon = 30 - 70$, например, монокристалла рутила (BaTiO_2) или керамики. Для компенсации уходов частоты такого генератора от изменений температуры окружающей среды или питающих напряжений схема содержит СВЧ варикап, электрически связанный с отрезком микрополосковой линии в цепи затвора полевого транзистора. Такой СВЧ автогенератор обеспечивает в диапазоне частот 4... 10 ГГц уровень фазовых шумов 120 - 130 дБ/Гц при расстройках

от несущей более чем на 10 кГц. Для получения выходных колебаний в миллиметровом диапазоне длин волн необходимо применять умножение на варакторе высокостабильной частоты полученной системой ФАП.

Рассмотрение принципов построения источников КВЧ диапазона показала, что они не удовлетворяют требованиям, необходимым для воздействия на биологические объекты с целью стимулирования роста урожайности тепличных культур:

- сложность в настройке усилительно-умножительных каскадов;
- трудность в обеспечении требуемых спектрально-флуктационных характеристик;
- большие габариты и низкая надежность работы в условиях сельскохозяйственного производства.

В связи с чем, исключительно актуальной задачей является создание источников КВЧ излучения в твердотельном исполнении, которые наряду с выходной мощностью должны удовлетворять требованиям по стабильности частоты.

Существует несколько методов стабилизации частоты твердотельных генераторов КВЧ: метод, использующий внешнюю синхронизацию генератора; метод, основанный на автоматической подстройке частоты; метод стабилизации частоты с помощью высоко добротных внешних резонаторов[158,187,188].

При использовании первых двух методов генератор на ЛПД или диоде Ганна "обрастает" громоздкой дополнительной аппаратурой и теряет основное достоинство твердотельного генератора – малые габариты. Поэтому особый интерес представляет третий метод.

Метод внешних высокодобротных резонаторов в качестве стабилизирующей нагрузки основан на явлении затягивании частоты автогенератора внешней нагрузкой [158].

Три основных схемы подключения стабилизирующего резонатора показаны на рис. 3.1.

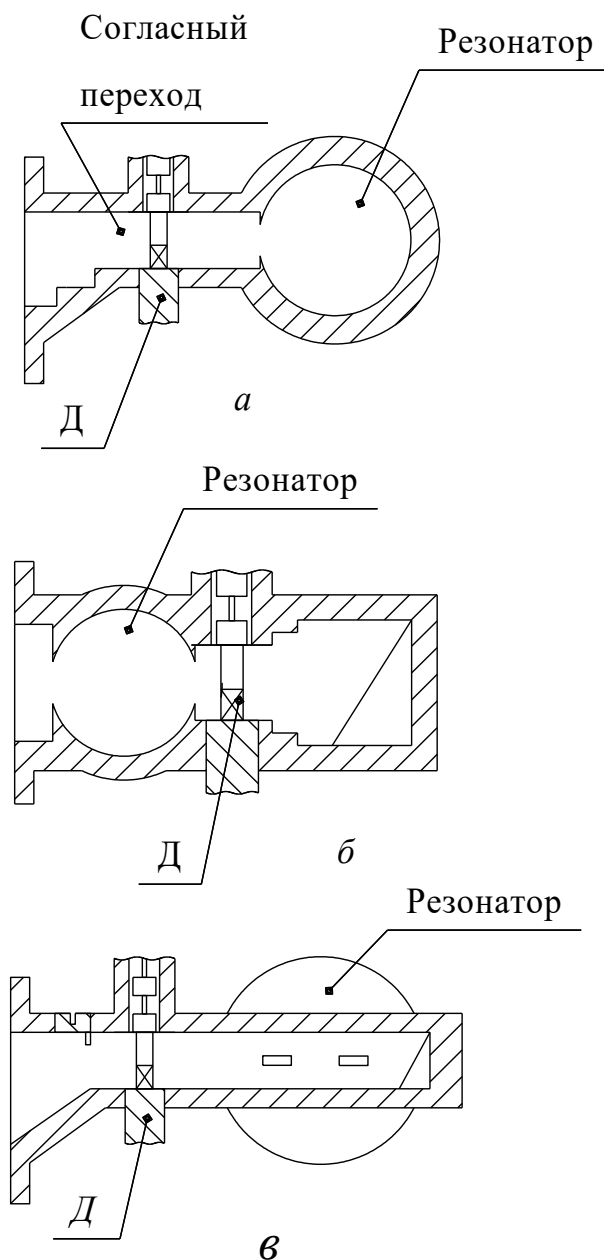


Рис. 3.1. Основные схемы подключения стабилизирующего резонатора к генераторам КВЧ диапазона:

- а) генератор с отражающим резонатором;
- б) генератор с проходным резонатором;
- в) генератор с полостно-отражающей системой.

Генератор с отражающим резонатором (рис. 3.1. а) обеспечивает высокий коэффициент стабилизации частоты при сравнительно малых потерях мощности. Схема генератора с проходным резонатором (рис.3.1 б)

реализует максимальный коэффициент стабилизации частоты, но при этом возрастают потери выходной мощности. Генератор с полостно-отражающей системой (рис.3.1 в) реализует меньший коэффициент стабилизации частоты и уровень выходной мощности, но обеспечивает одночастотный режим работы.

Для удовлетворения требований по наибольшей выходной мощности и коэффициенту стабилизации частоты будем исследовать генератор на ЛПД с резонатором, включенным по схеме на отражение.

3.2. Моделирование и расчет импеданса ЛПД КВЧ диапазона длин волн

Для расчетов энергетических и спектральных характеристик генераторов, основным элементом которых является ЛПД, необходимо знать значение активной и реактивной проводимостей полупроводниковых диодов[156,189-191]. Это позволит оптимизировать конструкцию генератора и получить более высокий уровень выходной мощности и стабильности частоты.

В общем случае структурную схему ГЛПД можно представить в виде, показанном на рис.3.2.

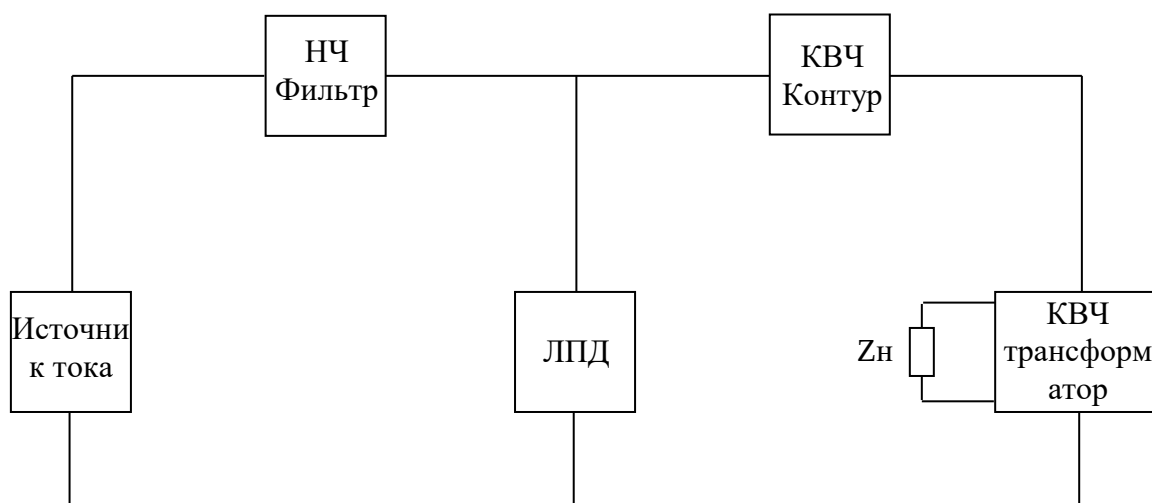


Рис. 3.2. Структурная схема ГЛПД.

ЛПД характеризуется активным $R_d(\omega, I_0, I_1, \dots, I_n)$ и реактивным $X_d(\omega, I_0, I_1, \dots, I_n)$ сопротивлениями p - n перехода. КВЧ контур и КВЧ трансформатор обеспечивают компенсацию реактивного и активного сопротивления ЛПД. На рис. 3.3 представлена эквивалентная схема для упрощенной модели ЛПД.

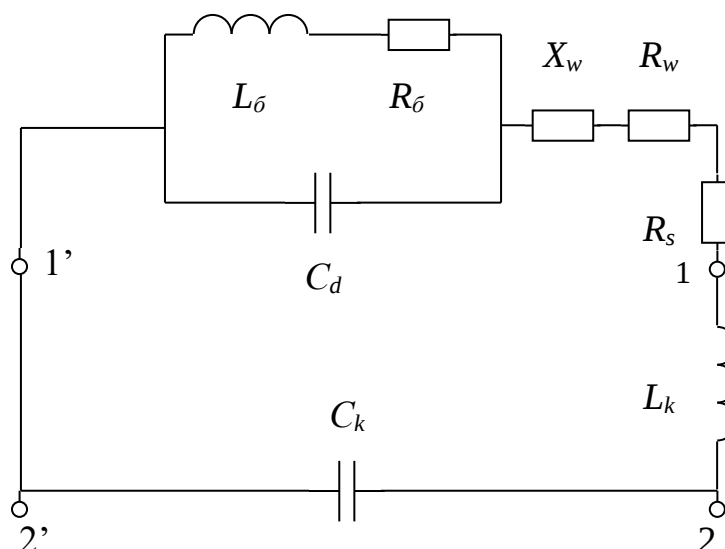


Рис. 3.3. Эквивалентная схема ЛПД

Элементами эквивалентной схемы (рис. 3.3) являются:

C_d – емкость p - n перехода диода при $U=U_{np}$, L_δ – лавинная индуктивность слоя умножения, R_δ – сопротивление слоя умножения, X_w , R_w – активное и реактивное сопротивление дрейфовой области, R_s – сопротивление базы диода, L_k и C_k – индуктивность и емкость корпуса диода.

В режиме слабого сигнала активная R_d и реактивная X_d составляющие сопротивления p - n перехода определяются выражениями [191,192].

$$R_d(\omega) = \frac{1}{\omega \cdot C_d} \cdot \left(1 - \frac{l_\delta}{l_w}\right) \cdot \frac{\beta_\ell^2}{1 - \beta_\ell^2 + \delta^2} \cdot \left[(1 - \beta_\ell^2) \cdot \xi(\theta) - \delta \cdot \lambda(\theta)\right]; \quad (3.1)$$

$$X_d(\omega) = -\frac{1}{\omega \cdot C_d} \cdot \left\{ 1 + \frac{\beta_\ell^2}{(1 - \beta_\ell^2) \cdot \delta} \cdot \left(1 - \frac{l_s}{l_w} \right) \cdot [\delta \cdot \xi(\theta) + (1 - \beta_\ell^2) \cdot \xi(\theta)] \right\}, \quad (3.2)$$

где $\beta_\ell^2 = \frac{\omega_\ell^2}{\omega^2};$

$$\delta = \omega \cdot \tau \cdot l_\delta = \omega \cdot l_\delta \cdot g;$$

$$\omega_\ell = \frac{1}{\sqrt{L_\delta \cdot C_d}};$$

$$\xi(\theta) = \frac{1 - \cos \theta}{\theta};$$

$$\lambda(\theta) = \frac{\sin \theta}{\theta} + \frac{l_\delta}{l_w - l_\delta};$$

Θ – угол пролета носителей заряда;

$\tau \cdot (l_w - \frac{l_\delta}{2}) \cdot \frac{1}{g}$ – время пролета носителей заряда дрейфовой области;

l_δ – ширина эквивалентного слоя умножения.

Полное сопротивление диода $Z_d = R_d + X_d$ отличается от полного сопротивления $p-n$ перехода наличием сопротивления R_s . С учетом этого сопротивления область частот, где активное сопротивление отрицательно, сужается и ограничивает интервал частот вблизи лавинной частоты.

В выражениях (3.1) и (3.2) не учитываются нелинейные эффекты, возникающие в $p-n$ переходе, в режиме большого сигнала. Как показано в работе [191], доминирующее влияние на нелинейные характеристики оказывает нелинейность по току. Данная нелинейность проявляется значительно раньше, чем нелинейность по напряжению. Тогда, с учетом нелинейности по току, выражения для определения проводимости ЛПД будут иметь вид:

$$R_d''(\omega, x) = F(x) \cdot R_d'(\omega) ; \quad (3.3)$$

$$X_d''(\omega, x) = F(x) \cdot X_d'(\omega) ; \quad (3.4)$$

$$F(x) = \frac{\hat{O}(x) \cdot (1 - \beta_{\varepsilon}^2)}{1 - \beta_{\varepsilon}^2 \cdot \hat{O}(x)} ; \quad (3.5)$$

$$\hat{O}(x) = \frac{2 \cdot I_1(x)}{x \cdot I_0(x)} , \quad (3.6)$$

где $I_0(x)$ и $I_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка; $x = I_1 / I_x$ – нормированная амплитуда первой гармоники тока; I_x – характеристический ток.

Так как диод размещается в металлокерамическом корпусе, то величины $R_d(\omega)$ и $X_d(\omega)$ будут определяться с учетом параметров корпуса:

$$R_d'(\omega) = R_s + \frac{R_d}{1 - 2 \cdot \omega \cdot C_k \cdot X_d + \omega^2 \cdot C_k^2 \cdot X_d^2 - \omega^2 \cdot C_k^2 \cdot R_d^2} \quad (3.7)$$

$$X_d'(\omega) = \frac{\omega \cdot L_k + X_d - \omega \cdot C_k \cdot X_d^2 - \omega \cdot C_k \cdot R_d^2}{1 - 2 \cdot \omega \cdot C_k \cdot X_d + \omega^2 \cdot C_k^2 \cdot X_d^2 - \omega^2 \cdot C_k^2 \cdot R_d^2} ; \quad (3.8)$$

Для расчета импеданса диффузионных кремниевых ЛПД с $p^+ - n - n^+$ структурой были использованы следующие параметры: площадь $p-n$ перехода $A = 2 \cdot 10^{-5}$ см²; пробивное напряжение $U_{np} = (2 \dots 25)$ В; емкость $p-n$ перехода $C_d = 2 \cdot 10^{-8}$ Ф/см²; $l_o = 0,4$ мкм; ширина дрейфовой области $l_w = 0,7$ мкм; сопротивление потерь $R_s = (0,5 \dots 1,5)$ Ом; напряжение смещения $U_{см} = (20 \dots 30)$ В; рабочие токи $I_o = (100 \dots 150)$ мА.

Лавинные частоты ЛПД для рабочих токов определяются из

выражения [190,191].

$$f_{\ddot{e}} = \sqrt{\frac{6 \cdot I_0}{4 \cdot \pi \cdot C_d \cdot \tau_{\delta} \cdot E_{i\delta} \cdot l_w}}, \quad (3.9)$$

где $\tau_{\delta} = l_{\delta} / v$;

$$E_{np} = N \cdot e \cdot l_w \cdot l_{\delta} / \varepsilon \cdot \varepsilon_0;$$

$$N = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К};$$

$$\varepsilon = 12;$$

$$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}; v = 1 \cdot 10^7 \text{ см/с}.$$

В таблице 3.1 приведены результаты расчетов $\beta_{\ddot{e}}^2 = \frac{f_{\ddot{e}}^2}{f^2}$ для диапазона частот 36...39 ГГц, а на рис. 3.4, 3.5 графики зависимостей функций $\Phi(x)$ и $F(x)$ от величины нормированной амплитуды 1-ой гармоники тока.

Таблица 3.1

Результаты расчетов $\beta_{\ddot{e}}^2 = \frac{f_{\ddot{e}}^2}{f^2}$.

$f_{\text{н}}, \text{ ГГц}$ $f, \text{ ГГц}$	21,2	22,3	23,2	24,2	25,1	26,1
36	0,345	0,382	0,415	0,45	0,485	0,524
37	0,328	0,363	0,393	0,428	0,46	0,496
38	0,313	0,345	0,347	0,407	0,437	0,472
39	0,296	0,326	0,354	0,385	0,415	0,447

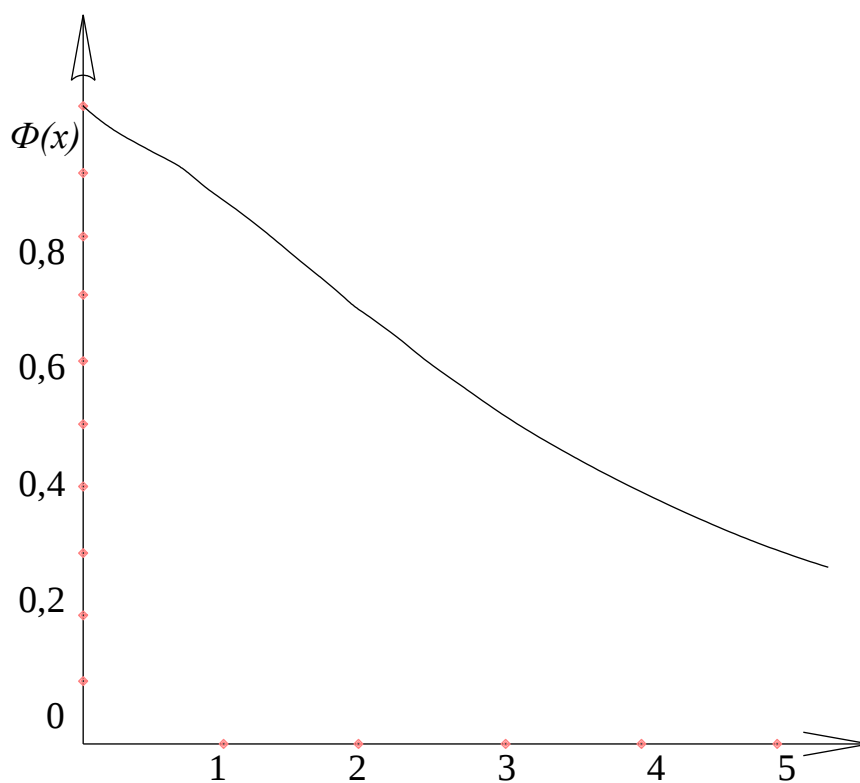


Рис. 3.4 График функции $\Phi(x)$.

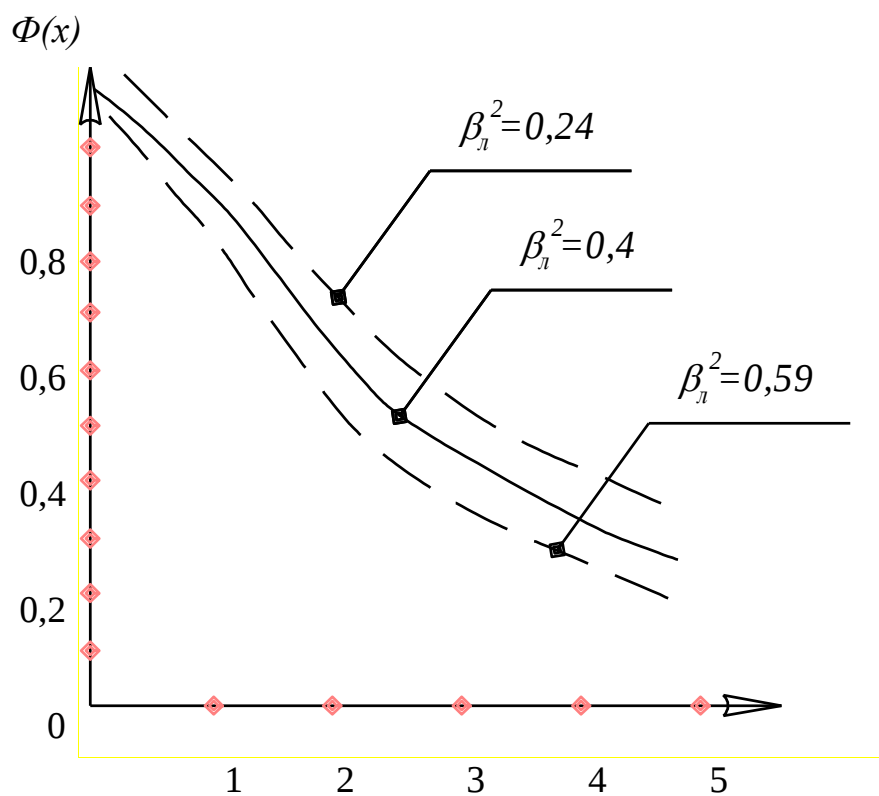


Рис. 3.5 Расчетные зависимости функции $F(x)$ от нормированной амплитуды 1-ой гармоники тока

Результаты вычислений (рис. 3.5) показывают, что функция $F(x)$ для значений $\beta_{\pi}^2=0,24\dots0,59$ изменяется незначительно. Поэтому для упрощения расчетов $R''_d(\omega, x)$ и $X''_d(\omega, x)$ воспользуемся характеристикой $F(x)$ для $\beta_{\pi}^2=0,4$. Используя выражения (3.7) и (3.8), а также параметры корпуса диода, активную и реактивную составляющие импеданса ЛПД определяем из выражений (3.3) и (3.4).

На рис.3.6 приведены расчетные зависимости $R''_d(\omega, x)$ и $X''_d(\omega, x)$ от нормированной амплитуды первой гармоники тока для частоты 36 ГГц; 37,5 ГГц; 39 ГГц.

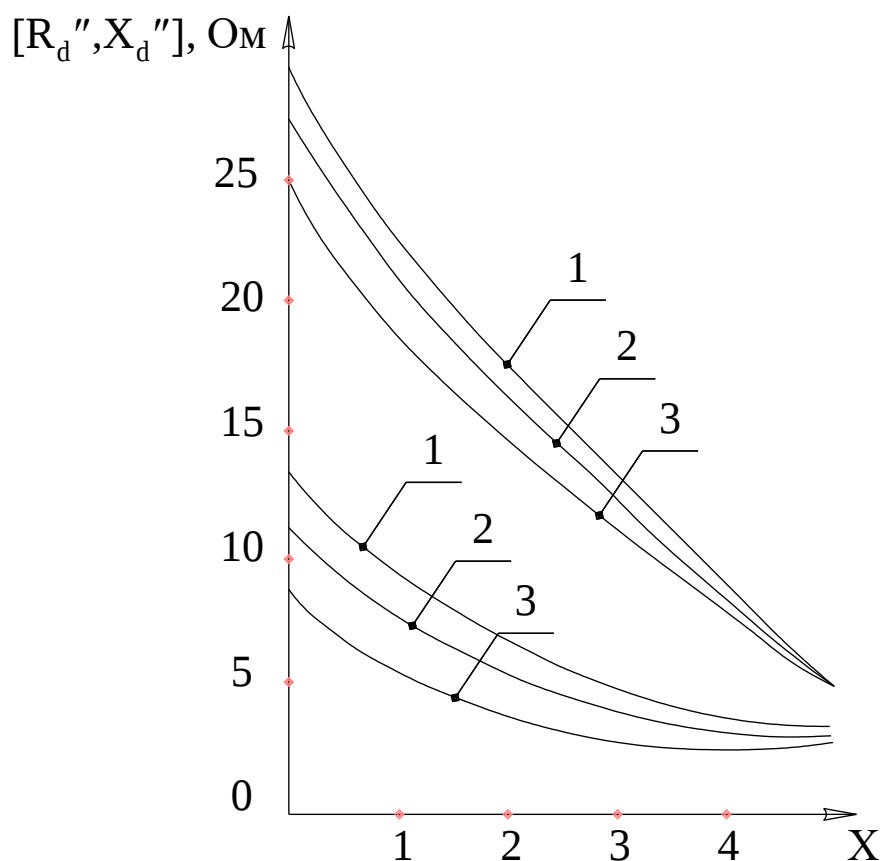


Рис. 3.6 Расчетные зависимости R''_d и X''_d от нормированной амплитуды 1-ой гармоники тока для $I_0=140$ мА:

- 1 – частота 36 ГГц;
- 2 – частота 37,5 ГГц;
- 3 – частота 39 ГГц.

3.3. Анализ частотных и энергетических характеристик ГЛПД радиально-волноводной системы

Энергетические и спектральные характеристики ГЛПД (выходная мощность, к.п.д., диапазон перестройки, уровень шумов) зависит не только от параметров ЛПД, но и в значительной мере от типа резонансной системы. В качестве резонансной системы нами выбран радиально-волноводный резонатор, так как он позволяет получить в широких пределах механическую перестройку частоты и кроме того, его добротность выше по сравнению с коаксиальным.

Схема конструкции ГЛПД с радиально-волноводным резонатором приведена на рис. 3.7.

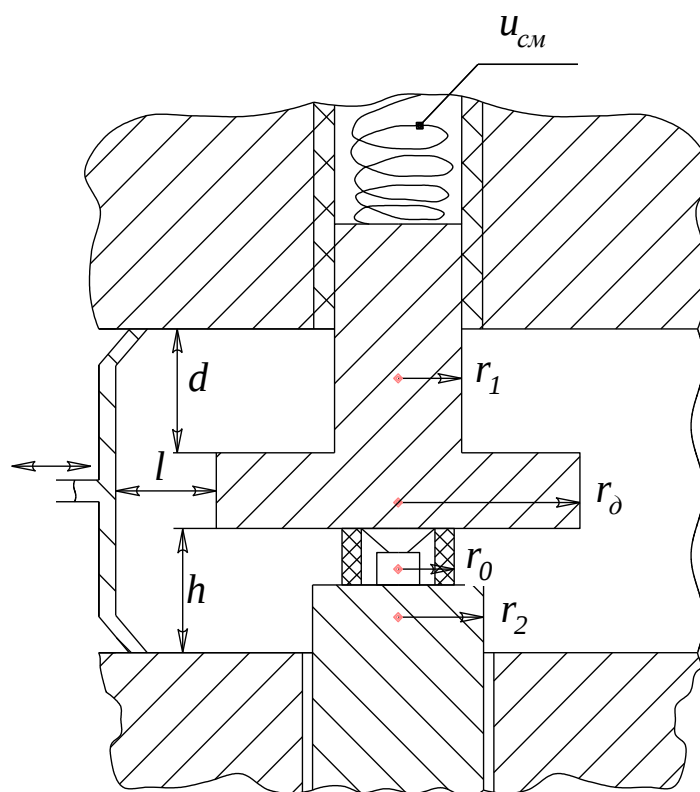


Рис. 3.7. ГЛПД с радиально-волноводным резонатором

Колебательная система генератора на ЛПД представляет собой

прямоугольный волновод сечения $7,2 \times 3,4$ мм, по центру которого расположены цилиндрические металлические стержни с радиусом r_1 и r_2 . На торце стержня с радиусом r_1 в Н-плоскости укреплен диск радиусом r_d .

Между диском и торцом стержня r_2 помещен ЛПД. Питание по постоянному току подается через металлический стержень радиусом r_1 . С одной стороны волновода на расстоянии l расположен короткозамыкающий поршень, от положения которого зависят частота и мощность генерации. Положение диска влияет на нагрузку, а следовательно, на частоту и мощность генерируемых колебаний.

Для расчета резонансных частот предположим, что диск бесконечно тонкий. Тогда колебательная система может быть представлена эквивалентной схемой (рис. 3.8) [192- 195].

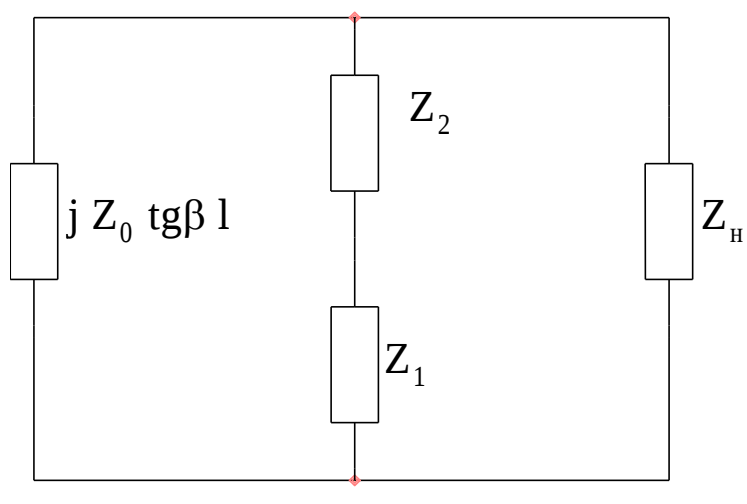


Рис. 3.8. Упрощенная эквивалентная схема резонатора

Входное сопротивление Z_1 радиальной линии высотой h при закороченном выходе получим из уравнения

$$Z_1 = j \cdot \frac{h \cdot Z_{01} \cdot \sin(\theta - \theta_1)}{2 \cdot \pi \cdot r_d \cdot \cos(\psi - \theta_1)}, \quad (3.10)$$

где $Z_{01} = \eta_1 \cdot \frac{G_0(kr_{\ddot{A}})}{G_1(kr_{\ddot{A}})};$

$$\eta_1 = 377 \text{ Ом};$$

$$G_0(kr_{\ddot{A}}) = \sqrt{J_0^2(kr_{\ddot{A}}) + N_0^2(kr_{\ddot{A}})};$$

$$\theta = \arctg \left[\frac{N_0(kr_{\ddot{A}})}{J_0(kr_{\ddot{A}})} \right];$$

$$G_1(kr_{\ddot{A}}) = \sqrt{J_1^2(kr_{\ddot{A}}) + N_1^2(kr_{\ddot{A}})};$$

$$\psi = \arctg \left[\frac{J_1(kr_{\ddot{A}})}{-N_1(kr_{\ddot{A}})} \right];$$

$$\theta_1 = \arctg \left[\frac{N_0(kr_{\ddot{A}})}{J_0(kr_{\ddot{A}})} \right];$$

$J_1(kr_{\ddot{A}})$ и $N_1(kr_{\ddot{A}})$ – функции Бесселя и Неймана;

k – волновое число.

Для радиальной линии высотой h нагрузкой является сопротивление

$$Z_{\dot{r}} = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_0} + Z_d, \quad (3.11)$$

где $Z_d = R''_d + jX''_d;$

$$C_0 = 0,886 \cdot \frac{\pi}{d_1} \cdot (r_2^2 - r_0^2);$$

r_0 – радиус диода.

Входное сопротивление Z_2 представим в виде:

$$Z_2 = Z_{01} \cdot \left[\frac{Z_1 \cdot \cos(\theta - \psi_2) + j \cdot Z_{02} \cdot \sin(\theta - \theta_2)}{Z_{02} \cdot \cos(\psi - \theta_2) + j \cdot Z_H \cdot \sin(\psi - \psi_2)} \right], \quad (3.12)$$

где $\psi_2 = \arctg \left[\frac{N_0(kr_2)}{J_0(kr_2)} \right];$

$$Z_{02}(kr_2) = \eta_1 \cdot \frac{G_0(kr_2)}{G_1(kr_2)};$$

$$G_0(kr_2) = \sqrt{J_0^2(kr_2) + N_0^2(kr_2)};$$

$$G_1(kr_2) = \sqrt{J_1^2(kr_2) + N_1^2(kr_2)}.$$

Для случая согласованного волноводного выхода ГЛПД с нагрузкой резонансные частоты находим из уравнения:

$$J_m \cdot (Z_{ii} + Z_1 + Z_2) = 0; \quad Z_{ii} = \frac{j \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l \cdot Z_i}{j \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l + Z_i} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Z_0 \cdot (R_d'')^2 \cdot \operatorname{tg} \beta l + (X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0}) \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l \cdot (Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l + X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0})}{(R_d'')^2 + Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l \cdot (Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l + X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0})} + \\ & + \frac{h \cdot Z_{01} \cdot \sin(\theta - \theta_1)}{2 \cdot \pi \cdot r_\delta \cdot \cos(\psi - \theta_1)} + \\ & + \frac{Z_{01} \left[\frac{h \cdot Z_{01} \cdot \sin(\theta - \theta_1)}{2 \cdot \pi \cdot r_\delta \cdot \cos(\psi - \theta_1)} \cdot \cos(\theta - \psi_2) + Z_{02} \cdot \sin(\theta - \theta_2) \right]}{\left[Z_{02} \cdot \cos(\psi - \theta_2) - (X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0}) \cdot \sin(\psi - \psi_2) \right]^2 + [(R_d'' \cdot \sin(\psi - \psi_2))]^2} \times \\ & \times \left[Z_{02} \cdot \cos(\psi - \theta_2) - (X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0}) \cdot \sin(\psi - \psi_2) \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Изменение выходной мощности ГЛПД в диапазоне частот для различных размеров диска получим из выражения:

$$P_{\text{вых}} = \frac{I_1^2 \cdot R_3}{2}, \quad (3.15)$$

где I_1 – амплитуда нулевой гармоники тока;

$$R_3 = \frac{\left(\frac{1}{\omega \cdot C_0} - X_d'' \right) \cdot Z_0 \cdot R_d'' \cdot \operatorname{tg} \beta l + Z_0 \cdot R_d'' \cdot \operatorname{tg} \beta l \cdot \left[Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l + \left(X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0} \right) \right]}{(R_d'')^2 + \left(Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta l + X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0} \right)^2} + \quad (3.16)$$

$$+ \frac{Z_{01} \cdot R_d'' \cdot \sin(\psi - \psi_2) \cdot \left[\frac{h \cdot Z_{01} \cdot \sin(\theta - \theta_1)}{2 \cdot \pi \cdot r_\partial \cdot \cos(\psi - \theta_1)} \cdot \cos(\theta - \psi_2) + Z_{02} \cdot \sin(\theta - \theta_2) \right]}{\left[Z_{02} \cdot \cos(\psi - \theta_2) - \left(X_d'' - \frac{1}{\omega \cdot C_0} \right) \cdot \sin(\psi - \psi_2) \right]^2 + \left[(R_d'' \cdot \sin(\psi - \psi_2)) \right]^2}$$

Для расчетов использовались следующие параметры радиально-волноводного резонатора:

$r_1=0,5$ мм; $r_2=1,5$ мм; $r_\partial=1,4$ мм; $r_\partial=1,85$ мм; $r_\partial=2,1$ мм.

Напряжение смещения и рабочий ток ЛПД составляли $U_{cm}=30$ В;

$I_0=140$ мА.

На рис.3.9 приведены графики изменения резонансной частоты от высоты радиальной линии h для различных отношений диаметра диска к ширине волновода a .

Анализ зависимостей (рис. 3.9) показывает, что с увеличением высоты радиальной линии частота генерации уменьшается.

Уменьшение диаметра диска приводит к увеличению частоты генерации.

Максимальная полоса частотной перестройки при изменении h от 0,2 мм до 0,6 мм составляет 20%.

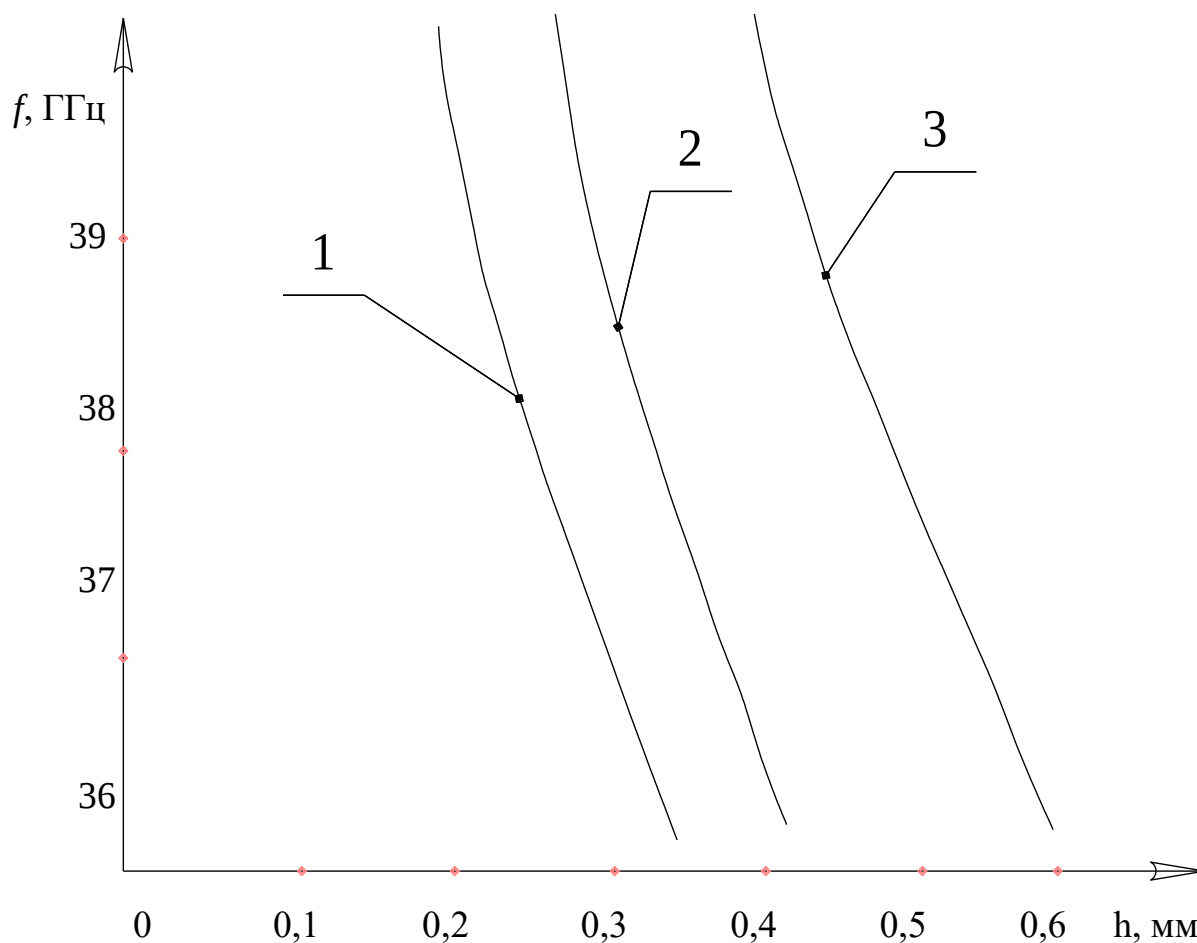


Рис. 3.9 Изменения резонансной частоты от высоты радиальной линии:

1 – $d/a=0,41$;

2 – $d/a=0,52$;

3 – $d/a=0,58$.

На рис. 3.10 приведены графики изменения выходной мощности $P_{\text{вых}}$ от частоты генерации f для различных размеров диска.

Из приведенных зависимостей видно (рис. 3.10), что размеры диска существенно влияют на выходную мощность генератора. Максимальный уровень выходной мощности наблюдается при высоте радиальной $h = 0,4$ мм, отношении $d/a=0,52$ и составляет $P_{\text{вых}}=620$ мВт. Максимальный

КПД~14%, а крутизна электронной подстройки 5 мГц/мА.

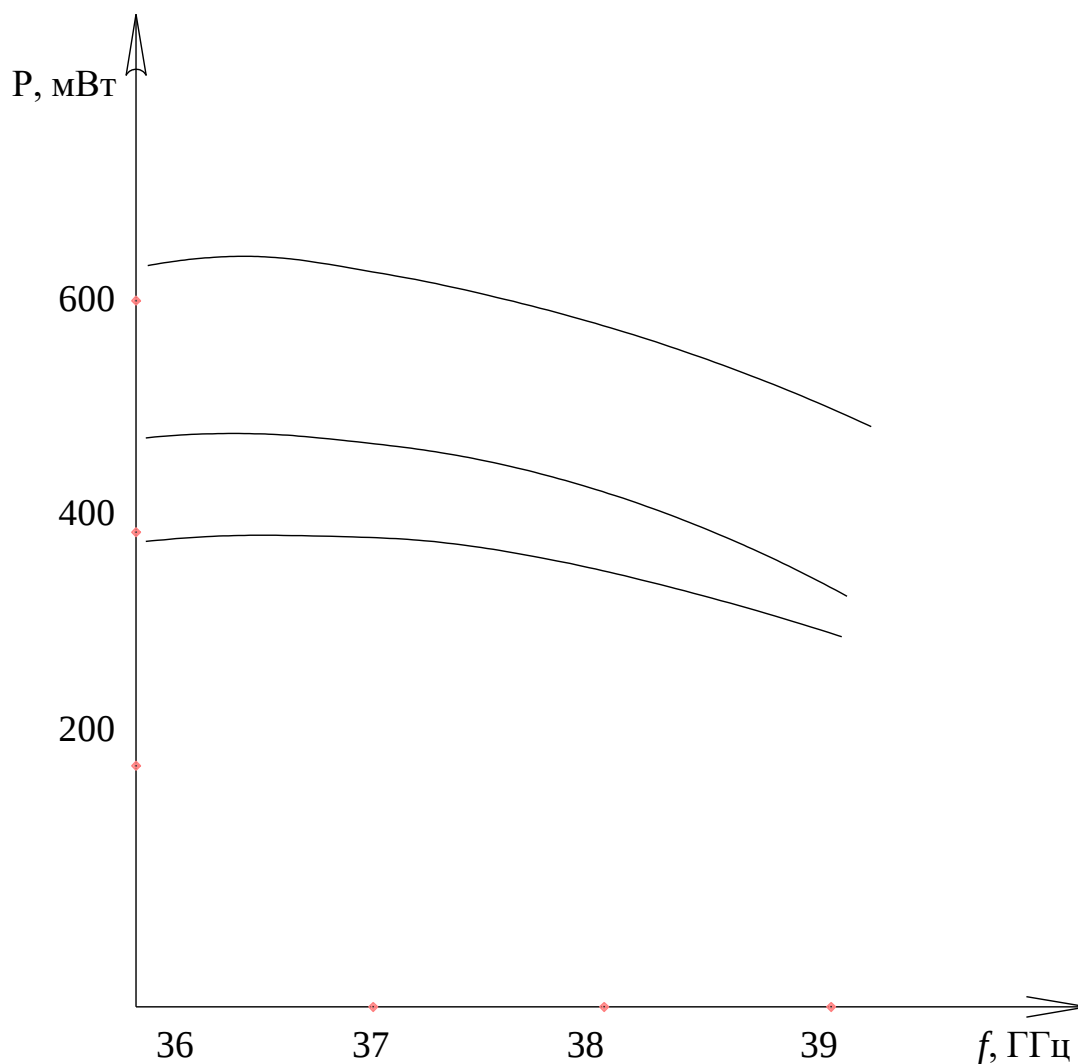


Рис. 3.10 изменения выходной мощности от частоты генерации при $h=0,4$ мм:

1 – $d/a=0,52$;

2 – $d/a=0,58$;

3 – $d/a=0,41$

3.4 Обоснование возможностей повышения стабильности частоты ГЛПД

Рассмотрим схему конструкции ГЛПД представленную на рис. 3.11. Конструкция генератора состоит из отрезка волновода пониженной высоты, посредине широкой спинки которого установлен ЛПД-1. На

расстоянии l_1 от оси токопроводящего штыря расположен стабилизирующий резонатор 2, работающий на колебаниях H_{101} типа.

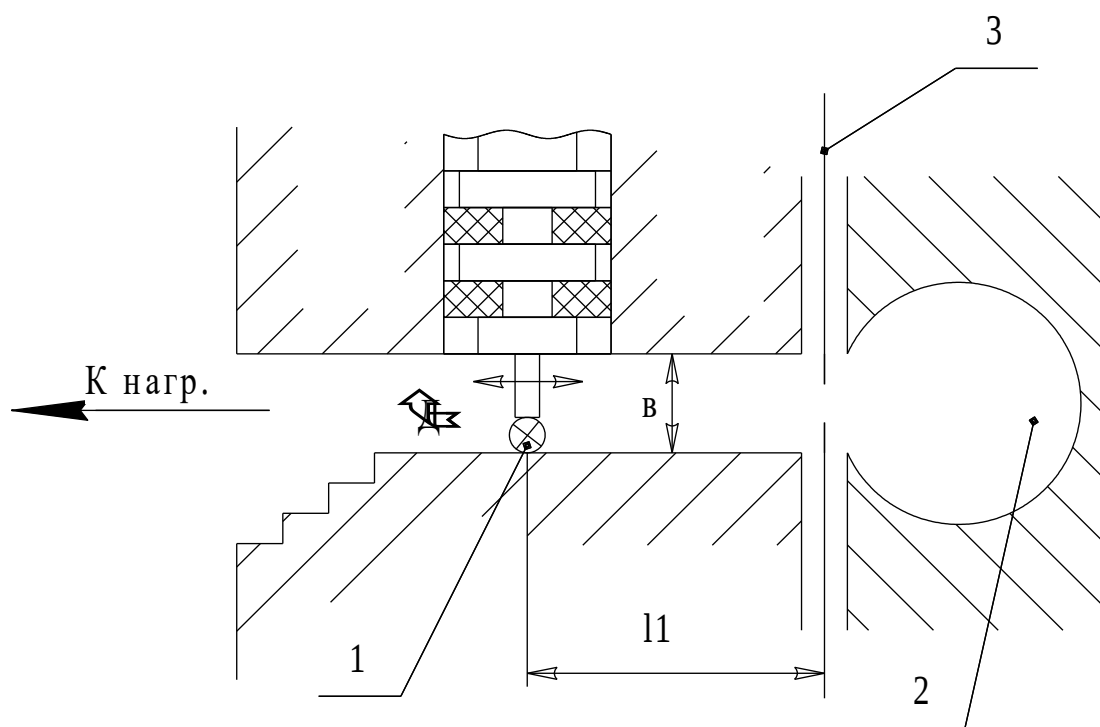


Рис. 3.11 Схема конструкции ГЛПД

Для анализа стабильности частоты ГЛПД (рис 3.12) рассмотрим его эквивалентную схему.

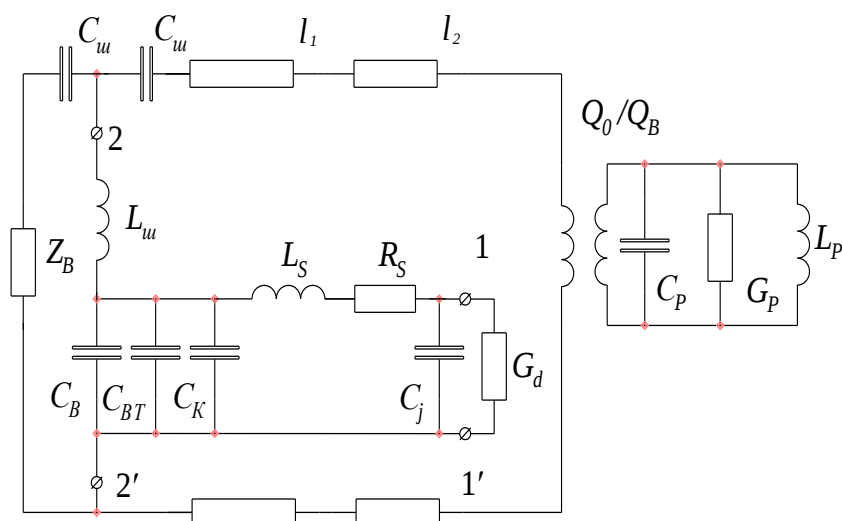


Рис. 3.12 Эквивалентная схема ГЛПД

Элементы $L_{ш}$, $C_{ш}$, $C_{вт}$, $C_в$ характеризуют параметры штыря в волноводе, величина которых определяется расчетным путем. ЛПД представлен элементами C_k , L_s , R_s , C_j , G_d , величина которых определяется из пункта 4.2. Внешний резонатор характеризуется элементами G_p , C_p , L_p . Расстояние от оси токопроводящего штыря до плоскости отверстия связи учтено отрезком длинной линии l_1 , а наличие диафрагмы связи (3) отражено введением идеального трансформатора и дополнительной линией l_2 . Степень связи резонатора с волноводным трактом определялась отношением $Q_0/Q_в$ (Q_0 и $Q_в$ – внешняя и собственная добротности резонатора соответственно). Нагрузка генератора $Z_в$ принимается согласованной.

В режиме стационарных колебаний выполняются соотношения [158, 187, 188, 196, 197].

$$G_c(\omega) + G_d(\omega, U_m, I_0) = 0; \quad (3.17)$$

$$B_c(\omega) + B_d(\omega, U_m, I_0) = 0; \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial(B_d + B_c)}{\partial \omega} > 0; \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial(G_d)}{\partial U_m} < 0, \quad (3.20)$$

где G_d , G_c и B_d , B_c – активная и реактивная составляющие проводимости ЛПД и КВЧ системы соответственно;

U_m – амплитуда напряжения на активном элементе; ω – круговая частота;

I_0 – ток питания диода.

Проверку условий (3.17), (3.18) целесообразно проводить на клеммах

1-1' (рис.3.12), так как при этом можно разграничить линейную и не линейную части схемы и не проводит доказательства инвариантности условий (3.19), (3.20) в произвольной плоскости рассеечения схемы.

Полагаем, что B_d не зависит от U_m , а в выражении (3.17) можно разделить переменные ω , U_m и представить $G_d(\omega, U_m, I_0)$ в следующем виде:

$$G_d(\omega, U_m, I_0) = |G_{d\max}(\omega, I_0)| \cdot \frac{U_m(I_0) - U_{\max}(I_0)}{U_{\max}(I_0)}, \quad (3.21)$$

Тогда из уравнений (3.17), (3.18) можно найти частоту генерации:

$$\omega_z = f(a, b, d, l_1, l_2, Q_0, Q_s, \omega_p), \quad (3.22)$$

где ω_p – частота внешнего резонатора.

В процессе нахождения ω_z определяются:

- потери мощности на стабилизацию

$$L = -10 \cdot \lg \frac{G_{C2} + G_{H2}}{G_{H2}}, \quad \omega = \omega_z, \quad (3.23)$$

где G_{C2} и G_{H2} – соответственно активные составляющие проводимости КВЧ системы и нагрузки генератора на клеммах 2-2';

- коэффициент стабилизации частоты

$$S = \frac{\Delta(B_d + B_c)_{\tilde{n}\tilde{o}}}{\Delta\omega} \bigg/ \frac{\Delta(B_d + B_c)_{i\tilde{n}}}{\Delta\omega}, \quad \begin{matrix} \omega = \omega_{\tilde{a}} \\ \omega \rightarrow 0 \end{matrix}, \quad (3.24)$$

где индекс *st* относится к стабилизированному, а *nc* – к генератору с

закороченным внешним резонатором (нестабилизованный ГЛПД);

- внешняя добротность генератора

$$Q_{\hat{a}i} = \frac{\omega_{\hat{a}}}{2 \cdot G_{i1}} \cdot \frac{\Delta(B_d + B_c)}{\Delta\omega}. \quad (3.25)$$

На рис. 3.13 показана зависимость частоты генерации $\omega_{\text{г}}/\omega_0$ от резонансной частоты стабилизирующего резонатора ω_p/ω_0 для ГЛПД со следующими параметрами: $d/a=0,167$; $b/a=0,278$; $l_1/a=0,806$; $l_2=0$; $Q_0=5000$; $Q_{\text{вн}}=1000$.

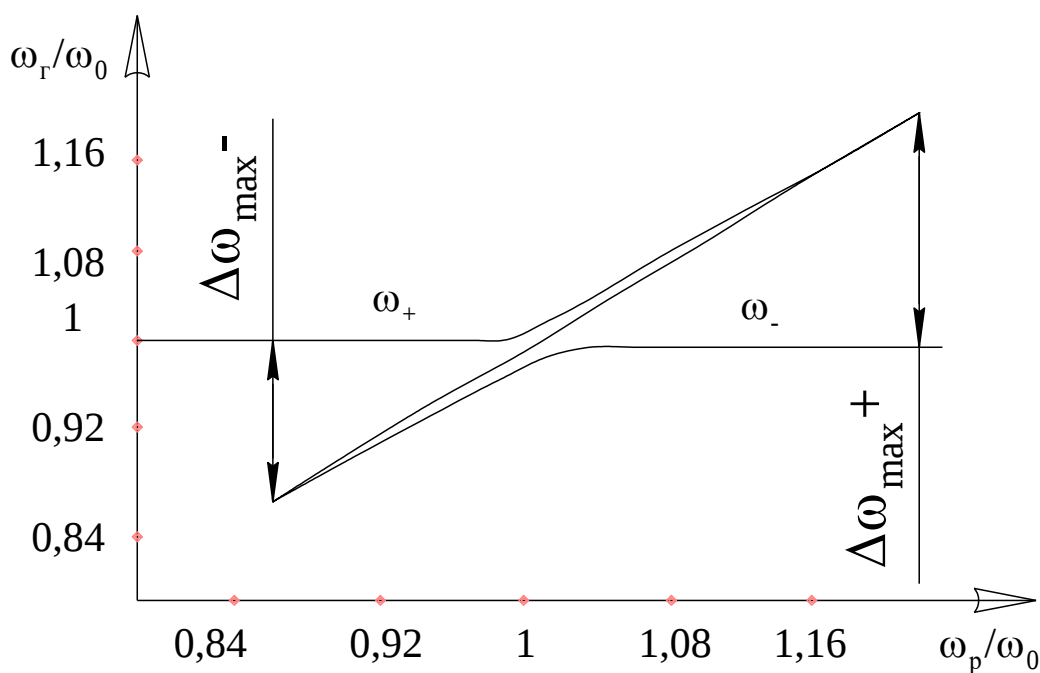


Рис. 3.13. Зависимость частоты генерации $\omega_{\text{г}}/\omega_0$ от резонансной частоты стабилизирующего резонатора ω_p/ω_0 .

Из рис 3.13 видно, что при перестройке частоты возможны две кривые генерации ω_+ и ω_- , для которых справедливы условия (3.17) и (3.18). Для

кривой ω_- величина $\frac{\delta(B_d + B_c)}{\delta\omega} < 0$, поэтому точки $\omega_c/\omega_0=0,86$ и $\omega_c/\omega_0=1,212$ являются неустойчивыми, а при $\omega_p/\omega_0 < 0,86$ и $\omega_p/\omega_0 > 1,212$ возможна генерация только на одной из кривых – соответственно ω_+ или ω_- .

Предположим, что генератор устойчиво работает на кривой ω_+ в точке $\omega_p/\omega_0=0,8$.

При возрастании ω_p/ω_0 значение ω_c/ω_0 увеличивается, а величина $(\omega_c - \omega_p)/\omega_0$ уменьшается, то есть частота генерации “подтягивается” к резонансной частоте внешнего резонатора. В точке $\omega_p/\omega_0=1,212$ генерация возможна только на частоте $\omega_c/\omega_0 \approx 1$ (на кривой ω_-). При $\omega_p/\omega_0 > 1,212$ частота ГЛПД практически не изменяется и равна частоте не стабилизированного генератора ω_0 .

На рис. 3.14 приведены зависимости потери мощности на стабилизацию (L) и коэффициента стабилизации частоты (S) от резонансной частоты стабилизирующего резонатора ω_p/ω_0 .

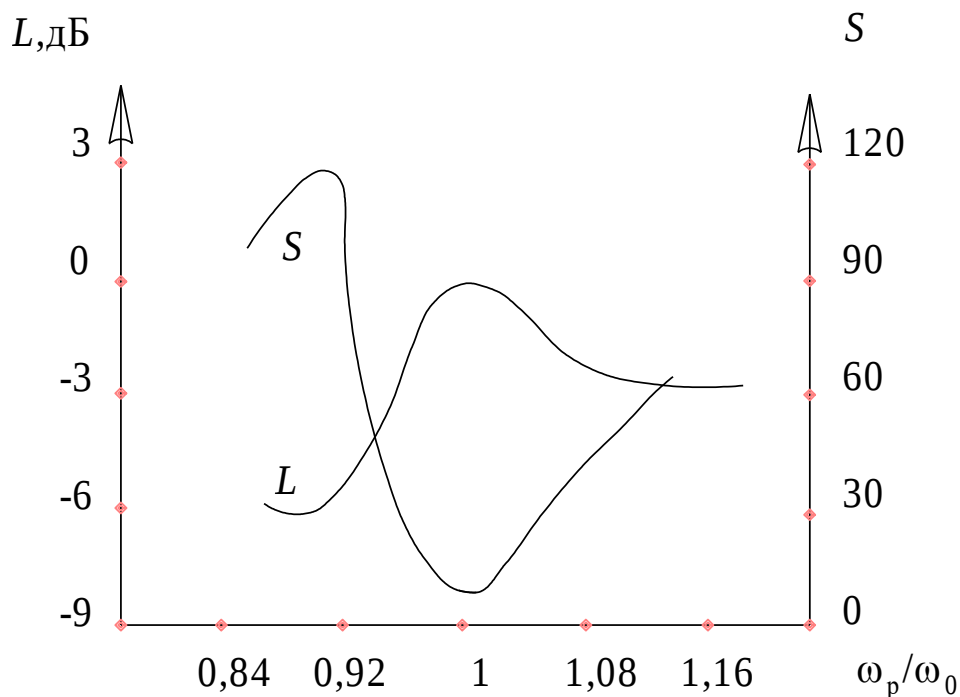


Рис. 3.14. Зависимость потери мощности на стабилизацию (L) и коэффициента стабилизации частоты (S) от ω_p/ω_0 .

Из анализа зависимостей (рис. 3.14) следует, что при перестройке частоты внешнего резонатора потери мощности на стабилизацию (L) на участке $\omega_p/\omega_0 > 1$ меньше, чем на участке $\omega_p/\omega_0 < 1$. Кроме того, на участке $\omega_p/\omega_0 > 1$ имеется область, где потери на стабилизацию частоты практически неизменны.

На рис 3.15 приведены зависимости полосы перестройки $\frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_0}$ и потерь мощности на стабилизацию L от соотношения $Q_0/Q_{\text{вн}}$.

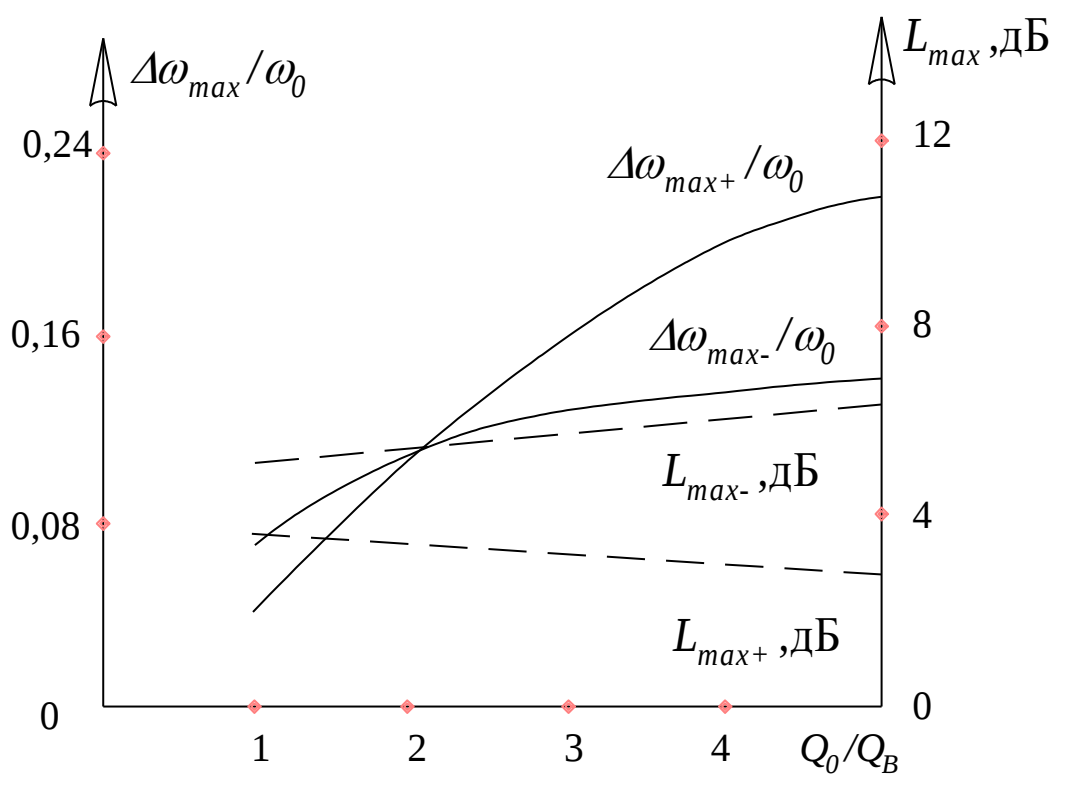


Рис. 3.15. Зависимости полосы перестройки $\frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_0}$ и потерь мощности на стабилизацию L от соотношения $Q_0/Q_{\text{вн}}$.

Из рис. 3.15 видно, что максимальные полосы перестройки $\Delta\omega_{\max+}$ и $\Delta\omega_{\max-}$ отличаются друг от друга в зависимости от соотношения $Q_0/Q_{\text{вн}}$.

Для $Q_0/Q_{вн}=2,1$ $\frac{\Delta\omega_{max+}}{\omega_0} > \frac{\Delta\omega_{max-}}{\omega_0}$, однако при этом коэффициент

стабилизации S достигает больших значений на графике участке $\omega_p/\omega_0=0,9$ (рис. 3.14). Следовательно, для получения широкой полосы перестройки частот и малых потерь мощности на стабилизацию при достаточно высоких значениях S (100) предпочтительно является кривая ω_+ .

3.5. Сложение мощностей ГЛПД в открытом бочкообразном резонаторе

Несмотря на многочисленные публикации, посвященные исследованию твердотельных источников в КВЧ диапазоне, задача создания твердотельных источников большой мощности не решена. Эта задача имеет большое значение для процессов магнитобиологии и ее можно решить путем суммирования мощности нескольких источников [198].

Сумматоры, служащие для сложения мощностей, условно можно разделить на две большие группы:

- сумматоры с независимой работой отдельных элементов;
- сумматоры, содержащие несколько взаимно связанных элементов.

К первой группе относятся сумматоры на двойном волноводном тройнике, а ко второй группе – сумматоры на трехдецибельном направленном ответвителе, на гибридном кольце и У-циркуляторы. Реально достижимая развязка плеч в двойном волноводном тройнике может составлять 30-40 дБ, в гибридном кольце – 20-30 дБ, в трехдецибельном направленном ответвителе – 15-20 дБ, в У-циркуляторах до 30 дБ.

В схемах сложения с волноводным тройником и гибридным кольцом сигналы должны проводиться ко входным плечам в одинаковой фазе, а в схеме на трехдецибельном направленном ответвителе – со сдвигом фаз на

90°, поскольку первые схемы представляют мостовые устройства синфазного типа, а схема на трехдецибелном направленном ответвителе – мостовое устройство квадратурного типа. Выполнение этих условий можно достичь включением во входные плечи фазовращателей, подбором длин плеч или путем регулирования фазы входных колебаний.

В электронике суммирование небольшого числа источников может выполняться с помощью Y - циркуляторов по последовательной или параллельной схеме [198], где на каждом элементарном сумматоре складываются только два источника, а мощность поступает на следующий сумматор. Однако, даже для сравнительно небольших потерь энергии в каждом отдельном сумматоре, общие потери могут быть большими. Если число суммируемых приборов $N=2^k$, где k – число сумматоров мощности, то общая выходная мощность равна $P_{\text{вых}}=P_0 2^k L^k$, где P_0 – выходная мощность каждого источника и L – потери на одном элементарном сумматоре. При потерях на одном сумматоре до 0,1 дБ эффективность системы из 6 сумматоров снижается до 87%, а при потерях на одном сумматоре до 0,5 дБ эффективность суммирования составит до 50%.

Приведенные результаты могут служить объяснением, почему проявляется интерес к системам параллельного типа в которых большое число источников подключено к общей нагрузке. В КВЧ диапазоне для этих целей целесообразно использовать устройства квазиоптического типа [199-202]. Открытые резонаторы (ОР) с гладкими сферически зеркалами, которые используются в генераторах как высокочастотный колебательные системы, могут быть использованы в качестве сумматоров мощности. В связи с чем представляет интерес использовать возможность применения бочкообразных резонаторов (ОБР) для создания сумматоров мощности твердотельных генераторов КВЧ диапазона.

3.5.1. Анализ собственных частот ОБР

Рассмотрим ОБР, схема которого приведена на рис. 3.16а, а сечение в

плоскости xu на рис. 3.16 б).

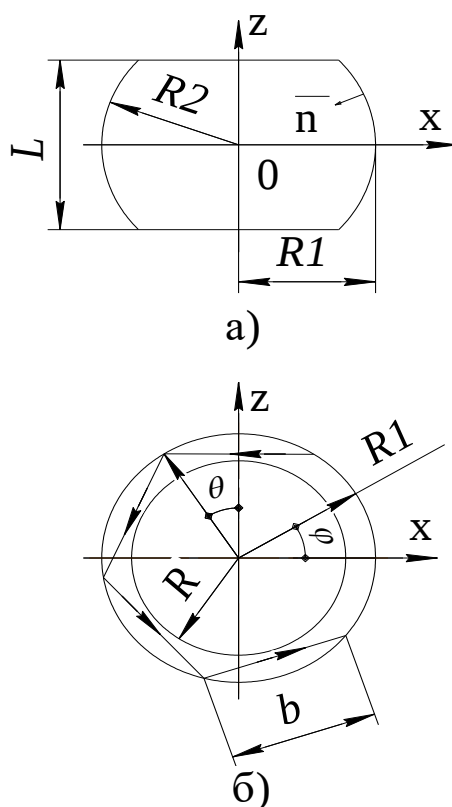


Рис. 3.16. Схема ОБР с сечением в плоскости xu .

Поверхность отражения в ОБР (рис. 3.1 б) – вогнутая металлическая стенка, ограниченная сверху и снизу двумя параллельными поверхностями $Z=\pm L/2$.

В резонаторной системе стоячие волны возникают тогда, когда длина резонатора L значительно превышает длину волны резонансного колебания λ_{mpq} в свободном пространстве. Если записать соотношение между L и λ_{mpq} в виде $L = k \cdot \lambda_{mpq}$, где k – некоторый коэффициент, то обычно $k \geq 10$.

Сократить длину резонатора можно, увеличив коэффициент отражения открытых концов, например, слегка сужая диаметр при удалении от центрального сечения.

В этом случае волны распространяются на частотах, близких к

критическим в широкой части резонатора, но отражаются от его более узких частей, являющихся “за критическим” волноводом для этих волн.

Можно ожидать, что в ОБР могут существовать высокодобротные колебания, потому что его отражающая поверхность обладает фокусирующими свойствами. Концентрация поля в азимутальной плоскости определяется радиусом кривизны R_1 . В меридианном направлении поле концентрируется за счет радиуса кривизны R_2 . Таким образом, форма резонатора напоминает бочку и правильный выбор радиусов R_1 и R_2 обеспечивает малые потери и высокое значение добротности резонатора.

Поле в ОБР формируется за счет отражения лучей от внутренней поверхности резонатора под скользящим углом θ (см. рис. 3.16 б). Многократное отражение формирует многоугольник, боковая сторона которого равна $b=2R_1\sin\theta$. Вписанная в этот многоугольник окружность является внутренней отражающей поверхностью. Число сторон многоугольника равно $N_m=2\pi/R\theta$, а общая длина луча равна периметру многоугольника $L_b=m\lambda/2$, где m азимутальный индекс, определяющий число полуволн укладывающихся в периметре многоугольника.

Для определенности будем рассматривать TM_{mpq} - волны. Если R_1 – радиус резонатора (рис. 3.16) в средней плоскости, а R_2 – его радиус в меридиальном сечении, то радиус R в плоскости $Z=const$ будет

$R(Z) = R_1 \left(1 - \frac{Z^2}{2 \cdot R_1 \cdot R_2} \right)$. Отражение волны можно ожидать в том сечении резонатора $Z=Z_c$, для которого выполняется соотношение [202]

$$\lambda_{mpq} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_c}{\xi_{mp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\xi_{mp}} \left(1 - \frac{Z_c^2}{2 \cdot R_1 \cdot R_2} \right), \quad (3.26)$$

где R_c – критический радиус для волны длиной λ_{mpq} ;

ξ_{mp} – p -й корень функции Бесселя $J_m(x)$.

Для существования стоячей волны по Z необходимо, чтобы вдоль резонатора укладывалось целое число полуволны или, что то же самое, суммарный набег фазы $\Delta\varphi$ от средней плоскости до поверхности отражения Z_c и обратно был равен целому числу π . Однако, при этом необходимо учесть, что при отражении от внутренней поверхности резонатора фаза поля дополнительно меняется на π [204].

С этой поправкой условие резонанса запишется в виде:

$$\Delta\varphi + \pi/2 = q \cdot \pi, \quad (3.27)$$

Набег фазы волны после двух проходов – до Z_c и обратно будет:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \int_0^{Z_c} 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{\Lambda_{mpq}} dz, \quad (3.28)$$

где Λ_{mpq} – длина волны резонансного колебания в резонаторе вдоль оси Z .

Длина волны в резонаторе Λ_{mpq} определяется выражением [204]

$$\Lambda_{mpq} = \frac{\lambda_{mpq}}{\sqrt{1 - \lambda_{mpq}^2 / \lambda_{cnp}^2}}, \quad (3.29)$$

где $\lambda_{cnp} = 2 \cdot \pi \cdot R / v_{mp}$ – критическая длина волны для TM_{mp} – типов колебаний;

v_{mp} – p -й корень производной функции Бесселя $J'_m(x)$.

С учетом зависимостей от Z λ_{cnp} запишется в следующем виде:

$$\lambda_{cnp}(z) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\xi_{mp}} \left(1 - \frac{Z^2}{2 \cdot R_1 \cdot R_2} \right), \quad (3.30)$$

Подставляя в (3.28) Λ_{mpq} из (3.29), учитывая выражения для λ_{mpq} (3.26) и λ_{cnp}

(3.30), получим набег фазы $\Delta\varphi$ с точностью до членов $Z^2(R_1R_2)^{-1}$

$$\Delta\varphi = 2 \cdot k_{mpq} \cdot \frac{Z_c}{\sqrt{R_1 \cdot R_2}} \cdot \int_0^{Z_c} \sqrt{1 - \left(\frac{Z}{Z_c}\right)^2} dz = k_{mpq} \cdot \frac{Z_c^2}{\sqrt{R_1 \cdot R_2}} \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (3.31)$$

где $k_{mpq} = \frac{2\pi}{\lambda_{mpq}}$ – волновое число для резонансных колебаний в свободном пространстве.

Подставляя в (3.28), получим уравнение, связывающее резонансную длину волны с координатой Z_c .

$$Z_c = \left[\frac{2 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}}{k_{mpq}} \cdot \left(q - \frac{1}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.32)$$

Резонансные длины волн λ_{mpq} найдем из (3.26), используя для Z_c выражение (3.32):

$$\lambda_{mpq} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\left[\xi_{mp} + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \cdot \left(q - \frac{1}{2} \right) \right]}, \quad (3.33)$$

Соответственно резонансные частоты будут равны:

$$f_{mpq} = \frac{C}{\lambda_{mpq}} = f_{cmp} + \frac{C}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}} \cdot \left(q - \frac{1}{2} \right), \quad (3.34)$$

$$\text{где } f_{cmp} = \frac{C \cdot \xi_{mp}}{2 \cdot \pi \cdot R_1}.$$

Оценим интервал изменения индексов m и p , принимая во внимание, что $R_1=20$ мм, $R_2=40$ мм, $\lambda_{mpq}=8$ мм, $q=1$:

$$0 \leq m \leq m_{\max}; m_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\lambda_{mpq}} = \frac{6,28 \cdot 20}{8} = 16;$$

$$0 \leq p \leq p_{\max}; p_{\max} = \frac{2 \cdot R_1}{\lambda_{mpq}} = \frac{40}{8} = 5.$$

На рис. 3.17 представлены зависимости резонансной частоты ОБР от индекса m для значений индекса p от 1 до 4.

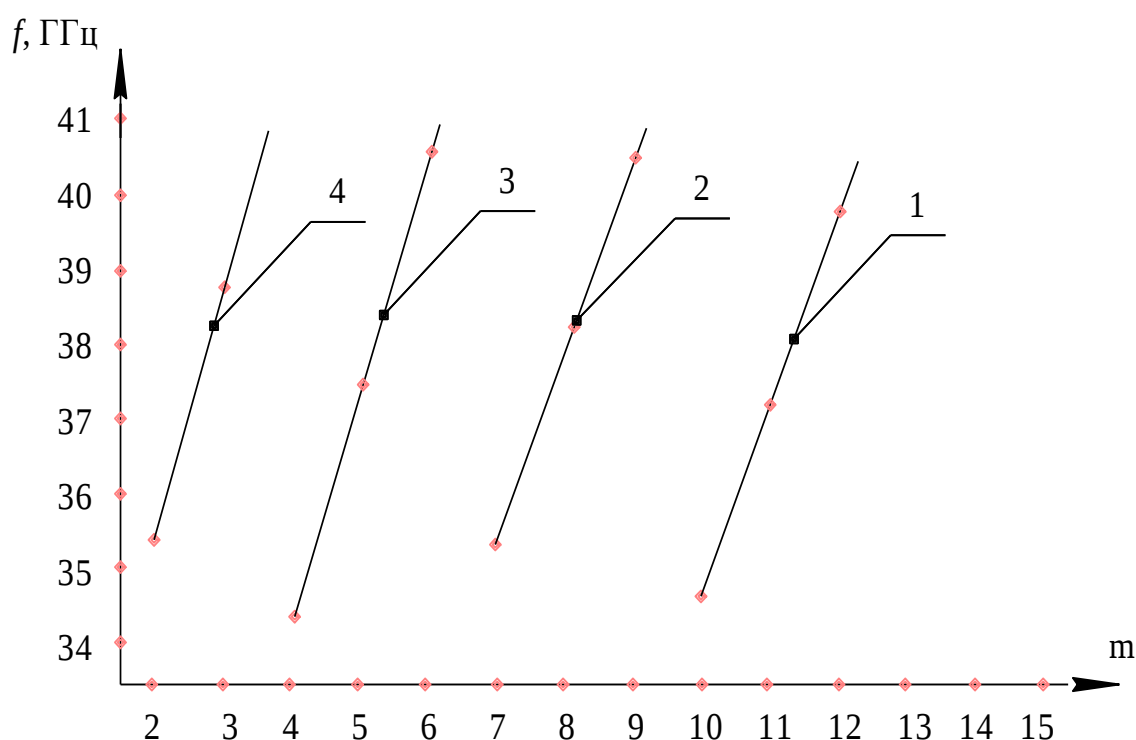


Рис. 3.17. Собственные частоты ОБР в зависимости от индексов:

1 – $p=1$;

2 – $p=2$;

3 – $p=3$;

4 – $p=4$.

Как следует из зависимостей (рис. 3.17) возможные индексы

возбуждаемой моды колебания для 37,5 ГГц будут равны: $m=5$; $p=3$; $q=1$, а для частоты 37,3 ГГц $m=11$; $p=1$; $q=1$.

3.5.2. Обоснование по размещению ЛПД в открытом бочкообразном резонаторе.

Задача по размещению ЛПД в ОБР связана с определением структуры ЭМП. В ОБР поле в сужающей части носит такой же характер, какой оно носит в за критическом волноводе, то есть быстро (экспоненциально) затухает: при $q=1$ оно имеет вид [204].

$$f(z) \approx \exp \left[\left(-\frac{1}{2} \right) \cdot \left(\frac{Z}{Z_c} \right)^2 \right], (q=1), \quad (3.35)$$

Структуру поля можно определить с помощью скалярного потенциала Φ в предположении, что $R_2 > R_1$. В этом приближении в цилиндрической системе координат мы имеем [201]:

$$\Phi(r, \varphi, z) = \frac{E_0}{K^2} \cdot J_m(k_1 r) \cdot f(z) \frac{\cos m\varphi}{\sin m\varphi}, \quad (3.36)$$

где $k_1 = \frac{\xi_{mp}}{R_1}$;

$$K = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$J_m(k_1 r)$ – функция Бесселя,

ξ_{mp} – p -й корень функции Бесселя.

Используя результаты [205, 206] выражения для компонент поля в ОБР запишем в следующем виде для волны ТМ_{mpq}-колебания.

$$\left. \begin{aligned} E_r &= \frac{E_0}{k_1 \cdot Z_c^2} \cdot J'_m(k_1 r) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot Z \cdot \exp\left(-\frac{Z^2}{2 \cdot Z_c^2}\right), \\ E_\varphi &= E_0 \cdot \frac{m_1}{R_1} \cdot \frac{1}{k_1^2 \cdot Z_c^2} \cdot J_m(k_1 r) \cdot \sin(m \cdot \varphi) \cdot Z \cdot \exp\left(-\frac{Z^2}{2 \cdot Z_c^2}\right), \\ E_z &= E_0 \cdot J_m(k_1 r) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot \exp\left(-\frac{Z^2}{2 \cdot Z_c^2}\right). \end{aligned} \right\} (3.37)$$

Используя выражения (3.37) была получена структура поля в ОБР, топология которой приведена на рис. 3.18.

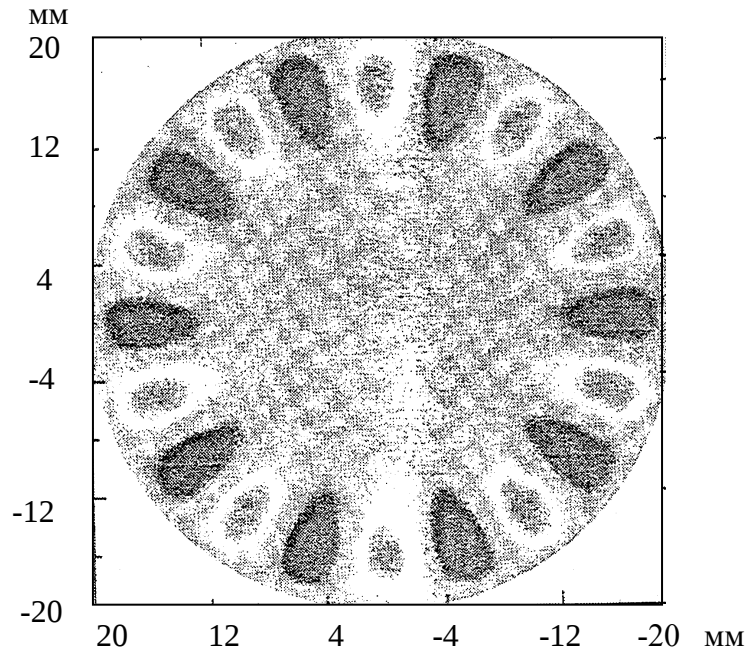


Рис. 3.18. Расчетная топология структуры ЭМП в ОБР.

Из топологии структуры поля (рис. 3.18) следует, что ЛПД следует располагать в пучности ЭМП (темная засветка), а подстройку по частоте осуществлять изменением напряжения смещения на одном из диодов.

Одним из существенных параметров сумматора мощности на ОБР является добротность.

Добротность ОБР определяется потерями в проводящих стенках, на излучение и на элементах связи с волноводным трактом (переизлучение в

тракт и рассеяние):

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{i\delta}} + \frac{1}{Q_{\delta}} + \frac{1}{Q_{\tilde{n}\hat{a}}}, \quad (3.38)$$

Для ТМ-мод выражение для добротности, определяемое потерями в стенках резонатора можно представить в следующем виде [186, 191, 192]

$$Q_{i\delta} = \frac{R_1}{\Delta_0}, \quad (3.39)$$

где $\Delta_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma}}$ – глубина скин-слоя, а σ – удельная проводимость

материала стенки резонатора.

Добротность ОБР на измерение можно определить из выражения:

$$Q_p = \frac{\pi \cdot R_1}{\lambda} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \lambda}{\pi \cdot L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\frac{\pi \cdot L^2}{4 \cdot R_1 \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}} \right) \right], \quad (3.40)$$

когда параметры ОБР лежат в пределах: $2 \cdot R_1 \leq R_2 \leq 10 \cdot R_1$, $\pi \cdot L^2 / \lambda \cdot R_1 > 1$ и $q=1$.

Относительно потерь в элементах связи ($1/Q_{св}$) волноводов с резонаторами можно сказать следующее: эти потери зависят от многих параметров и с трудом поддаются оценке. Практические размеры элементов связи подбирают при эксперименте. Поэтому реализовать расчетную добротность, как правило, не удастся.

Расчетные значения добротности для заданных параметров ОБР и длины волны 8 мм лежат в пределах от $10 \cdot 10^4$ до $70 \cdot 10^4$.

Выводы

1. Для получения выходной мощности 4000-5000 мВт, в диапазоне

частот 36...39 ГГц, необходимо в ГЛПД применять радиально-волноводный резонатор с параметрами: радиальная высота линии - $h=0,4$ мм; отношение диаметра диска к ширине волновода - $d/a=0,52$.

2. Получение относительной нестабильности частоты ГЛПД в пределах $10^{-6}...10^{-7}$ возможно за счет внешнего стабилизирующего резонатора с собственной добротностью $(2...5) \cdot 10^3$ и внешней 10^3 .
3. Для получения мощности 4...5 Вт, в диапазоне частот 36...39 ГГц, следует в качестве сумматора мощности использовать открытые бочкообразные резонаторы с параметрами: радиус резонатора в средней плоскости - 20 мм; радиус в меридиальном сечении - 40 мм; возбуждаемые моды колебаний:

$$m=5; p=3; q=1, \text{ (частота } 37,5 \text{ ГГц)}$$

$$m=11; p=1; q=1, \text{ (частота } 37,3 \text{ ГГц)}.$$

4. В сумматоре мощности на основе ОБР (добротность до $70 \cdot 10^3$) можно располагать в пучностях ЭМП до 10 диодов.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
КРАЙНЕВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ
НА СЕМЕНА ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

4.1. Цель и задачи экспериментальных исследований

Создание электромагнитной технологии повышения урожайности тепличных культур привело к необходимости проверки достоверности подходов и моделей, описывающих процесс взаимодействия электромагнитного излучения КВЧ диапазона с семенами тепличных культур, а также подтверждения возможности практической реализации высокостабильных, перестраиваемых по частоте источников КВЧ излучения для предпосевной обработки семян.

В соответствии с целью экспериментальных исследований были определены задачи эксперимента и пути их решения:

- разработка, макетирование и проведение измерения характеристик высокостабильного генератора, перестраиваемого по частоте в диапазоне 36-39 ГГц;
- разработка технических средств для регистрации биоэлектрических характеристик семян и растений;
- проведение лабораторных исследований с семенами тепличных культур по определению оптимальных технологических параметров, вызывающих повышение их урожайности и качества;
- проведение производственных испытаний по предпосевной обработке семян тепличных культур, обработанных низкоэнергетическим ЭМП КВЧ диапазона;
- разработка практических рекомендаций по предпосевной обработке

семян тепличных культур низкоэнергетическим крайне высокочастотным излучением.

4.2. Разработка и анализ технических параметров генератора КВЧ диапазона для предпосевной обработки семян тепличных культур

На основании теоретических исследований был изготовлен опытный образец генератора на ЛПД стабилизированный по частоте внешним резонатором. В качестве внешнего стабилизирующего резонатора был использован цилиндрический, включенный по схеме на отражение (рис. 4. 1.)

На рис. 4.1 приведена конструктивная схема генератора, а на рис. 4.2 – его внешний вид.

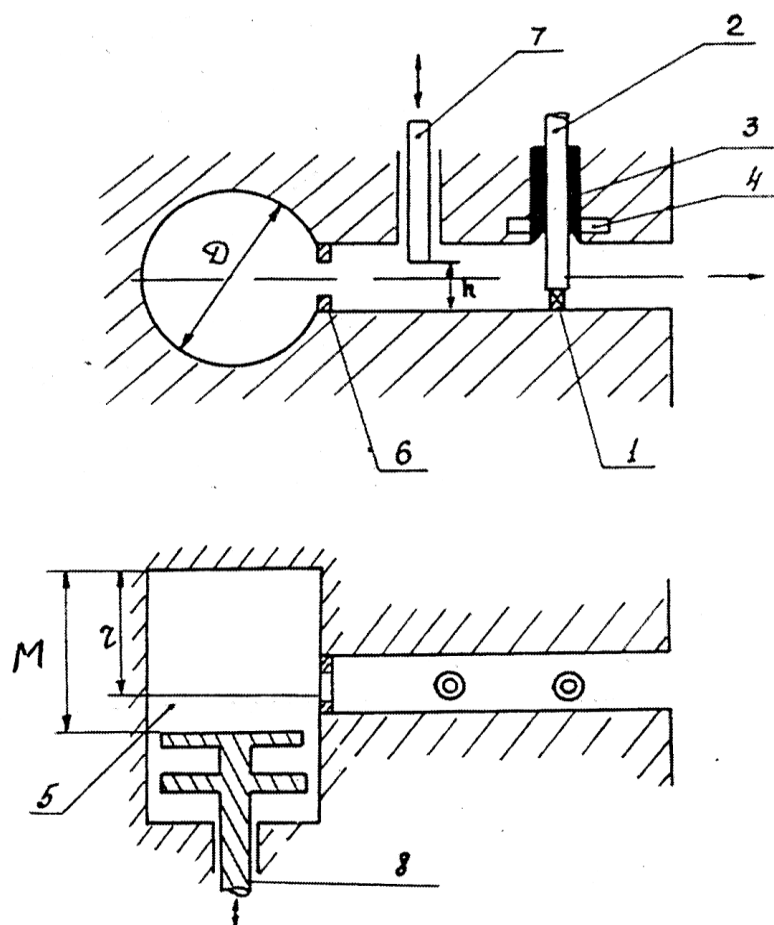


Рис. 4.1. Схема конструкции стабилизированного ГЛПД

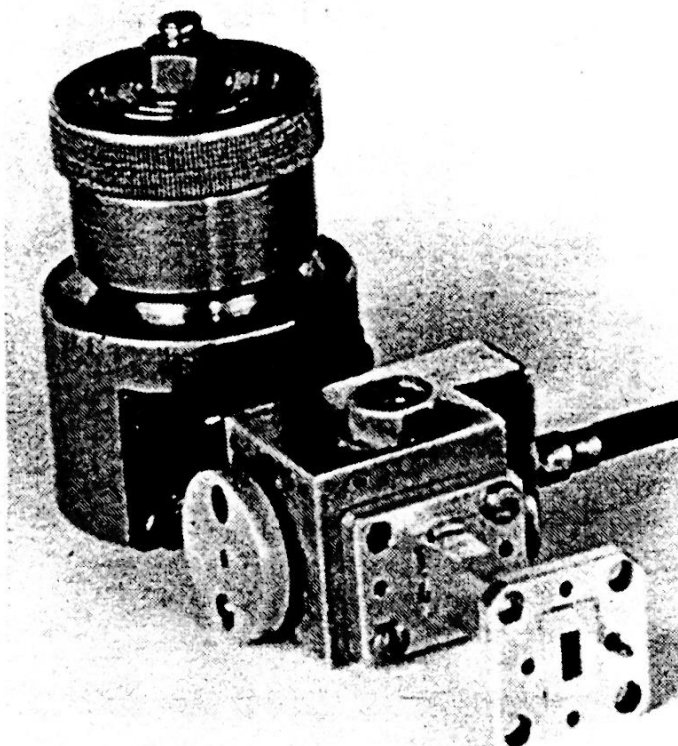


Рис. 4.2. Внешний вид ГЛПД

В генераторе диод 1 (ЛПД) (рис. 4.1) крепится с помощью металлического штыря 2. Для предотвращения возможных паразитных колебаний вне диапазона перестройки в цепь питания диода включена поглощающая нагрузка 3 и радиальный фильтр 4.

Цилиндрический резонатор 5 изготовлен из латуни и имеет следующие геометрические размеры: диаметр $D = 12$ мм; длина = 40 мм. Резонатор возбуждается с помощью отверстия связи 6 диаметром 2 мм, расположенного на расстоянии $r = 6$ мм от задней стенки резонатора. Регулировка коэффициента связи между резонаторами осуществляется подстроечным штырём 7 диаметром 1 мм, расположенным в центре широкой стенки волновода на расстоянии l от отверстия связи. Перестройка частоты осуществляется бесконтактным подстроечным поршнем 8. Для подавления вырожденных колебаний на подстроечном поршне сделан дроссельный вырез.

На рис. 4.3. приведена функциональная схема экспериментальной установки для определения добротности и коэффициента связи со стабилизирующим резонатором (СР), полосы частотной перестройки и качества спектра.

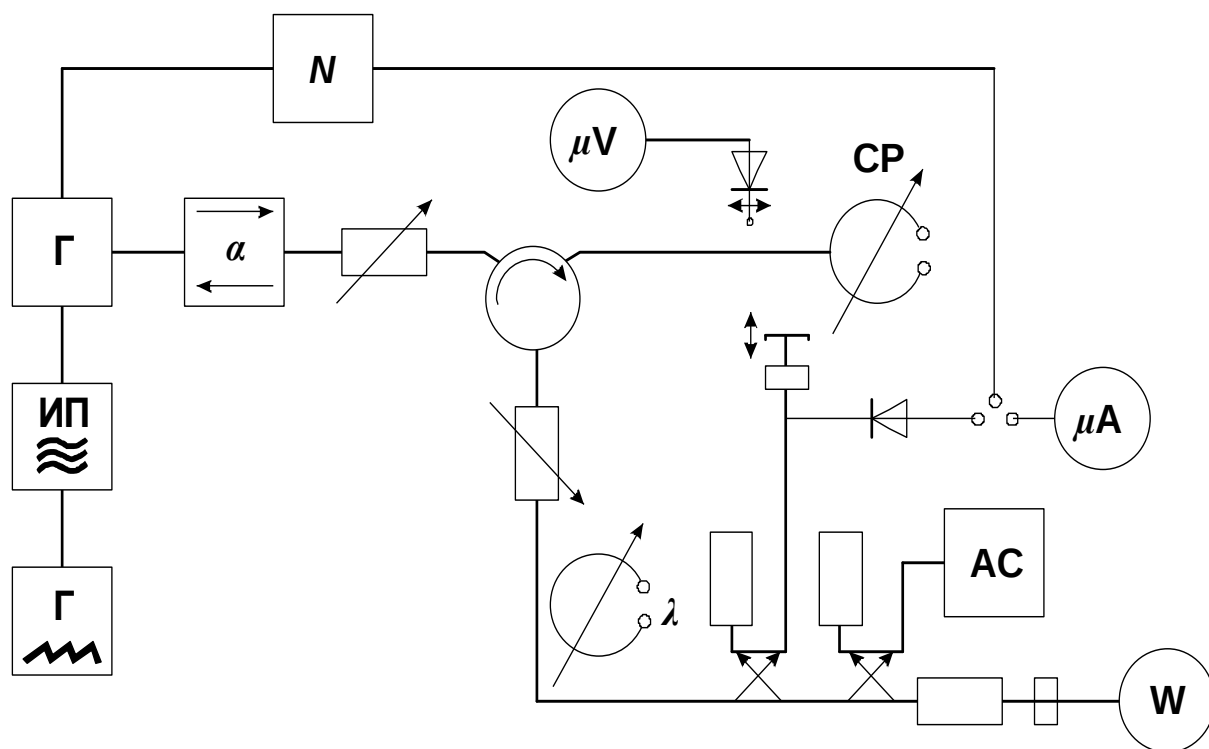


Рис. 4.3. Функциональная схема установки для определения добротности и коэффициента связи со стабилизирующим резонатором.

Источником колебаний служит клистронный генератор К 43-А, согласованный с СВЧ трактом при помощи вентиля и аттенюатора. Сигнал с генератора пилообразного напряжения одновременно поступает на отражатель клистрона и электронный осциллограф С1-54. Этим достигается синхронность запуска клистрона и развёртки осциллографа. Модулированные по частоте радиоимпульсы через ферритовые вентили, аттенюатор, циркулятор, измерительную линию поступают в СР. Отражённый от СР сигнал через измерительную линию, циркулятор проходит в схему, состоящую из анализатора спектра С4-27, детектора,

термистора и измерительного моста. Если СР настроен в резонанс, то на экране осциллографа возникает всплеск, повторяющий форму резонансной кривой СР. Одновременно на анализаторе спектра видна резонансная кривая СР. Определяя частоту сигнала с помощью волномера и ширину резонансной кривой на анализаторе спектра на уровне половинной мощности, вычисляем величину добротности СР как отношение $f / \Delta f$. Абсолютная погрешность измерения добротности не превышает 10%. Коэффициент связи определяется по измеренной величине КСВН и по виду резонансной кривой на осциллографе.

Структурная схема измерения основных характеристик ГЛПД представлена на рис. 4.4.

В данной схеме в качестве опорного генератора использовался генератор Г4-82, стабилизированный по частоте ФАПЧ по эталону частоты на частоте 6500 мГц.

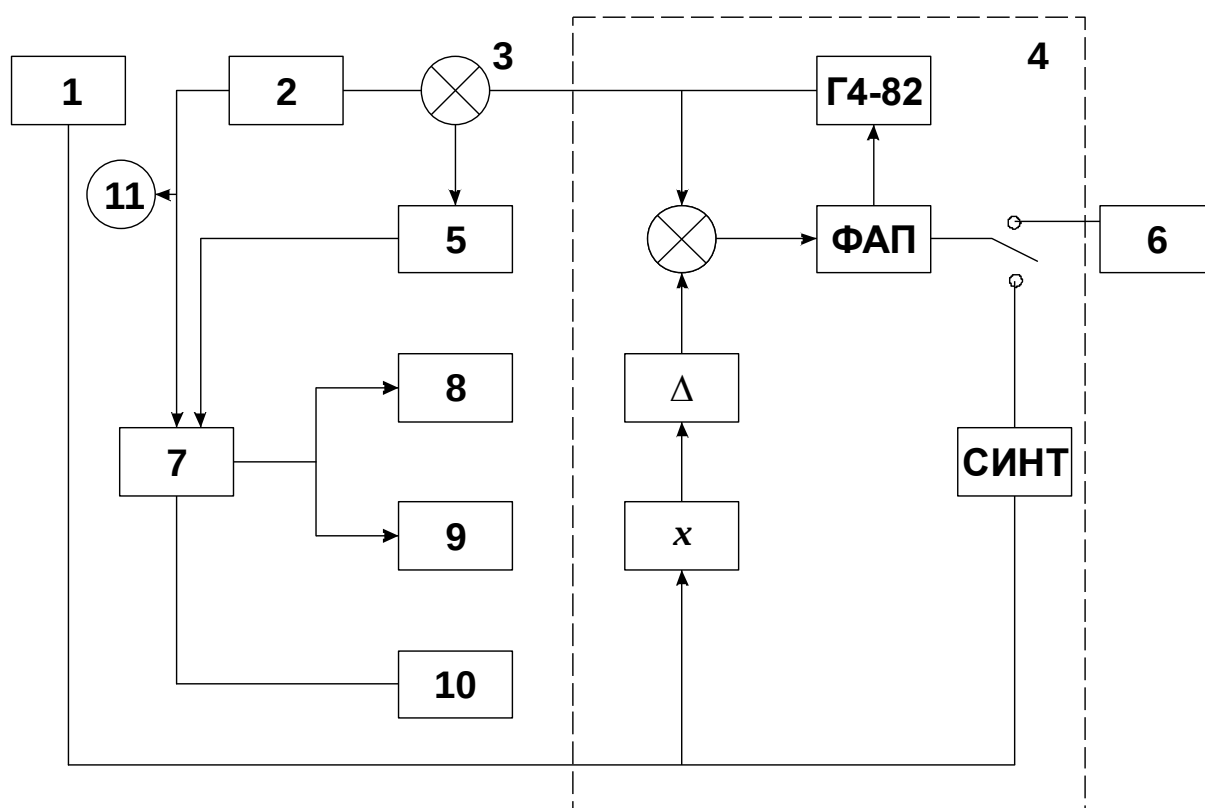


Рис. 4.4. Структурная схема стенда для исследования характеристик ГЛПД:

- 1 – высокостабильный генератор 10 мГц (эталон);
- 2 – исследуемый генератор (ГЛПД);
- 3 – смеситель-умножитель;
- 4 – опорный генератор;
- 5 – УПЧ;
- 6 – синтезатор 46-31;
- 7 – 47-42;
- 8,9 – анализаторы спектра С4-48 и С4-29;
- 10 – ЭСЧ с ПЭВМ;
- 11 – ваттметр.

Гармоники опорного генератора смешиваются с выходной частотой ГЛПД. Разностная частота после усиления поступает на прибор 47-42, на второй вход которого сигнал поступает от синтезатора 46-31. При равенстве исследуемых частот производится измерение нестабильности частоты. Чтобы произвести измерения во временной области синтезатором 46-31, создаётся разностная частота, которая измеряется частотомером 43-64. Измерение мощности на выходе ГЛПД осуществляется ваттметром.

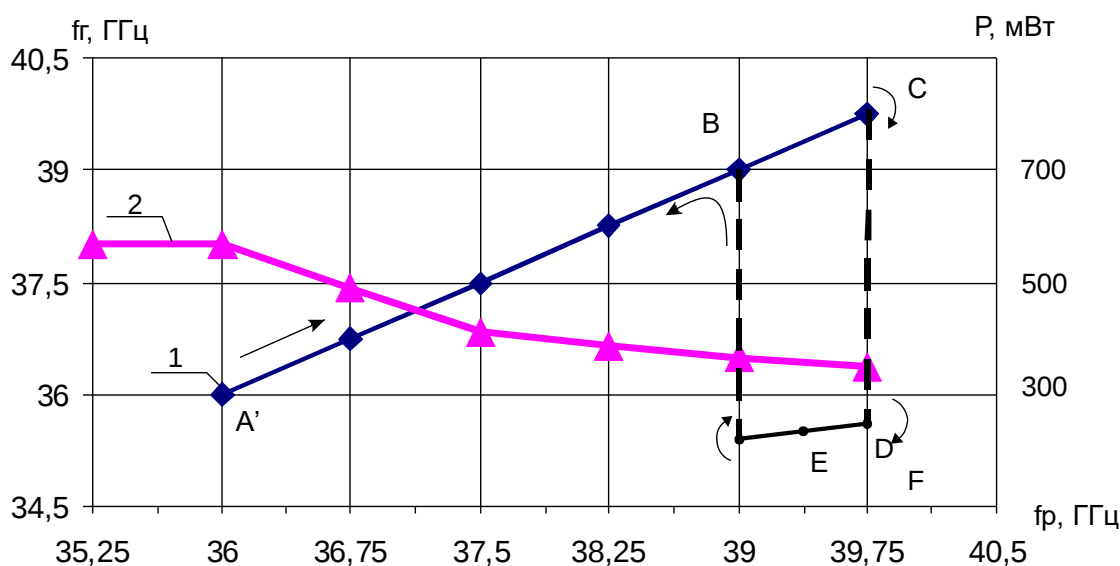


Рис. 4.5. Зависимость частоты и мощности генерации от частоты стабилизирующего резонатора:

1 – зависимость частоты f_r от f_p ;

2 – зависимость мощности от f_p .

Собственная добротность стабилизирующего резонатора на частоте $f = 37,5$ мГц составила $Q_o = 3400$, для $M = 40$ мм.

Зависимость частоты генерации f_r от изменения частоты стабилизирующего резонатора приведена на рис. 4.5.

На графиках (рис. 4.5) стрелками показано направление перестройки частоты и мощности ГЛПД. На графике 1 между точками А и В частота генерации является устойчивой, т.е. при включении-выключении источника питания не происходит перескока частоты генерации. Участок ВС соответствует неустойчивости частоты генерации, т.е. при включении-выключении происходит перескок на частоты, соответствующие участку ЕД.

Коэффициент связи изменяется в пределах от 0,2 до 0,8. Поэтому для практических целей необходимо выбирать участок АВ, который составляет 1200 мГц. Полоса неустойчивой работы составляет 0,03%. Величина выходной мощности ГЛПД на частоте 37,5 ГГц составляет 650 мВт и почти совпадает с расчётным значением.

На рис. 4.6. приведена зависимость диапазона устойчивого затыгивания частоты от коэффициента связи между резонаторами.

Из зависимости (рис. 4.6.) видно, что с увеличением коэффициента связи между резонаторами расширяется диапазон затыгивания. В данном эксперименте при затыгивании частоты ГЛПД стабилизирующим резонатором $Q_n = 1900$ ($p = 0,8$) коэффициент стабилизации частоты 5 составил более 100 единиц.

Для практического применения ГЛПД целесообразно выбирать максимальный коэффициент стабилизации в диапазоне устойчивой работы генератора, т.е. ближе к точке В (рис. 4.5), так как в этом случае сигнал менее чувствителен к дестабилизирующим факторам.

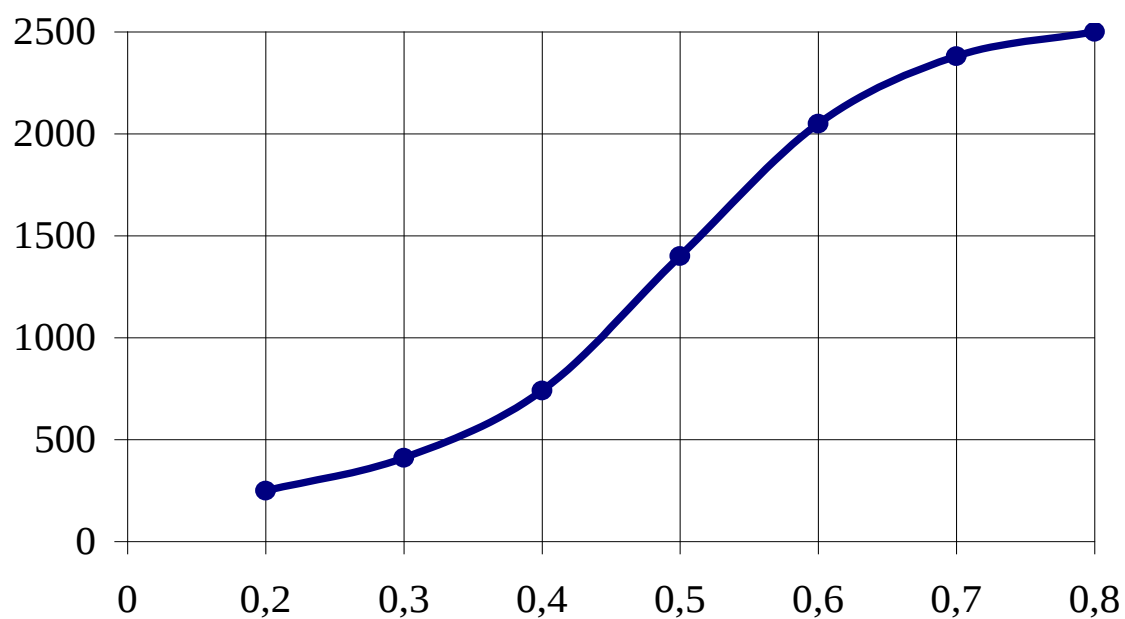


Рис. 4.6. Зависимость полосы затыгивания частоты от коэффициента связи между резонаторами.

Результаты измерений нестабильности частоты представлены на рис. 4.7.

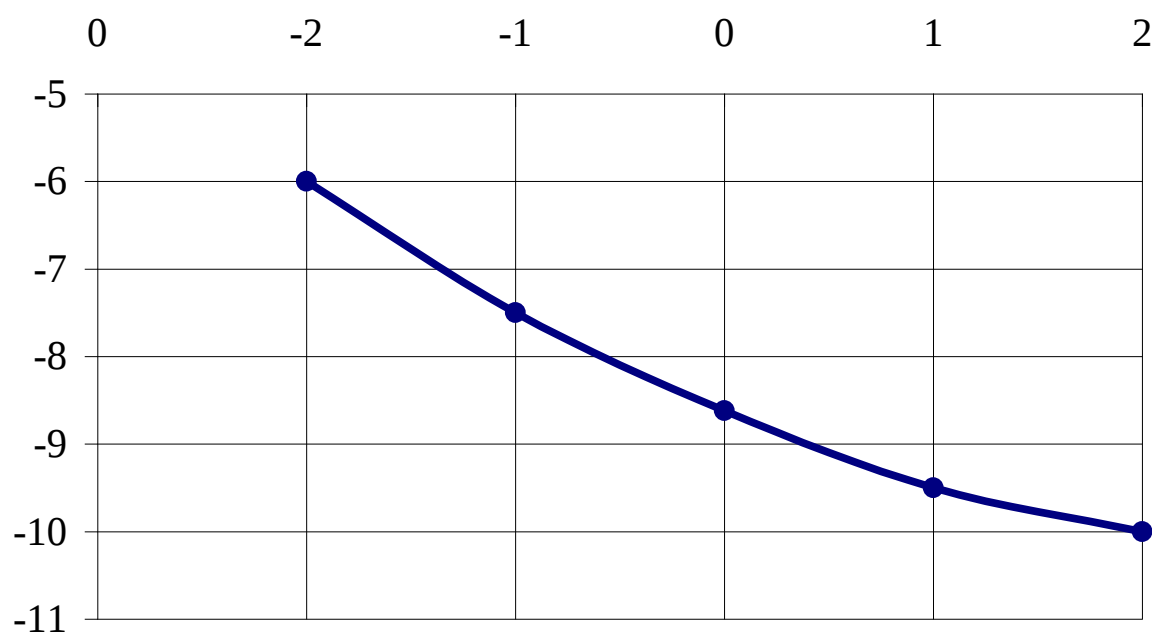


Рис. 4.7. Нестабильность частоты ГЛПД КВЧ диапазона 36-39 ГГц.

Проведённые исследования показывают (рис. 4.7.), что кратковременная относительная нестабильность частоты ГЛПД в диапазоне частот 36-39 ГГц составляет не более 10^{-6} .

4.3. Обоснование технических средств для регистрации биоэлектрических характеристик семян и растений тепличных культур.

Анализ литературных источников показал, что для получения интегральной информации о состоянии растительного организма под действием физических факторов применяются электрофизические методы. Наиболее информативными среди них являются методы динамической регистрации градиентов биоэлектрических потенциалов.

Критерием для выбора методов биоэлектрических измерений семян является степень повреждаемости организма и стабильность измеряемой величины в процессе исследований.

Используются контактные и бесконтактные методы. При бесконтактных измерениях БЭП применяется вибрирующий электрод Скотта или способ с ионизацией воздушного промежутка между поверхностью растения и измерительным электродом с ионизирующим излучением. Достоинством этих методов является отсутствие непосредственного контакта с исследуемым объектом, а недостаток заключается в трудностях точной локализации места исследования из-за больших размеров измерительных электродов, площадь которых составляет примерно 10 см^2 . Поэтому биоэлектрические характеристики семян регистрировали методом поверхностного отведения БЭП. Данный метод позволяет регистрировать БЭП в течение суток без травмирования поверхности семян. Оптимальная площадь контакта измерительного электрода с поверхностью объекта определяется из требований наименьшего травмирования семян и необходимой точности измерений и находится в пределах $1 \div 2 \text{ мм}^2$.

Методы поверхностного отведения основаны на прямом контакте измерительного электрода с поверхностью растительного организма через слабый электролит, специальные электропроводящие контактные гели и раствор Кнопа. Для замера электрофизических параметров применяются поляризующиеся и неполяризующиеся электроды. Наибольшее широкое практическое распространение получили неполяризующиеся каломельные и хлорсеребряные электроды.

Основными требованиями к установкам, позволяющим осуществлять биометрию семян являются: согласование импедансов измерительной схемы и объекта исследований (семенника); гальваническое разделение импедансов измерительных цепей преобразователей; помехоустойчивость и минимизация собственных помех измерительной аппаратуры.

Регистрация БЭП растений производится с помощью измерительных усилителей с входным сопротивлением $\sim 10^9$ Ом. Для обоснования возможности использования данной аппаратуры для измерения БЭП семян рассмотрены следующие доводы.

Чтобы измеряемая разность БЭП была близка к истинной, сопротивление входа прибора должно значительно превышать сопротивление внешней цепи. Это исключает также влияние измерительного прибора на электрогенез растительного организма. Поэтому необходимо определить электрическое сопротивление семян с учетом площади контакта электрода с поверхностью объекта. Для этого рассматривали известную схему замещения системы объект–датчик–измерительный прибор [207,208], для которой разность электрических потенциалов U_{R4} определяется из уравнения:

$$U_{R4} = \frac{U_S R_2 (R_3 + R_4)}{(R_C + R_2) \cdot (R_3 + R_4) + R_3 R_4}, \quad (4.1)$$

где U_S – собственная ЭДС зерновки (семени), В;
 R_C – электрическое сопротивление зерновки, Ом;
 R_2 – сопротивление цепи измерительных электродов, или датчиков, Ом;
 R_3 – измерительный резистор, Ом,
 R_4 – входное сопротивление измерительного прибора, Ом;
 S_1 – выключатель.

Сопротивление семенников рассчитывали по результатам двух измерений U_{R4} при замкнутой и разомкнутой цепи сопротивления R_3 :

$$R_S = \frac{U'_{R4} - U''_{R4}}{\frac{U''_{R4}}{R_3} + \frac{U''_{R4} - U'_{R4}}{R_4}} - R_2, \quad (4.2)$$

U'_{R4}, U''_{R4} – разность потенциалов соответственно при разомкнутой и замкнутой цепи сопротивления R_3 .

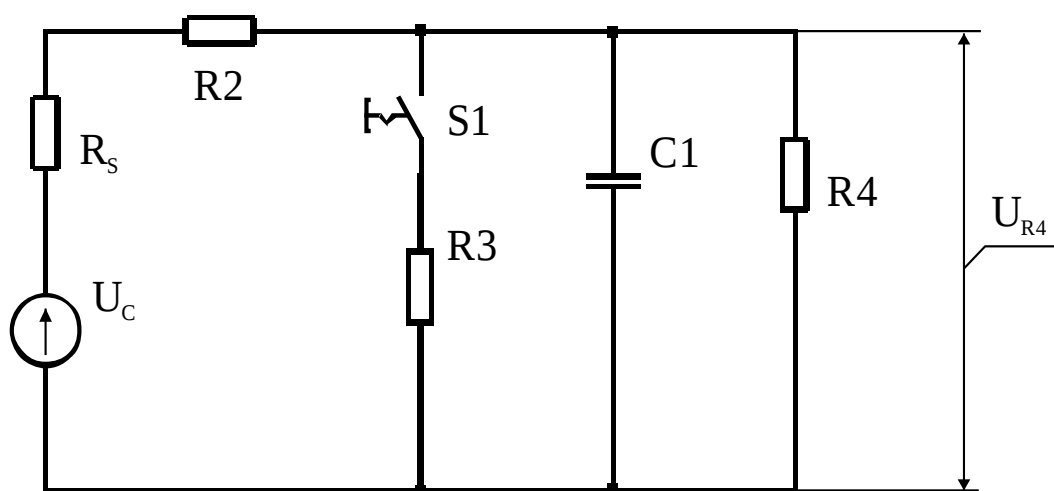


Рис. 4.8. Эквивалентная схема замещения системы семенник– датчик–измерительный усилитель.

U_C – собственная ЭДС (БЭП) семенника;

R_S – эквивалентное электрическое сопротивление семенника;

R_2 – эквивалентное сопротивление датчиков;

R_3 – измерительный резистор;

R_4 – входное сопротивление измерительного усилителя;

S_1 – выключатель;

C – входная емкость измерительного прибора.

В результате измерений установлено, что электрическое сопротивление семенника огурца ТСХА 575 находится в пределах $R_S = 10^8 \div 10^9$ Ом в зависимости от формы семян, влажности и других факторов. С учетом сопротивления измерительных электродов ($1,5 \cdot 10^5$ Ом) и смоченных равномерно водопроводной водой соединительных хлопчатобумажных фитилей (10^6 Ом), электрическое сопротивление внешней цепи не превышает 10^9 Ом.

Тогда, при допустимой ошибке 1,5% величина входного сопротивления измерительных усилителей, используемых при измерениях БЭП семян должна быть не менее 10^{11} Ом.

Диапазон измеряемых прибором постоянных напряжений:

– 3000...0...+3000 мВ

Поддиапазон измеряемых прибором постоянных напряжений:

–300...0...+300мВ.

Таким образом, с помощью этих приборов можно проводить измерения БЭП семян.

На основании вышеуказанных диапазонов измеряемых параметров была собрана установка, используемая для измерения БЭП семян, которая позволяет производить одноразовые и непрерывные измерения. Схема установки для регистрации БЭП семян представлена на рис. 4.9. Блок обработки результатов показан на рис. 4.10.

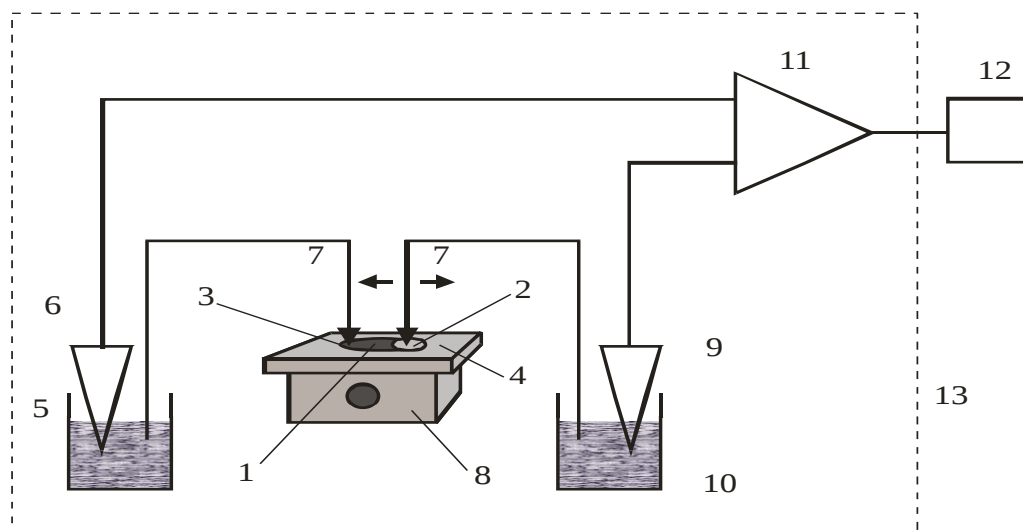


Рис. 4.9. Схема установки для регистрации БЭП семян:

1 – семенник; 2 – зародыш; 3 – морфологически противоположный зародышу участок плодовой оболочки; 4 – предметное стекло; 5,10 – пробирки с водопроводной водой; 6 – электрод сравнения; 7 – хлопчатобумажный фитиль; 8 – микрометрический винт; 9 – измерительный электрод; 11 – измерительный усилитель; 12 – блок обработки результатов; 13 – экранированная камера.

Для обеспечения контакта измерительного блока 11 с семенником 1 (зародыш 2 и плодовая оболочка 3) использовали хлопчатобумажные фитили 7, смоченные водопроводной водой. Фитили одним концом соединяли с измерительными электродами ЭВЛ 6 и 9 через пробирки с водой 5 и 10, другим – с зерновкой, осторожно касаясь ее поверхности. Перемещения контактного фитиля вдоль поверхности (по длине) зерновки проводили плавно с помощью микрометрического винта 8. Пробирки с водой обеспечивали длительное и равномерное смачивание хлопчатобумажных фитилей. Зерновку помещали на предметное стекло 4, которое крепили на механических держателях штатива. Для повышения помехоустойчивости установки все измерения проводили в

экранированной камере 13.

Таким образом, установка и измерительный блок обеспечивали получение достоверных и воспроизводимых результатов при измерениях БЭП семян в условиях практически полного исключения влияния измерительной аппаратуры на объект измерения[209].



Рис. 4.10. Общий вид блока обработки результатов.

Диапазон измеренной разности потенциалов, В $\pm 0,001 - \pm 10$ (канал1);

$\pm 0,001 - \pm 1$ (канал2);

Границы значений основной погрешности измерений, которые допускаются, не больше, % 0,5

Входное сопротивление, Мом, не меньше 20

Объем памяти, не меньше, Mb 256 (CF-Карта)

Количество измерений (при CF 256Mb), не меньше:

- в режиме электронного самописца
- в режиме измерения поляризационного потенциала, 3000

Средний потребляемый ток, mA 80

Отбор образцов осуществляли согласно ГОСТ 12036–84. Основное требование к отбору образцов заключается в том, чтобы средний образец состоял из тех же самых компонентов, что и партия семян. На отобранных образцах семян измерения градиентов БЭП проводили вдоль их поверхности между зародышевой частью и плодовой оболочкой зерновки. Такой выбор обусловлен тем, что зародыш является областью активации метаболических процессов во время перехода семян в физиологически иное состояние. Измерения проводили со 100–кратной повторностью. Осуществляли статистическую обработку результатов измерений.

Распределение БЭП семян по длине зерновки представлен на рис.4.11. Характер распределения БЭП показал, что наиболее информативными зонами являются зародыш 1 и локально расположенная область плодовой оболочки, где флуктуации БЭП во времени и под действием внешних факторов минимальны. Разность БЭП между этими частями зерновки составляет $5 \div 30$ мВ (или $6 \div 40$ мВ/см) в зависимости от физиологического состояния семян. Установлено, что зародыш по отношению к плодовой оболочке имеет отрицательный знак для здоровых физиологически активных семян и положительный – для семян, находящихся в состоянии покоя.

Низкие значения БЭП (меньше 10 мВ) по абсолютному показателю свидетельствуют о болезни, поврежденности, низких посевных качествах семян. Распределение БЭП от зародыша вдоль поверхности по длине семенника носит экспоненциальный характер (Рис 4.11).

Для разработки электрофизического метода определения жизнеспособности семян и прогнозирования их посевных качеств проведены экспериментальные исследования по получению зависимости биоэлектрической активности и показателей посевных качеств семенного материала.

Сравнивали разность БЭП между зародышем и морфологически

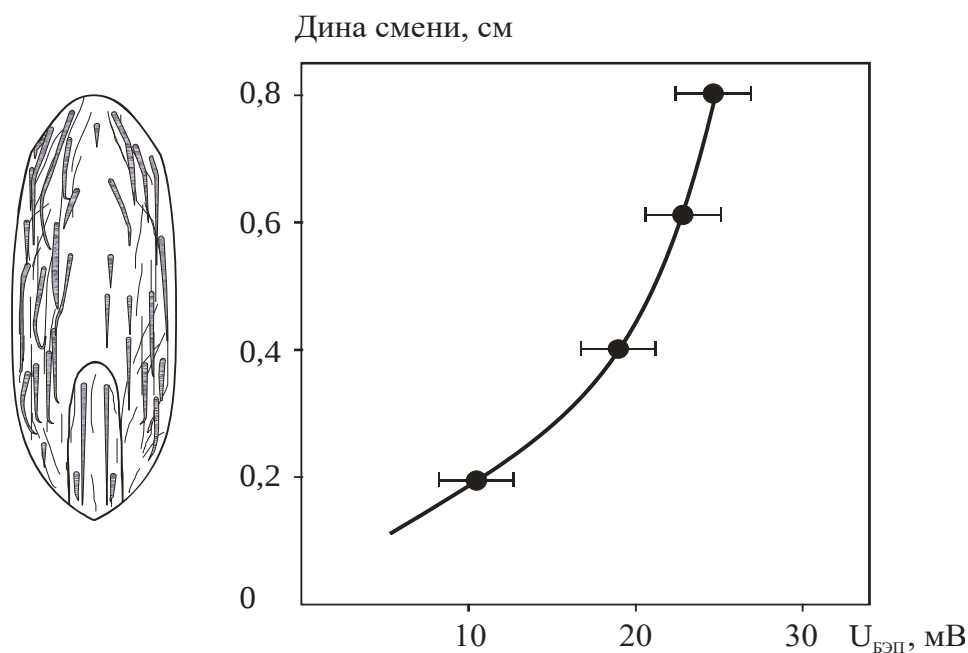


Рис. 4.11. Распределение биоэлектрических потенциалов вдоль поверхности семян:

1 – зародыш;

2 – плодовая оболочка.

полярной частью семян огурца (ТСХА 575) и томата (гибрид Ринато) с основными показателями их посевных качеств: всхожестью, энергией, скоростью и дружностью прорастания, массой 1000 семян. Отбор образцов семян осуществляли согласно ГОСТ 12036–84. Всхожесть, энергию прорастания, скорость прорастания и дружность прорастания определяли по ГОСТ 12038–84, массу тысячи семян согласно ГОСТ 12042–80. Цель определения всхожести – установить количество семян, способных образовывать нормально развитые проростки. Для определения энергии прорастания подсчитывали нормально проросшие семена раньше срока определения всхожести.

Для проведения экспериментов были отобраны 8 образцов семян, по 100 шт. в каждом. Образцы семян с номерами от 1 до 4 образовали первую группу – «контроль». Образцы семян с номерами 5 ÷ 8 образовали вторую группу семян «опыт». В первую группу были отобраны семена, которые генерировали разность БЭП между зародышем (основанием) и

вершиной менее 15 мВ (или менее 18,7 мВ/см). Во вторую группу были включены семена с градиентами БЭП более 15 мВ. Разброс БЭП первой группы семян составил от 8 до 15 мВ, второй группы – от 16 до 27 мВ (табл. 4.1.). Эксперименты проводили в лабораторных условиях при температуре (24°C) и относительной влажности воздуха – 62%. Измерения осуществлялись прибором. Были составлены для проращивания следующие пары образцов (по номерам) 1 и 5; 2 и 6; 3 и 7; 4 и 8. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1.

Показатели посевных качеств и БЭП семян

Вариант	№ образца	Уровень БЭП, мВ	Проросшие за каждые сутки семена							Энергия прорастания, %	Всхожесть, %
			1	2	3	4	5	6	7		
Контроль	1	12,2±2,2	–	24	53	9	6	2	–	77	94
	2	8,6±1,1	1	24	48	11	5	2	1	73	92
	3	12,4±1,4	–	22	51	18	4	1	–	73	96
	4	11,2±1,5	–	18	45	16	6	4	1	63	90
Опыт	5	19,2±2,4	–	33	60	4	–	–	–	93	97
	6	24,6±2,2	3	32	55	5	3	–	–	90	98
	7	25,2±1,8	2	34	59	3	1	–	–	95	99
	8	21,6±1,6	–	26	65	5	1	–	–	91	97

Таблица 4.2

Показатели посевных качеств и БЭП семян

Вариант	№ образца	Уровень БЭП семян, мВ	Скорость прорастания, сутки	Дружность прорастания, семян/сутки
Контроль	1	12,2+2,2	2,91	18,8
	9	8,6+1,1	3,05	13,14
	3	12,4±1,4	3,07	19,2
	4	11,2±1,5	3,29	15
Опыт	5	19,2±2,4	2,70	32,3
	6	24,6+2,2	2,72	19,6
	7	25,2±1,8	2,67	19,8
	8	21,6±1,6	2,80	24,25

Из приведенных данных видно, что скорость прорастания показывает среднюю продолжительность прорастания одного семени в сутки, или средневзвешенное число дней, приходящихся на прорастание одного семени, а дружность прорастания – среднее число семян, проросших за сутки. Посевные качества семян с более высокими уровнями БЭП (опыт) существенно превосходят аналогичные качества семян с более низкими значениями БЭП (контроль). Масса 1000 семян (ГОСТ 12042–80) варианта с более высоким уровнем БЭП (опыт) равна 44,8 г, а у первой группы (контроль) 35,2 г.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что

биоэлектрические параметры можно использовать для достоверной диагностики основных показателей посевных качеств семян всхожести, энергии прорастания, жизнеспособности (содержание в материале живых семян, ГОСТ 12039–82), дружности и скорости прорастания, а также массы 1000 семян.

4.4. Экспериментальные исследования с семенами тепличных культур после их облучения низкоэнергетическим электромагнитным излучением крайневысокочастотного диапазона

Целью экспериментов являлось уточнение технологических параметров ЭМП КВЧ диапазона для предпосевной обработки семян огурцов и томатов, полученных теоретическим путём.

Схема экспериментальной установки [209,210] для получения и анализа спектра действия НЭ ЭМИ крайне высокочастотного диапазона на семена овощных культур с помощью БЭП представлена на рис. 4.12

В качестве объекта исследования были использованы семена огурцов типа «ТСХА-575» и томатов типа «Rinato».

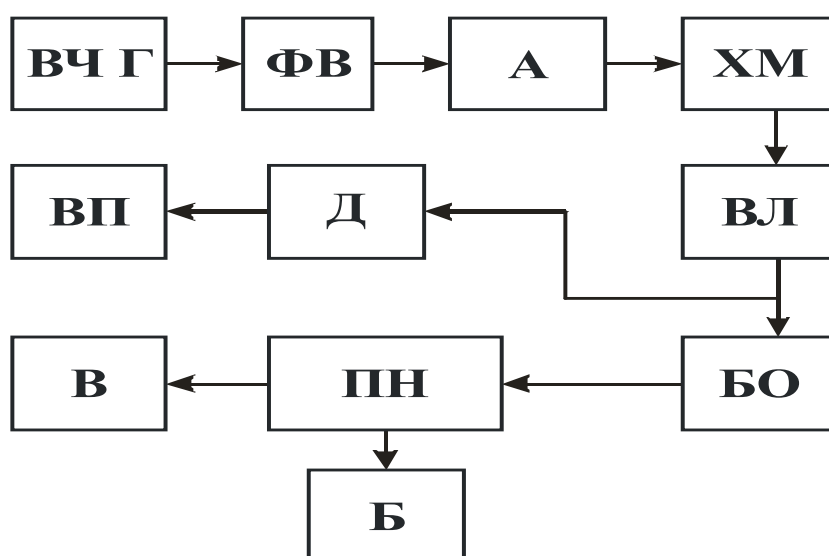


Рис. 4.12. Структурная схема экспериментальной установки контроля отклика семенного материала на низкоэнергетическое высокочастотное электромагнитное воздействие.

ВЧГ - высокочастотный генератор (магнетрон); ФВ - ферритовый вентиль; А – атеньюатор; ХМ - волномер; ВЛ - измерительная линия; Відв - направленный ответвитель; Д - термисторная головка; ВП - измеритель мощности; БО - биологический объект (семена); В - вольтметр; ПН - усилитель напряжения постоянного тока; Б - блок обработки измерений.

В установке был использован разработанный генератор в твердотельном исполнении с перестройкой частоты в диапазоне 36-39 ГГц. Для волноводного тракта использовался стандартный волновод прямоугольного сечения, заполненный диэлектриком для диапазона частот 25-70 ГГц. В качестве излучателя использовалась рупорная антенна пирамидального типа.

Диаграмма направленности (ДН) антенны показана на рис. 4.13

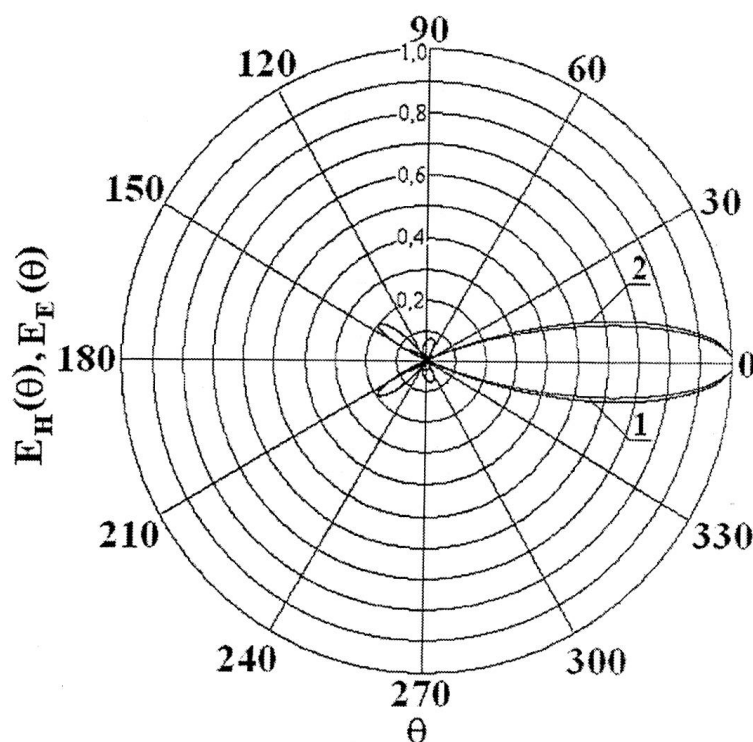


Рис. 4.13. ДН пирамидального рупора в Н– и Е– плоскостях

В установке осуществлялся контроль длины волны, мощности и КСВН в волноводном тракте. Измерение разности электрических потенциалов осуществлялось между зародышем и морфологически противоположной зародышу участку плодовой оболочки.

Для обеспечения надежного электрического контакта и исключения повреждений исследуемых семян при измерении биоэлектрического потенциала использовались измерительные электроды, которые позволяли осуществлять жидкостный контакт с семенами через 0,01%-ный раствор NaCl. Измерения выполнялись хлорсеребряными электродами. Семя с подключенными к нему измерительными электродами представляет собой высокоимпедансный источник сигнала с сопротивлением $10^4 - 10^7$ Ом, поэтому в качестве входного блока измерительной аппаратуры был использован усилитель напряжения постоянного тока В5-9, который в режиме усиления имеет входное сопротивление, равное 10^{14} Ом. Регистрация переходных характеристик происходила на цифровом вольтметре В7-16 и блоке обработки измерений.

Предварительно усиленный биоэлектрический сигнал, подавали на АЦП (плату персонального компьютера) для цифровой обработки и записи экспериментальных данных [211]. Частота сканирования 5 Гц. (схема блока обработки измерений представлена в приложении). Для гальванической развязки измерительной цепи многоканального электрометрического усилителя и АЦП, сопряженного с компьютером, на каждом канале использовали оптопару. При этом обеспечивалась передача выходных напряжений каналов усилителя без потерь на каналы АЦП. Погрешность регистрации изменения градиента биоэлектрических потенциалов не превышала 50 мкВ.

Отображение вводимой аналоговой информации имитирует монитор. Для максимального использования возможностей VGA карты, компьютер должен иметь такую же или более мощную видеокарту. При высоких скоростях отображения (более 50 Гц) желательно использование

видеокарты SVGA – VESA. Программа работает под MS DOS 5,0 и более высокие версии. Она может быть запущена как DOS приложение WINDOW. Объем записываемой за сеанс информации ограничен только размерами жесткого диска. Программа позволяет выполнять калибровки каналов, после которых результаты замеров приводятся к физическим единицам измерений. До выполнения процедуры калибровки, после установки программы, значения сигналов приводятся к входу платы: 0 – 10 В (или $-5 \dots +5$ В).

4.4.1. Обоснование параметров резонаторной камеры для обработки семян

Обработка семян (по разрабатываемой технологии) осуществляется в закрытых системах - резонаторных камерах. С целью обоснования параметров камеры макетного образца был сделан расчет основных характеристик резонатора: собственная (резонансная) частота, добротность и эквивалентная активная проводимость. При отклонении собственной частоты мощность колебаний, которые проходят через резонатор, снижается. Добротность резонатора Q - это величина обратная полосе пропускания, которая представляет собой полосу частот, в которых мощность колебаний снижается в два раза. При заданной геометрии резонатора и мощности возбуждения, амплитуда колебаний тем более высокая, чем выше его добротность. Эквивалентная активная проводимость характеризует суммарные потери энергии в резонаторе и в нагрузке. Эти три параметра являются основными, которые определяют высокочастотные характеристики резонатора.

Важным этапом в выборе резонаторов, является расчет основных параметров, определяющих пригодность конструкции для проведения опытов.

Основные типы волн, используемых в исследованиях в качестве

носителей низкоэнергетического воздействия, это электромагнитные волны ТЕ и ТМ - типов, различающиеся между собой по плоскости поляризации волны [163-165]. В проведенных исследованиях, в основном, применяли ЭМВ двух типов - ТЕ (1,01) и ТМ (01,1), однако при изменении плоскостей поляризации, в резонаторах могут возникать ЭМВ других типов, поэтому расчет резонатора проводим по следующим волнам: ТЕ (1,01); ТМ(01,1); ТЕ (1,10); ТМ (11,1); ТЕ (11,1). При выводе формул, описывающих действительные значения напряженностей электрического и магнитного полей, возьмем за основу известные формулы для вычисления E_{xvz} , H_{xvz} для прямоугольного волновода [164].

Рассмотрим случай для поперечно-магнитной ТМ-волны (E). Изначально зададимся условием, что стоячая ЭМВ может рассматриваться как результат наложения падающей волны, распространяющейся в направлении x и отраженной волны, распространяющейся в направлении $-x$. Также условимся считать, что в рассматриваемой структуре ЭМВ, по крайней мере одна составляющая (электрическая E или магнитная H) будет отсутствовать в направлении одного из ребер резонатора. Данное направление следует считать «продольным» - ось ox , плоскость yz - поперечная плоскость

Соответственно:

$$\dot{E}_x = E_m \sin(My) \sin(Nz) e^{(i\omega t - vx)}; \quad (4.3)$$

$$\dot{E}_y = -\frac{v}{K^2} \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} = -\frac{vM}{K^2} E_m \cos(My) \sin(Nz) e^{(i\omega t - vx)} \quad (4.4)$$

$$\dot{E}_z = -\frac{v}{K^2} \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} = -\frac{vN}{K^2} E_m \sin(My) \sin(Nz) e^{(i\omega t - vx)}, \quad (4.5)$$

где

$$L = \frac{l\pi}{d}, \quad (4.6)$$

$$M = \frac{m\pi}{a}, \quad (4.7)$$

$$N = \frac{n\pi}{b} \quad (4.8)$$

– производные характеристические числа;

l, n, m – характеристически целые числа, описывающие характер волны в волноводе, резонаторе (в направлениях X, Y, Z);

ν – коэффициент распространения ЭМВ вдоль волновода;

ω – угловая частота;

i – единичный вектор в декартовых координатах,

K – критический коэффициент фазы.

$H_x = 0$ - условие, тогда:

$$H_y = \frac{\nu N}{K^2 Z_C} \dot{E}_m \sin(My) \cos(Nz) e^{(i\omega t - \nu x)} \quad (4.9)$$

$$H_z = -\frac{\nu N}{K^2 Z_C} \dot{E}_m \cos(My) \sin(Nz) e^{(i\omega t - \nu x)} \quad (4.10)$$

Необходимо учитывать, что коэффициенты L, M, N определяются размерами резонатора и характеризуются целыми числами: l, m, n (4.6, 4.7, 4.8).

Двукратное дифференцирование по x сводится теперь к умножению дифференцируемой величины на L^2 поскольку:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot [\sin(Lx)] = -L^2 \sin(Lx); \partial = -L^2 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = -M^2; \frac{\partial^2}{\partial z^2} = -N^2 \quad (4.12)$$

Зададимся для простоты расчета условием, что в полости резонатора будет находиться идеальный диэлектрик ($y = 0$), тогда волновое уравнение выводится следующим образом:

Известное уравнение Максвелла [164]

$$[\nabla \bar{H}] = \gamma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (4.13)$$

$$[\nabla \bar{E}] = -\mu \frac{d \bar{H}}{dt} \quad (4.14)$$

записываем в символической форме:

$$[\nabla \bar{H}] = (\gamma \bar{E} + J\omega \varepsilon) \dot{\bar{E}} \quad (4.15)$$

$$[\nabla \bar{E}] = -i\omega \mu \dot{\bar{H}}, \quad (4.16)$$

где

$$\dot{\bar{H}} = \bar{H} e^{(i\omega t - \psi i)}$$

$$\dot{\bar{E}} = \bar{E} e^{(i\omega t - \psi i)}$$

Развертываем (4.15) и (4.16) в декартовой системе прямоугольных координат, полагая что в продольных направлении (по оси x) существует только электрическая составляющая волны, в поперечной плоскости YOZ в общем случае имеется и электрическая и магнитная составляющая поля:

$$\frac{\partial \dot{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial z} = (\gamma + i\omega E) \dot{E}_x \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \dot{H}_z}{\partial x} = (\gamma + i\omega E) \dot{E}_y \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \dot{H}_y}{\partial x} = (\gamma + i\omega E) \dot{E}_z \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} - \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial x} = -i\omega \mu \dot{H}_y \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \dot{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} = -i\omega \mu \dot{H}_z \quad (4.21)$$

Исключаем из этой системы уравнений все составляющие поля, кроме продольной E_x . Для этого дифференцируем уравнение (4.20) по z и (4.21) по y , вычитаем первый результат из второго и подставляем в (4.17):

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial \dot{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial z} \right) + (\alpha^2 - i\omega \gamma \mu) \dot{E}_x = 0, \quad (4.22)$$

где $\alpha = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$ – коэффициент фазы в свободном пространстве.

Положим, что в среде не имеется зарядов ($E = 0$), следовательно:

$$\frac{\partial \dot{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial z} = \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} \quad (4.23)$$

подставляя (4.23) в (4.22), получаем дифференциальное уравнение, содержащее только одну зависимую переменную $\dot{E}_x$,

$$\nabla^2_{y_z} \dot{E}_x + \frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial x^2} + (\alpha^2 - i\omega\gamma\mu)\dot{E}_x = 0, \quad (4.24)$$

$$\text{где} \quad \nabla^2_{y_z} E_x + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \quad (4.25)$$

— двухмерный скалярный лапласиан от E_x в поперечной плоскости YOZ.

Согласно условию $\gamma = 0$, тогда волновое уравнение (4.24) и уравнение:

$$(\alpha^2 - i\omega\gamma\mu)\dot{E}_y + \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} \right) \quad (4.26)$$

$$(\alpha^2 - i\omega\gamma\mu)\dot{E}_z + \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} \right). \quad (4.27)$$

Связывающие поперечные составляющие электрического поля E_y и E_z с продольной E_x получают теперь вид:

$$L^2 + M^2 + N^2 - \alpha^2 = 0 \quad (4.28)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{\alpha^2 - L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} \right) \quad (4.29)$$

$$\dot{E}_z = \frac{1}{\alpha^2 - L^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} \right) \quad (4.30)$$

Из (4.30) выводятся уравнения резонансной частоты резонатора:

$$f_{рез.} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{L^2 + M^2 + N^2} \quad (4.31)$$

$$f_{рез.} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c\alpha}{2\pi} \quad (4.32)$$

$$\lambda_{рез.} = \frac{2\pi}{\sqrt{L^2 + M^2 + N^2}} \quad (4.33)$$

Магнитные составляющие поля можно получить, посредством подстановки (4.32) и (4.33) в уравнения (4.18) и (4.19) и интегрирования по x , поскольку поле в резонаторе не имеет постоянных составляющих.

Условие прежнее:

$$\frac{\partial \dot{H}_y}{\partial x} = \frac{i\omega \varepsilon}{\alpha^2 - L^2} \frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial x \partial z} \quad (4.34)$$

$$\dot{H}_y = \frac{i\omega \varepsilon}{\alpha^2 - L^2} \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} \quad (4.35)$$

$$\dot{H}_z = \frac{i\omega \varepsilon}{\alpha^2 - L^2} \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} \quad (4.36)$$

Так называемые граничные условия определяют выбор выражений для составляющих поля.

У сверхпроводящих стенок резонатора (медная фольга) касательные составляющие напряженности электрического поля ($\vec{E}$) и нормальные составляющие напряженности магнитного поля ($\vec{H}$), равны 0.

Поэтому $H_y = 0$, при $y = 0$ и при $y = a$ в выражение для H_y должен входить множитель $\sin(My)$, удовлетворяющий такому условию. Из уравнения (33) видно, что этот же множитель сохранится в выражении для производной $\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z}$, и в выражении для продольной составляющей E_x .

Аналогично устанавливается необходимость введения в выражение для E_x множителя.

Из условий $E_y = E_z = 0$, при $x = 0$ и при $x = d$ и уравнений (4.29), (4.30), следует что на этих стенках должна обращаться в 0 $\frac{\partial E_x}{\partial z}$, для этого данной производной необходим множитель $\cos(Lx)$.

Гармоническое изменение во времени может быть выражено введением множителя $e^{i\omega t}$ в уравнение для всех составляющих поля. Таким образом, уравнение для продольной составляющей поля должно быть:

$$\dot{E}_x = E_m \cos(Lx) \sin(My) \sin(Nz) e^{i\omega t} \quad (4.37)$$

Уравнение для поперечных электрических и магнитных составляющих, получается путем дифференцирования (4.37) в соответствии с формулами (4.29), (4.30), (4.35), (4.36):

$$\dot{E}_y = -\frac{LM}{\alpha^2 - L^2} E_m \sin(Lx) \cos(My) \sin(Nz) e^{i\omega t} \quad (4.38)$$

$$\dot{E}_z = -\frac{LN}{\alpha^2 - N^2} E_m \sin(Lx) \sin(My) \cos(Nz) e^{i\omega t} \quad (4.39)$$

$$\dot{H}_y = -\frac{\omega \varepsilon N}{\alpha^2 - N^2} E_m \cos(Lx) \sin(My) \cos(Nz) e^{i\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)} \quad (4.40)$$

$$\dot{H}_z = -\frac{\omega \varepsilon M}{\alpha^2 - L^2} E_m \cos(Lx) \cos(My) \sin(Nz) e^{i\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (4.41)$$

Расчет рабочих параметров резонатора позволяет сделать вывод о том, что рассчитанная конструкция может использоваться не только в качестве резонатора (в плоскостях падения ЭМВ ZOY и ZOX), но и как экранирующий элемент.

Качество обработки посевного материала зависит не только от правильно рассчитанных параметров режима обработки (ППМ, $f_{рез.}$, E , тип генерации), но и зачастую от изменения положения объекта обработки относительно источника ЭМИ. Так, например, смещение основного пучка ЭМВ относительно оси резонатора, (вследствие неточной сборки), приводит к изменению амплитуды колебаний в резонаторе. Дифференциация расчетных и реальных параметров облучения приводит к появлению ошибки при обработке опытных данных, что в дальнейшем влечет за собой искажение общей картины резонансного воздействия.

Рассмотрим возможность появления искажений амплитуды колебаний при смещении пучка ЭМВ СВЧ/КВЧ - диапазонов вдоль оси резонатора. Исследования проводились на модели призматического резонатора

Габариты резонатора: сторона квадратного основания $-d$, высота $-a$.

Выбранная форма собственных колебаний имеет вид:

$$E_z = A \sin \frac{\pi x}{d} \sin \frac{\pi y}{d} e^{-i\omega t} \quad (4.42)$$

Магнитное поле выражается через вектор напряженности:

$$\vec{H} = \frac{i}{\mu d} \text{rot} \vec{E} \quad (4.43)$$

и составляющие:

$$H_x = \frac{iA}{\mu d} \cdot \frac{\pi x}{d} \cdot \cos \frac{\pi y}{d} \quad (4.44)$$

$$H_y = \frac{i}{\mu d} \cdot A \cdot \frac{\pi}{d} \cdot \cos \frac{\pi x}{d} \sin \frac{\pi y}{d} \quad (4.45)$$

Потери в стенках:

$$\oint H_0^2 dS = \frac{A^2 \pi^2}{\mu^2 \omega^2} \left(\frac{2da}{2d^2} + \frac{2da + dd}{2d^2} \right) = \frac{A^2 \pi}{\mu^2 d^2} \cdot \frac{d + 2a}{d} \quad (4.46)$$

$$P_{\hat{n}\hat{o}} = \frac{1}{2\delta_0 \sigma} \cdot \frac{A^2 \pi}{\mu^2 \omega} \cdot \left(\frac{d + 2a}{d} \right) \quad (4.47)$$

Вычисляем интеграл взаимодействия пучка и поля:

$$\{P\partial_a\}_t = -R_e \frac{1}{2} \int E_z J_z d_z \quad (4.48)$$

Компонента Фурье плотности тока определяется формулой:

$$J_z = \gamma_{ke} \exp(i\omega z + iy) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} \{B_{\text{жс}}\}_t &= -\frac{1}{2} R_e e^{i\psi} \int_0^a e^{\frac{i\omega ke z}{V_0}} dz \iint A \sin \frac{\pi x_0}{d} \sin \frac{\pi y}{d} \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) dx dy = \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\gamma_{ke} A}{\omega ke} R_e \left(e^{i\psi ke a} - 1 \right) e^{i\psi} \sin \frac{\pi x_0}{d} \sin \frac{\pi y_0}{d} = -\frac{1}{2} \gamma_{ke} A \sin \frac{\pi x_0}{d} \sin \frac{\pi y_0}{d} \times \\ &\times \left[\sin \left(\frac{\omega ke a}{V_0} + \psi \right) - \sin \psi \right] = \\ &= -\frac{\gamma_{ke} A V_0 \sin \frac{\pi x_0}{d} \sin \frac{\pi y_0}{d}}{\omega ke} \sin \frac{\omega ke a}{V_0} \cos \left(\frac{\omega ke a}{2V_0} + \psi \right) \end{aligned} \quad (4.50)$$

Предположим, что пучок ЭМВ пролетает через точку с координатами $(\delta, 0)$, начальная фаза взлета $\psi=0$, тогда интеграл взаимодействия будет равен:

$$\{P\partial_{\text{жс}}\}_t = -\frac{\gamma_{ke}}{2} \sin \frac{\pi}{d} \delta \frac{V_0}{\omega ke} \sin \frac{\omega ke a}{V_0} \quad (4.51)$$

Уравнение баланса энергии:

$$P = P_{\text{см.}} + \{P\partial_{\text{жс}}\}_t \quad (4.52)$$

Подставляем найденные величины и приходим к следующему выражению:

$$P = \frac{1}{2\delta_0 \sigma} \cdot \frac{A^2 \pi^2}{\mu^2 \omega^2} \left(\frac{d + 2a}{d} \right) - \frac{1}{2} \gamma_{ke} \sin \frac{\pi}{a} \delta_0 \frac{V_0}{\omega ke} \sin \frac{\omega ke a}{V_0} \quad (4.53)$$

Угол пролета выбираем из условия, чтобы интеграл взаимодействия имел оптимальное значение.

Выражение (4.53) устанавливает связь между координатами пучка и величиной амплитуды.

Установлено, что смещение пучка ЭМВ на одну сотую долю сантиметра ($0,1 \lambda_{\text{рез.}}$) приводит к изменению амплитуды на 1,77%, а на одну десятую - 17,7%, соответственно. Увеличение площади основания призматического резонатора в 2 раза снижает показатель изменения амплитуды до величины 0,8% (на сотую долю сантиметра.), а в 10 раз - до 0,07%. Из всего этого можно сделать вывод - продольное увеличение объема резонатора, имеющего призматическую форму приводит к улучшению электрических параметров электромагнитного излучения и уменьшению искажения его передачи.

4.4.2. Экспериментальные исследования по определению оптимальных технологических параметров предпосевной обработки семян огурцов и томатов

При проведении измерений семена размещались в безэховой камере для высокочастотного облучения и находились в дальней зоне излучающего рупора. Для исключения действия облучения на измерительные электроды последние были вынесены из зоны облучения и снабжены металлическим экраном, который был покрыт пластом графита.

Непосредственная обработка РБО проводилась в резонаторных камерах, рассчитанных на исследуемые частотные диапазоны. Конструктивно резонатор был собран из двусторонне фольгированного стеклотекстолита, несущая конструкция - из алюминиевого уголкового профиля, листы стеклотекстолита имели хорошую электрическую связь, во избежание образования дополнительных зон избыточных плотностей

токов [199-200]. Общий вид лабораторной установка показана на рисунке 4.14.

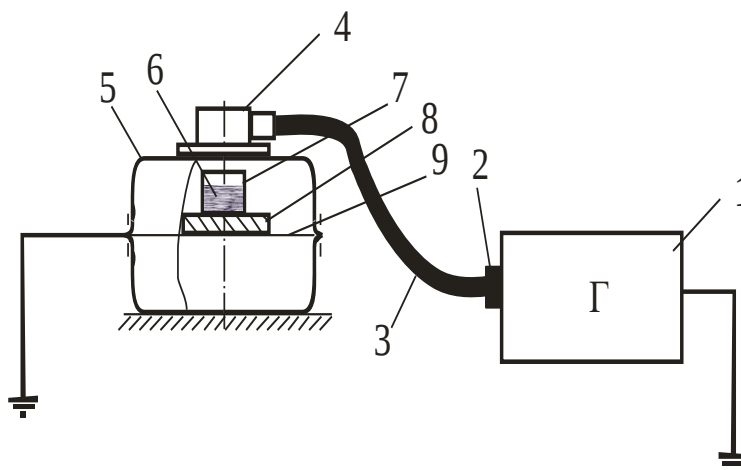


Рис. 4.14. Лабораторная установка для обработки семян.

- 1 - генератор ВЧ,
- 2 - ВЧ-выход,
- 3 - волновод (коаксиальный экранированный кабель),
- 4 - излучатель,
- 5 - резонаторная камера,
- 6 - обрабатываемый материал,
- 7 - кювета,
- 8 - подставка,
- 9 - диэлектрическая подложка.

При проведении опытных работ была предусмотрена возможность преднамеренного изменения плоскостей поляризации ЭМП за счет создания дополнительных окон в конструкции резонатора. Семенной материал обрабатывался в кюветах из материала, прозрачного для ЭМИ (фторопласт) [212]. Состояние семян: сухой (кондиционный) вид - влажность 14-16%, увлажненное состояние - 40%. Во избежание многократных отражений падающего ЭМВ от дна резонатора вызывающих погрешности в биологическом опыте, под кювету помещали подложку из вещества, поглощающего радиоволны - полиуретан с вкраплениями мелкодисперсных фракций ферромагнетика [213].

Температуру семян в кювете во время процесса обработки фиксировали с помощью электронного прибора, имеющего в качестве датчика температуры – термопару. Периодические контрольные замеры температуры обрабатываемого РБО проводились при выключенной установке ртутным термометром ТР (ГОСТ 2823-73), имеющим погрешность измерений $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Используемые в экспериментах семена и растения двух видов огурца (сорт ТСХА - 575) и томатов (гибрид Ринато) были отобраны согласно основным методикам и ГОСТам.

Семена, увлажненные до состояния 40% влажности, обрабатывались в кювете, помещенной в резонатор (см. рис. 4.14). Температура семян во время и после обработки не превышала 22 - 24 $^{\circ}\text{C}$. Для поддержания точности результатов экспериментов контроль температуры проводился, в режиме НГ - через каждые 5 минут.

Показательные графики записи и обработки информации, полученной при измерении БЭП семян представлено на рис. 4.15...4.20.

Получение достаточно большого количества сигналов на протяжении одной минуты обеспечивает возможность оценивания состояния семян при развитии их, как в естественных условиях, так и в условиях угнетения.

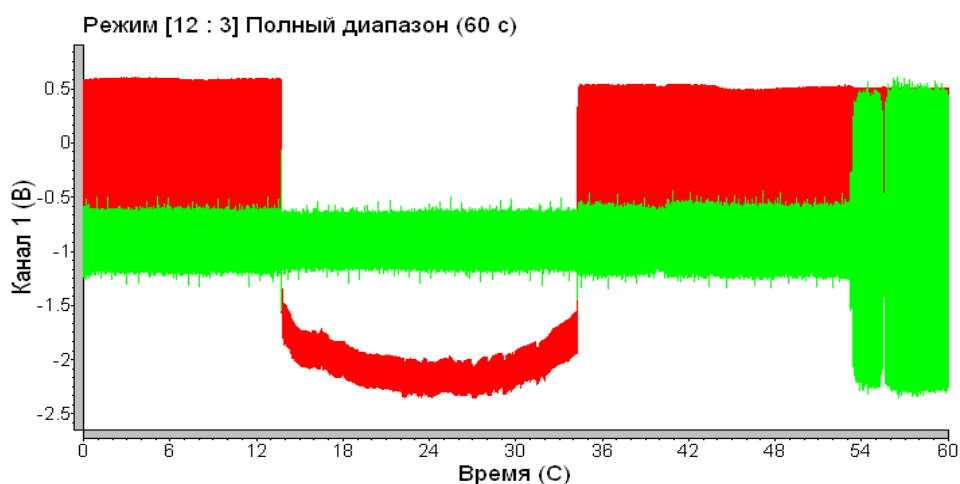


Рис. 4.15. Диапазон формы кривой БЭП растения и тестового сигнала.

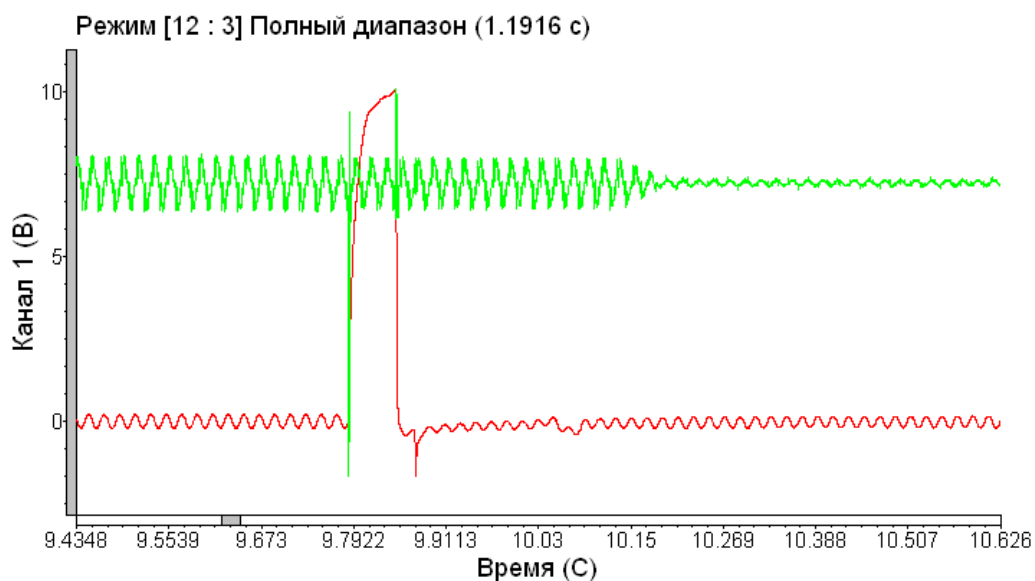


Рис. 4.16. Расширенный диапазон формы кривой БЭП семян и тестового сигнала.

На рис. 4.17. изображена реакция растения (зеленый цвет) и форма тестового сигнала (красный) цвет. В черно-белом изображении тестовый сигнал находится на внешней стороне.

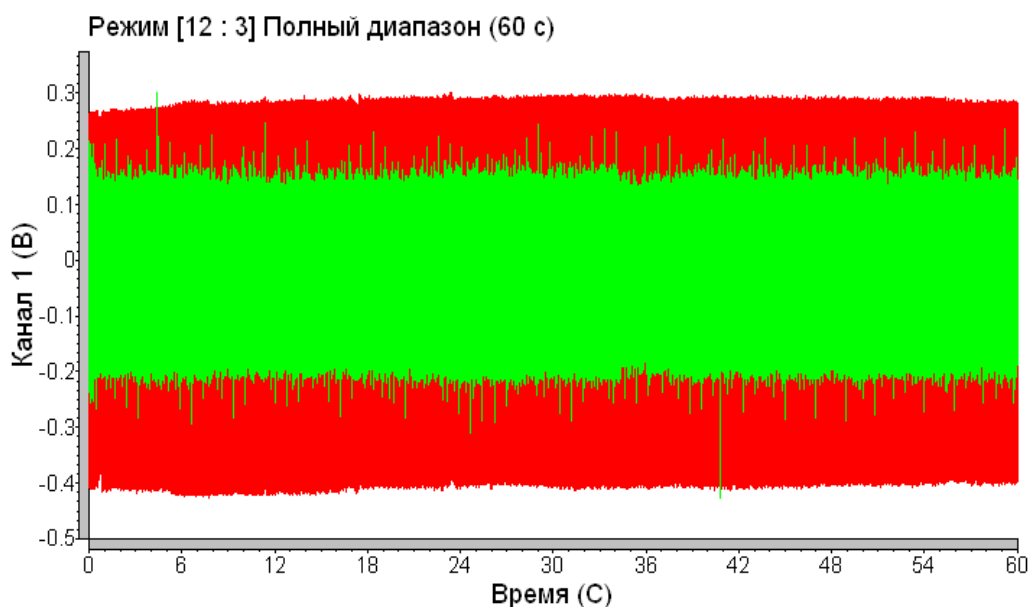


Рис. 4.17. Формы кривой БЭП семян и тестового сигнала под воздействием низкоэнергетического ЭМП

Программное обеспечение позволяет более детально проанализировать процессы, которые происходят в семеннике на протяжении одной минуты. В этом случае используется функция расширенного диапазона.

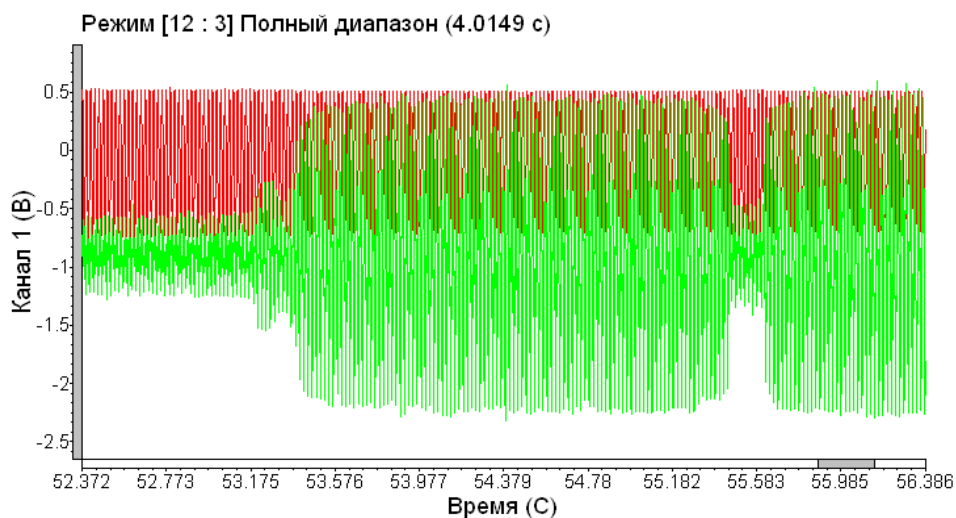


Рис. 4.18. Расширенный диапазон формы кривой БЭП растения и тестового сигнала под влиянием ЭМП

После снятия влияния “МП, на протяжении одной минуты, у семян наблюдается переходной процесс. Через 45 с. происходит отклик растения на действие ЭМП рис. 4.19.

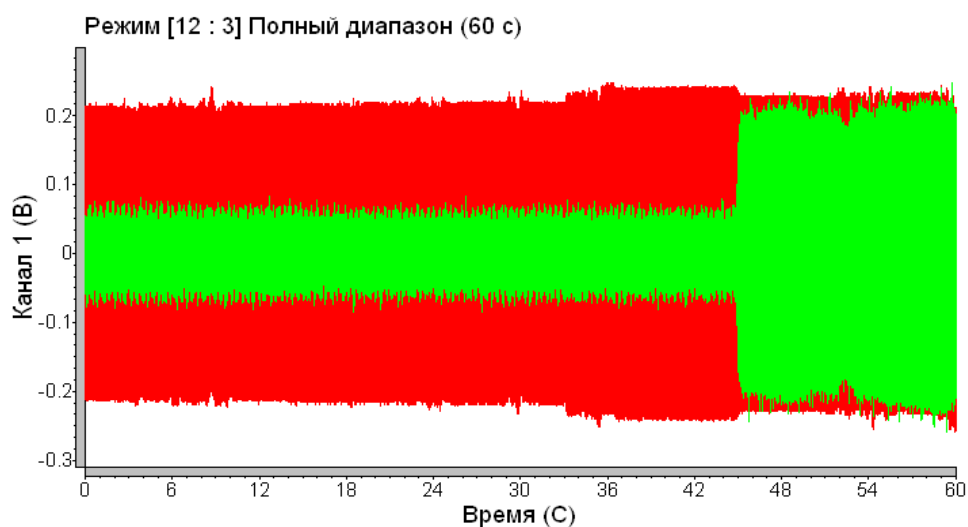


Рис. 4.19. Смена БЭП растения на протяжении 1 минуты после снятия воздействия ЭМП.

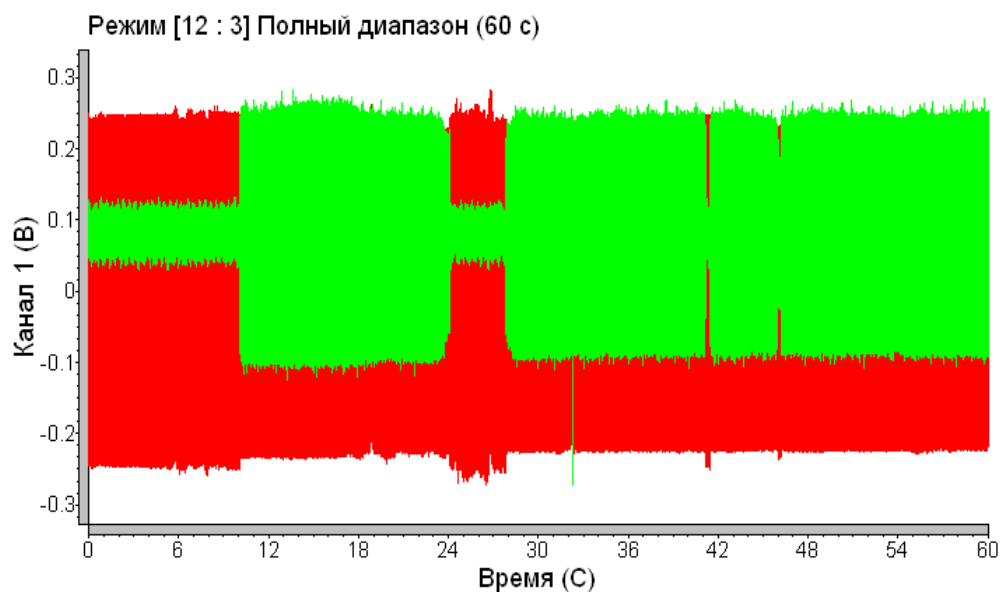


Рис. 4.20. Смена БЭП растения в переходный период

На следующем рис. 4.21. наблюдается увеличение биоэлектрического потенциала растения приблизительно к 6...7 В, что указывает на активацию жизнедеятельности растительного организма.

На протяжении минуты семена реагируют на тестовый сигнал и стараются адекватно ответить, выдать информацию о возможности обновления своих функций. Наблюдается вариация БЭП во времени.

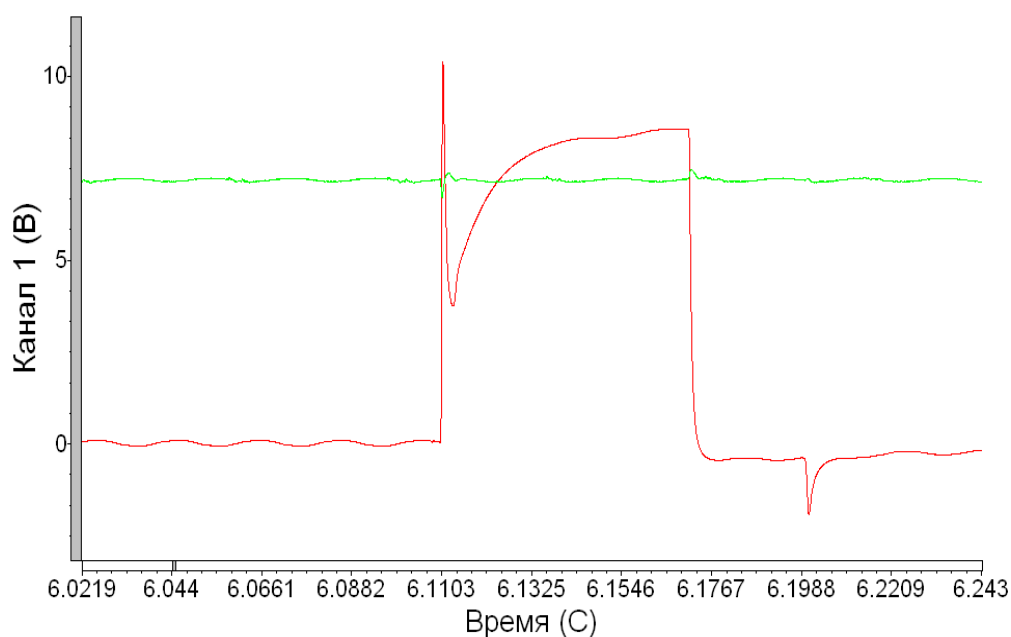


Рис. 4.21. БЭП растения через 10 минут после снятия активизирующего действия ЭМП.

Для уточнения технологических параметров обработки был использован метод полного факторного эксперимента, постановка которого сводится к выбору параметра оптимизации [214]; определению списка факторов, воздействующих на растительный организм; выбору математической модели; составлению матрицы планирования эксперимента; расчету и оценке значимости коэффициентов регрессии, аналитическому описанию функции отклика в виде уравнения регрессии; проверке адекватности модели.

В качестве объекта исследований были использованы семена огурцов и томатов. Посевные качества полученной партии семян следующие: всхожесть (ГОСТ 12038–84) [60] –96%, чистота (ГОСТ 12037–81) – 98,1%, влажность (ГОСТ 12041–82) – 12,0%; масса 1000 семян (ГОСТ 12042–80) – 42,6 г. По чистоте и всхожести данный семенной материал относится к 1 классу. Исследования проводили в климатермосветокамере Биотрон - 3 (Рис. 4.22.). Условия стационарности и эргодичности случайного процесса обеспечивались высокими техническими характеристиками климатермосветокамеры, его надежной работой и позволяли проводить обработку результатов экспериментов по одной реализации.

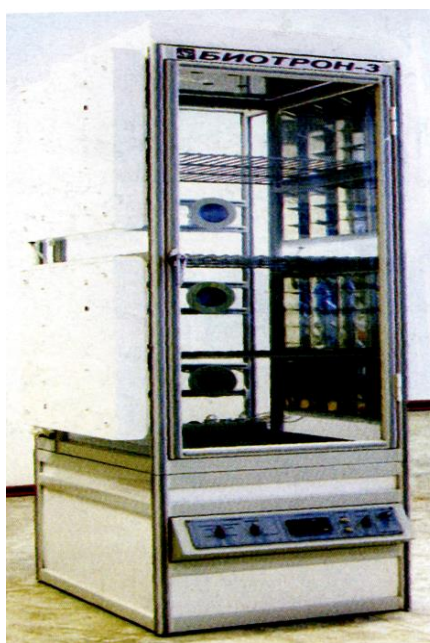


Рис. 4.22. Общий вид климатермосветокамеры Биотрон – 3.

В качестве выходного параметра – функции отклика была принята разность БЭП $U_{БЭП}$ между морфологически полярными локальными областями семенника - зародышем и пространственно–противоположной локальной областью плодовой оболочки. В качестве входных контролируемых факторов использовали частоту ЭМП, плотность потока мощности и экспозицию. Значения факторов и их интервалы варьирования приведены в таблице 4.3. для семян огурца «ТСХА575» и для семян томата «Rinato».

Таблица 4.3.

Значения факторов и их интервалы для семян огурца «ТСХА575» и для семян томата «Rinato».

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота, ГГц	Плотность потока мощности мкВт/см ²	Экспозиция, мин
	x_1	x_2	x_3
Нулевой уровень - $x_i = 0$	38	10	10
Интервал варьирования - λ_i	1	5	5
Верхний уровень - $x_i = +1$	39	15	15
Нижний уровень - $x_i = -1$	37	5	5

Полином, используемый для описания процесса в данном плане имеет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_2^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (4.54)$$

где Y – выходной параметр;

x_i – факторы, определяющие протекания процесса (входные параметры);

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – эмпирически определяемые коэффициенты уравнения регрессии.

При использовании стандартной методики построение планов второго порядка составлены матрицы планирования эксперимента, расчёта коэффициентов регрессии, определения адекватности и результаты обработки данных (Приложения)

После проведения измерений и расчётов получено уравнение регрессии для семян огурцов и томатов:

$$Y_{ог} = 19,5 + 2,8x_1 + 1,05x_2 + 2,1x_3 + 1,5x_1x_2 + 2,5x_1x_3 + 1,3x_2x_3 + 2,0x_1^2 + 0,4x_2^2 + 1,8x_3^2; \quad (4.55)$$

$$Y_{том} = 16,8 + 2,62x_1 + 1,0x_2 + 2,3x_3 + 1,5x_1x_2 + 3x_1x_3 + 1,4x_2x_3 + 2,5x_1^2 + 0,5x_2^2 + 2x_3^2, \quad (4.56)$$

где $Y_{ог}$ – отклик семян огурцов,

$Y_{том}$ – отклик семян томата.

Проверка значимости коэффициентов регрессии проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,01$ по критерию Стьюдента [214]. Все коэффициенты в уравнениях (4.55) и (4.56) оказались значимыми. На основании проверки данных уравнений (4.55) и (4.56) на адекватность по критерию Фишера [214] сделан вывод, что уравнения описывают реальный процесс и, следовательно, позволяют оценить характер влияния каждого

фактора на функцию отклика. Для нахождения оптимальных точек процесса решена система уравнений, полученных приравнением нулю значений компонентов градиента, вычисленных по выражению

$$\frac{dy}{dx_i} = b_i + 2b_{ii} + \sum_{j=1}^n b_{ij}x_j = 0, \quad (4.57)$$

где x_i, x_j - кодированное значение фактора, по которому берётся производная и взаимодействующие соответственно с ним;
 b_i, b_{ii}, b_{ij} - коэффициенты уравнения регрессии.

После дифференцирования были получены уравнения для семян огурцов и томатов:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y_{ог}}{\partial X_1} &= 2,8 + 2,0X_1 + 1,5X_2 + 2,5X_3 = 0 \\ \frac{\partial Y_{ог}}{\partial X_2} &= 1,05 + 1,5X_1 + 2 \cdot 0,4X_2 + 1,3X_3 = 0 \\ \frac{\partial Y_{ог}}{\partial X_3} &= 2,1 + 2,5X_1 + 1,3X_2 + 2 \cdot 1,8 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y_{том}}{\partial X_1} &= 16,8 + 2,5X_1 + 1,5X_2 + 3X_3 = 0 \\ \frac{\partial Y_{том}}{\partial X_2} &= 16,8 + 1,5X_1 + 2 \cdot 0,5X_2 + 1,4X_3 = 0 \\ \frac{\partial Y_{том}}{\partial X_3} &= 16,8 + 3X_1 + 1,4X_2 + 2 \cdot 2X_3 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

После решения системы уравнений (4.58, 4.59) были получены координаты экстремальной точки для семян огурцов и томатов:

$$\begin{array}{lll} x_{1\text{ ог}} = -0,75 & x_{2\text{ ог}} = 0,36 & x_{3\text{ ог}} = -0,33 \\ x_{1\text{ том}} = -0,295 & x_{2\text{ том}} = -0,53 & x_{3\text{ том}} = -0,29 \end{array}$$

Учитывая интервал варьирования и нулевой уровень, изначально заложенный при кодировании факторов эксперимента, получаем для семян огурцов и томатов:

$$x_{1\text{ог}} = 37,25 \text{ ГГц}; x_{2\text{ог}} = 11,8 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}; x_{3\text{ог.}} = 8,35 \text{ мин};$$

$$x_{1\text{том}} = 37,705 \text{ ГГц}; x_{2\text{том}} = 7,35 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}; x_{3\text{том.}} = 8,55 \text{ мин}$$

4.5. Изучение влияния электромагнитных полей крайне высокочастотного диапазона на развитие тепличных культур.

Применение электромагнитного излучения для предпосевной обработки семян является методом индуцированного мутагенеза. При оптимальном сочетании технологических параметров ЭМП его действие на семена растений может до неузнаваемости изменить растение, сделать его скороспелым, заставить в определённое время сбрасывать листья и цветки, изменить окраску цветков и плодов, скорректировать качество и количество белка, его аминокислотный состав.

Индуцированный электромагнитным излучением мутагенез позволяет в довольно короткий срок создавать разнообразный селекционный материал и открывает большие возможности целенаправленного воздействия на метаболизм семян и растений. Для уточнения режимов предпосевной обработки семян электромагнитным излучением необходимы методы оценки степени влияния ЭМП на процессы метаболизма клетки и целого организма [215-217].

4.5.1. Влияние электромагнитного излучения крайневысокой частоты на хромосомные aberrации семян огурцов и томатов.

Изучение частоты и характера хромосомных aberrаций является

важнейшим типом изменчивости, ибо нарушение хромосомного аппарата клеток – одна из самых частых и существенных внутриклеточных реакций на воздействие физических факторов электромагнитной природы. Методика исследований хромосомных aberrаций семян огурцов и томатов была предложена сотрудниками кафедры «Генетика» и селекция Харьковского национального аграрного университета им. В.В. Докучаева.

Обработка семян огурцов (ТСХА-575) проводилась ЭМП крайневых частот с параметрами:

- диапазон частот 36-39 ГГц;
- плотность потока мощности $5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $11,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;
- экспозиция 5 мин, 8,5 мин, 12 мин.

Семена томата «Rinato» обрабатывались ЭМП с параметрами:

- диапазон частот 36-39 ГГц;
- плотность потока мощности $5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $7,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;
- экспозиция 5 мин, 8,5 мин, 12 мин.

Затем обработанные ЭМП семена огурцов и томатов проращивались в термостате на влажной фильтровой бумаге при температуре 28°C в течение двух суток. После проращивания кончики корешков фиксировали в уксусном растворе в течение 24 часов и на сутки помещали в спирт крепостью 70°C. Окрашивание кончиков корешков проводили по пропинлакмоидному методу С.Г. Каптаря. После окрашивания приготавливали препараты для корневой меристемы проростков. Полученные препараты исследовали на микроскопе МБИ-15У4.2.

Изучение хромосомных перестроек изучали на стадии анафазы или ранней стадии телофазы. Под микроскопом просматривалось от 500 до 800 клеток в каждом варианте опыта.

На рис. 4.23 представлены результаты хромосомных перестроек

под действием низкоэнергетического ЭМП крайне высокой частоты у семян огурца и томата.

Для семян огурца «ТСХА-575» на рис. 4.23 приведены результаты хромосомных aberrаций, вызванных воздействием на семена ЭМП на частотах 36,25 ГГц, 37,25 ГГц, 38,25 ГГц с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ и экспозицией 8,5 мин.

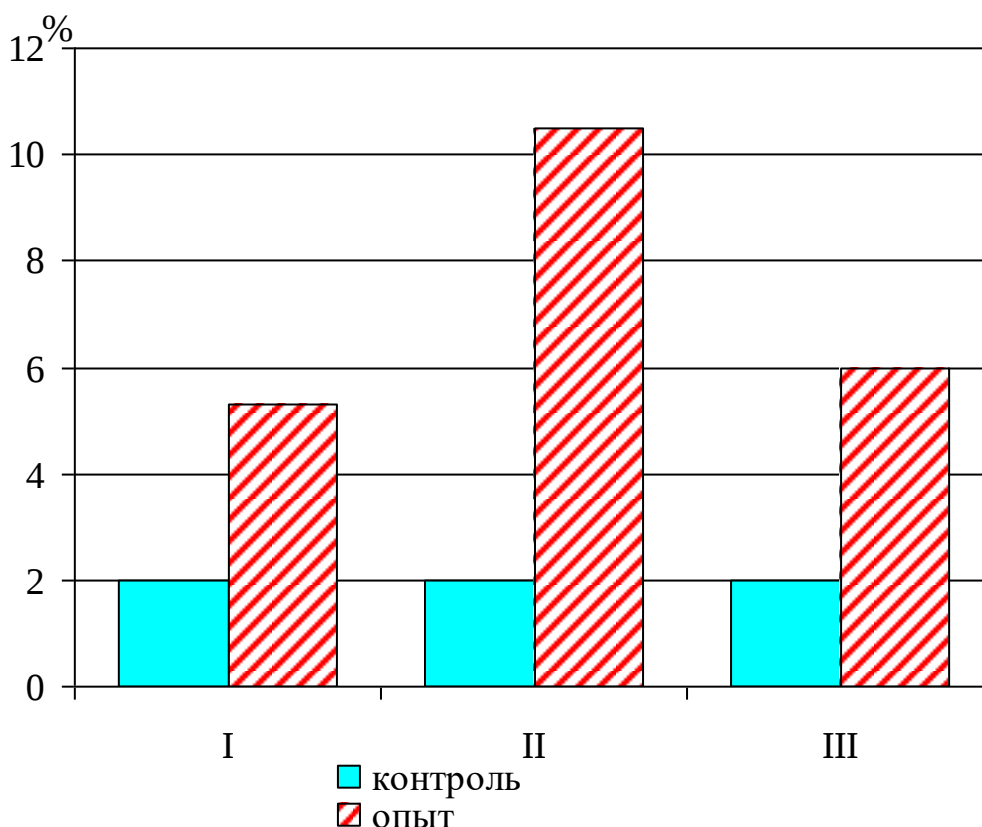


Рис. 4.23. Процент хромосомных перестроек семян огурцов ЭМП с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ и экспозицией 8,5 мин.

- I – частота ЭМП 36,25 ГГц;
- II – частота ЭМП 37,25 ГГц;
- III – частота ЭМП 38,25 ГГц.

Как следует из проведённого эксперимента (рис. 4.23)

хромосомные aberrации семян огурца были максимальными на частоте 37,25 ГГц и составили $10,6 \pm 0,01\%$. На частотах 36,25 ГГц и 38,25 ГГц процент хромосомных aberrаций значительно уменьшился по сравнению с частотой 37,25 ГГц и составил 5,3% и 6% соответственно. Изменение хромосомных перестроек в семенах томата «Rinato» в зависимости от частоты приведено на рис. 4.24.

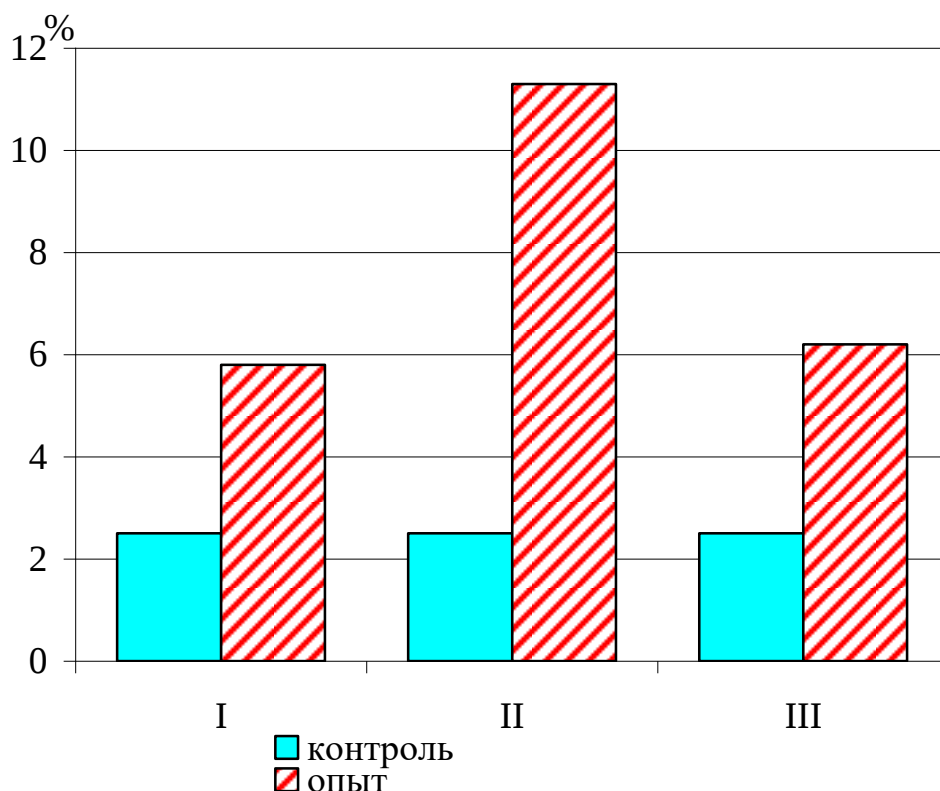


Рис. 4.24. Процент хромосомных перестроек семян томатов ЭМП с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ и экспозицией 8,5 мин.

I – частота ЭМП 36,705 ГГц;

II – частота ЭМП 37,705 ГГц;

III – частота ЭМП 38,705 ГГц;

Обработку семян томата «Rinato» ЭМП проводили на частотах 36,705 ГГц, 37,705 ГГц и 38,705 ГГц с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ и экспозицией 8,5 мин. Результаты опыта показали, что хромосомные aberrации семян на частоте 36,705 ГГц составили 5,8%, на

частоте 38,705 ГГц – 6,2%, а на частоте 37,705 ГГц – $11,3 \pm 0,01\%$. В контрольных семенах хромосомные aberrации не превысили величины $2,6 \pm 0,01\%$.

Результаты эксперимента с изменением экспозиции обучения ЭМП семян огурца приведены на рис. 4.25.

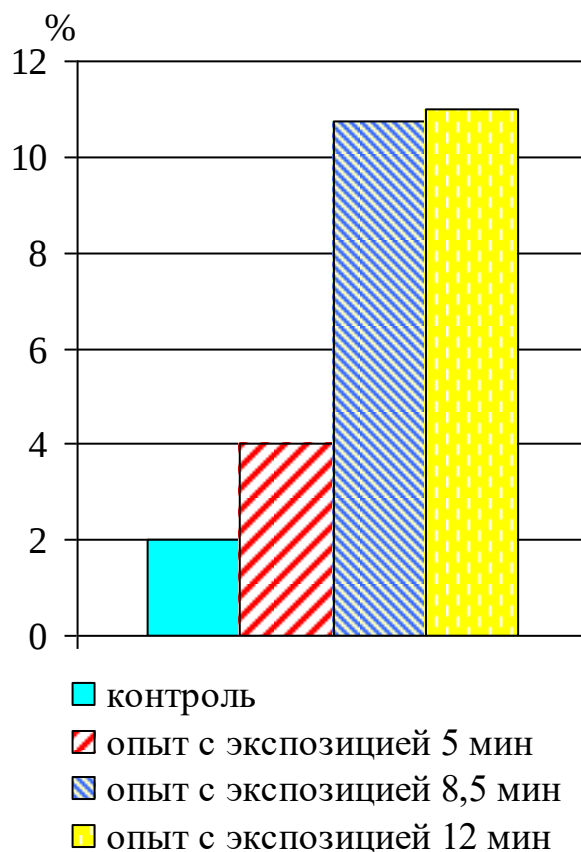


Рис. 4.25. Процент хромосомных перестроек семян огурцов ЭМП на частоте 37,25 ГГц с плотностью потока мощности $11,8 \frac{i \hat{e} B \partial}{\tilde{m}^2}$

Эксперимент показал (рис. 4.25), что увеличение экспозиции с 8,5 мин. до 12 мин. не приводит к существенному изменению хромосомных aberrаций и в среднем составляет 11%. Однако, уменьшение экспозиции до 5 мин. приводит к уменьшению хромосомных aberrаций на 6-7%.

Изменение хромосомных перестроек в зависимости от плотности потока мощности ЭМП, действующего на семена огурца, показано на рис.4.26.

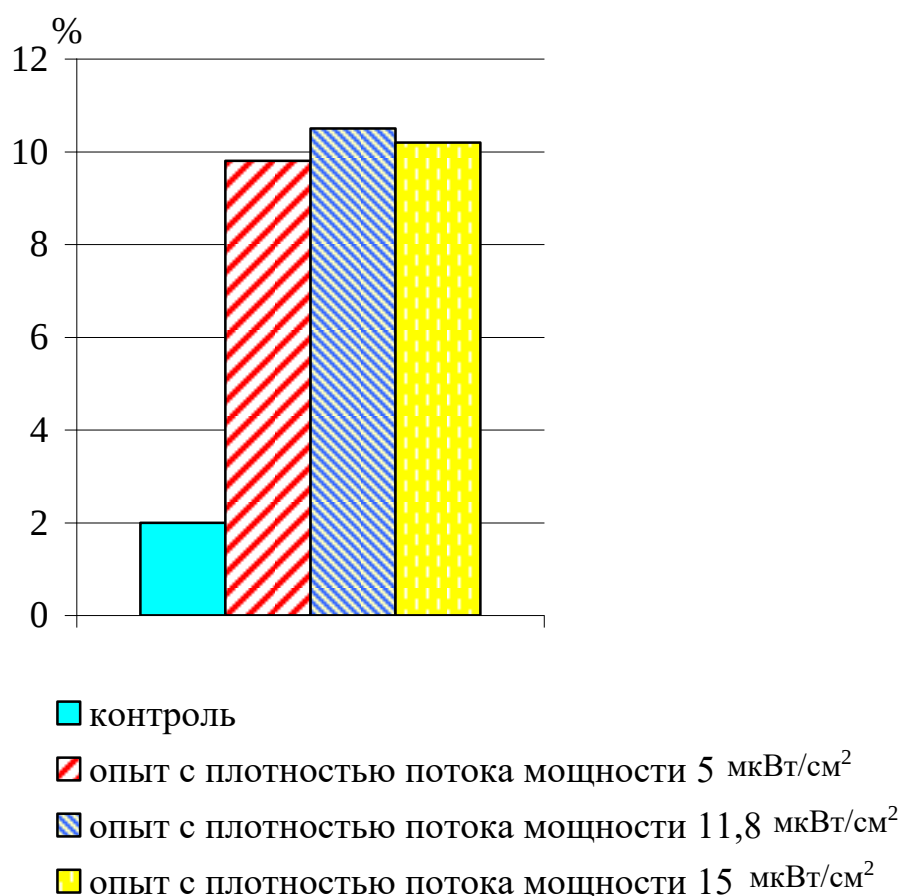


Рис. 4.26. Процент хромосомных перестроек семян огурцов ЭМП на частоте 37,25 ГГц с экспозицией 8,5 мин.

Обработку семян огурца «ТСХА-578» проводили ЭМП на частоте 37,25 ГГц с изменением плотности потока мощности от $5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ до $15 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ и экспозицией 8,5 мин. В ходе опыта было установлено, что различие в хромосомных aberrациях семян огурца составляет не более 0,7% при изменениях плотности потока мощности от $5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ до $15 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$. Между опытом и контролем разница в хромосомных aberrациях семян огурца составила почти 8,5%.

На рис. 4.27. приведены зависимости хромосомных aberrаций в

семенах томата от изменения экспозиции облучения семян ЭМП.

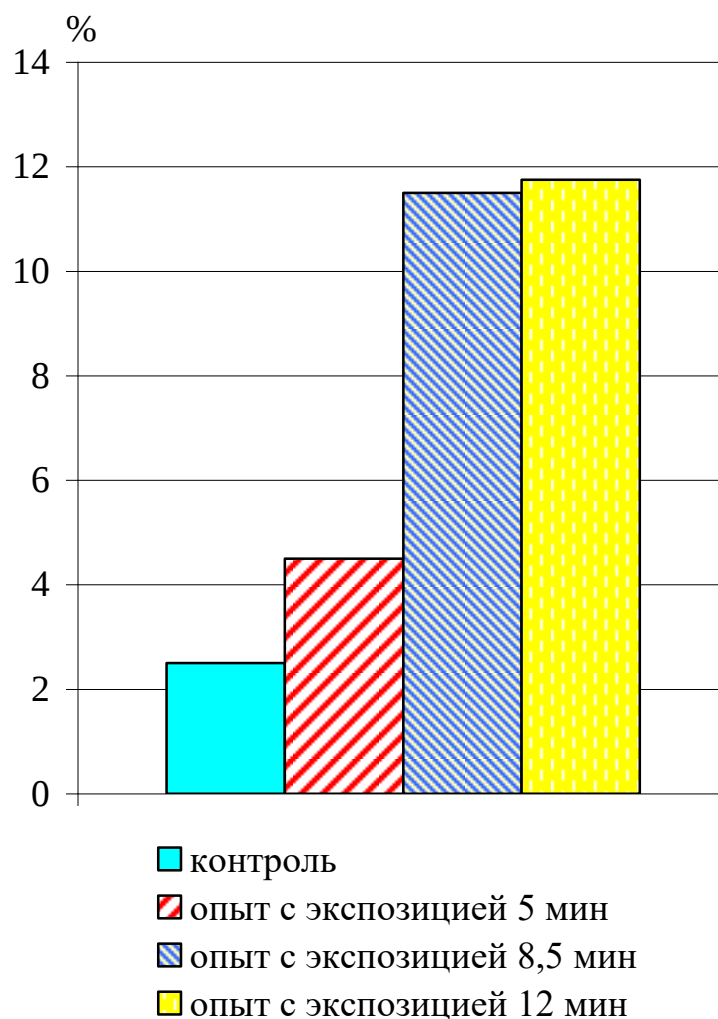


Рис. 4.27. Процент хромосомных перестроек семян томатов ЭМП на частоте 37,705 ГГц с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

В опыте с семенами томата «Rinato» было установлено, что изменение экспозиции облучения ЭМП семян с 8,5 мин до 12 мин. и более не приводит к существенным изменениям хромосомных перестроек и в среднем составляет 11,3%. При уменьшении экспозиции до 5 мин происходит уменьшение хромосомных aberrаций до 4,5%. В контроле хромосомные aberrации в семенах томата «Rinato» не превышали величины 2,6%. Изменение хромосомных перестроек в семенах томата

«Rinato» в зависимости от изменения плотности потока мощности ЭМП приведено на рис. 4.28.

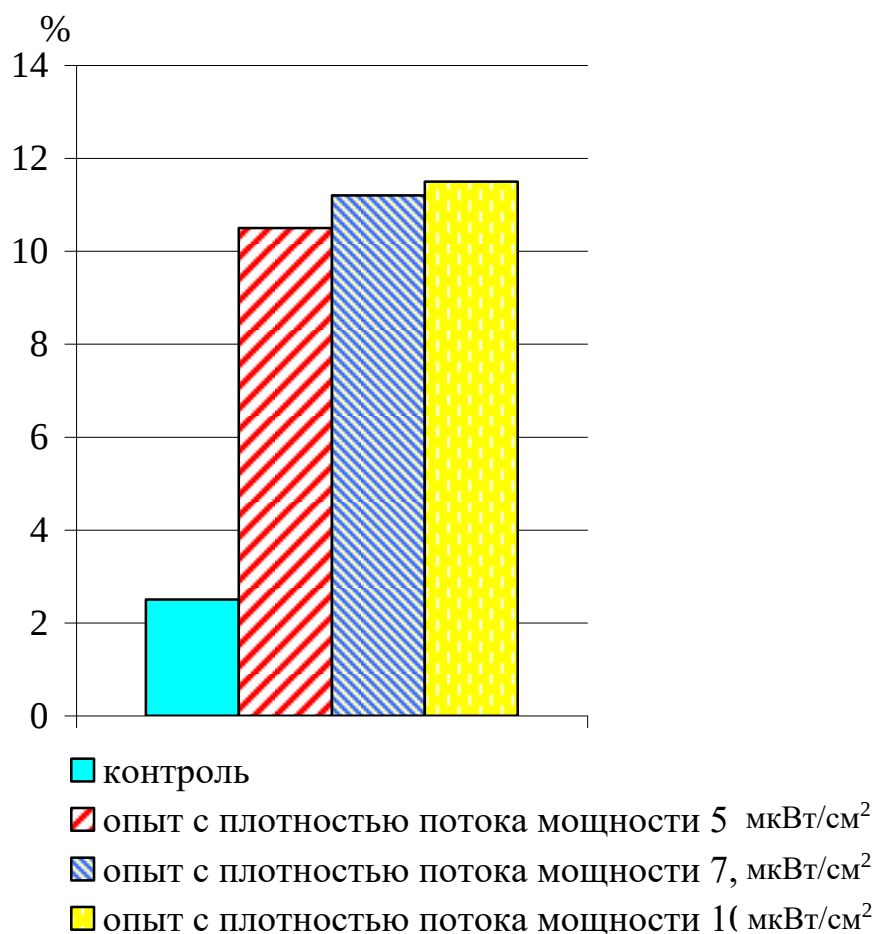


Рис. 4.28. Процент хромосомных перестроек семян томатов ЭМП на частоте 37,705 ГГц с экспозицией 8,5 мин.

Облучение семян томата проводили ЭМП на частоте 37,705 ГГц с изменением плотности потока мощности от $5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ до $10 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ и экспозицией 8,5 мин. При изменении плотности потока мощности ЭМП в указанных пределах хромосомные aberrации семян томата изменялись на величину менее 1%. Разница в хромосомных aberrациях между отытом и контролем семян томата составила 8,8%.

4.5.2. Полевая всхожесть семян огурцов и томатов

Обработка семян тепличных культур электромагнитным излучением вызывает индуцированный мутагенез растений, который связан с изменением биохимических процессов в них. На изменения, происходящих в семенах тепличных культур, после облучения их ЭМП особенно реагирует полевая всхожесть.

Для предпосевной обработки семян огурца «ТСХА-575» и томата «Rinato» было использовано электромагнитное излучение, технологические параметры которого приведены в табл. 4.4

Таблица 4.4

Параметры ЭМП для облучения семян

Наименование культуры	Частота облучения семян ГГц	Плотность потока мощности ЭМП, мкВт/см ²	Экспозиция облучения семян, МИН
Семена огурца «ТСХА-575»	36,25; 37,25; 38,25.	5; 11,8; 15	5,0; 8,5; 12,0
Семена томата «Rinato»	36,705; 37,705; 38,705.	5; 7,5; 10	5,0; 8,5; 12,0.

В ходе эксперимента было изучено 55 вариантов. В каждом варианте было обработано электромагнитным излучением по 100 семян огурца и томата. Эксперимент проводился на учебно-опытном полигоне Харьковского национального аграрного университета им. В.В. Докучаева.

Посев проводили через два дня после облучения ЭМП семян огурца и томата. В опыте использовались трёхрядковые деланки, десяти гнездовые, с посевом по 3 семенника в гнездо.

Контролем служили необработанные семена огурца и томата. Результаты учётов полевой всхожести семян обрабатывались статистически по Доспехову [32]. На рис. 4.29 приводятся результаты действия ЭМП на всхожесть огурца «ТСХА-575» после их облучения.

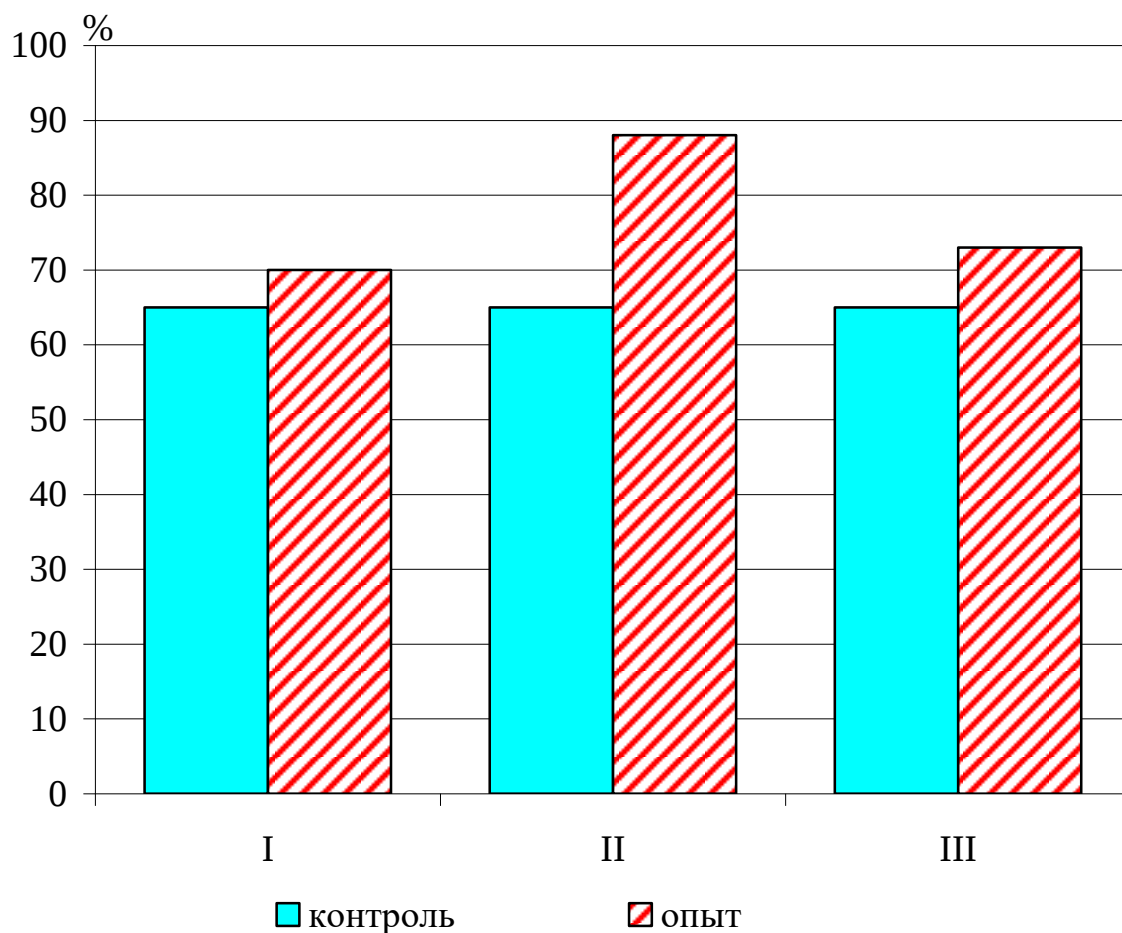


Рис. 4.29. Всхожесть семян огурца, обработанных ЭМП с плотностью

потока мощности $11,8 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}$ и экспозицией 8,5 мин.

I – частота ЭМП 36,25 ГГц;

II – частота ЭМП 37,25 ГГц;

III – частота ЭМП 38,25 ГГц;

Всхожесть семян огурца была максимальной на частоте 37,25 ГГц и составила 89% для экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности.

$11,8 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}$. Всхожесть семян в контроле составила 65%. Всхожесть семян

обработанных ЭМП на частотах 36,25 ГГц и 38,25 ГГц отличалась от контроля на 5-8%.

В эксперименте с семенами томатов (рис. 4.30) всхожесть была максимальной на частоте 37,705 ГГц и составила 88% для экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности $1,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. В контроле всхожесть составила 67%.

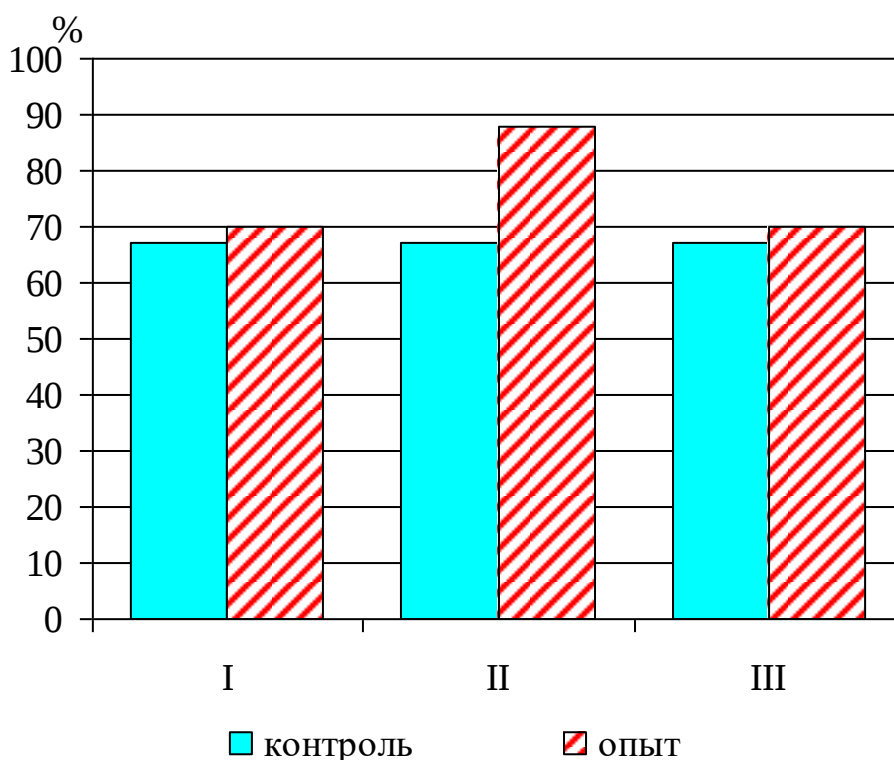


Рис. 4.30. Всхожесть семян томата, обработанных ЭМП с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ и экспозицией 8,5 мин.

I – частота ЭМП 36,705 ГГц;

II – частота ЭМП 37,705 ГГц;

III – частота ЭМП 38,705 ГГц;

Всхожесть семян томатов, обработанных ЭМП на частотах 36,705 ГГц и 38,705 ГГц отличалась от контроля на 3%, а от значения всхожести семян на частоте 37,705 ГГц на 18%.

Зависимость всхожести семян огурца от времени облучения приведена на рис. 4.31.

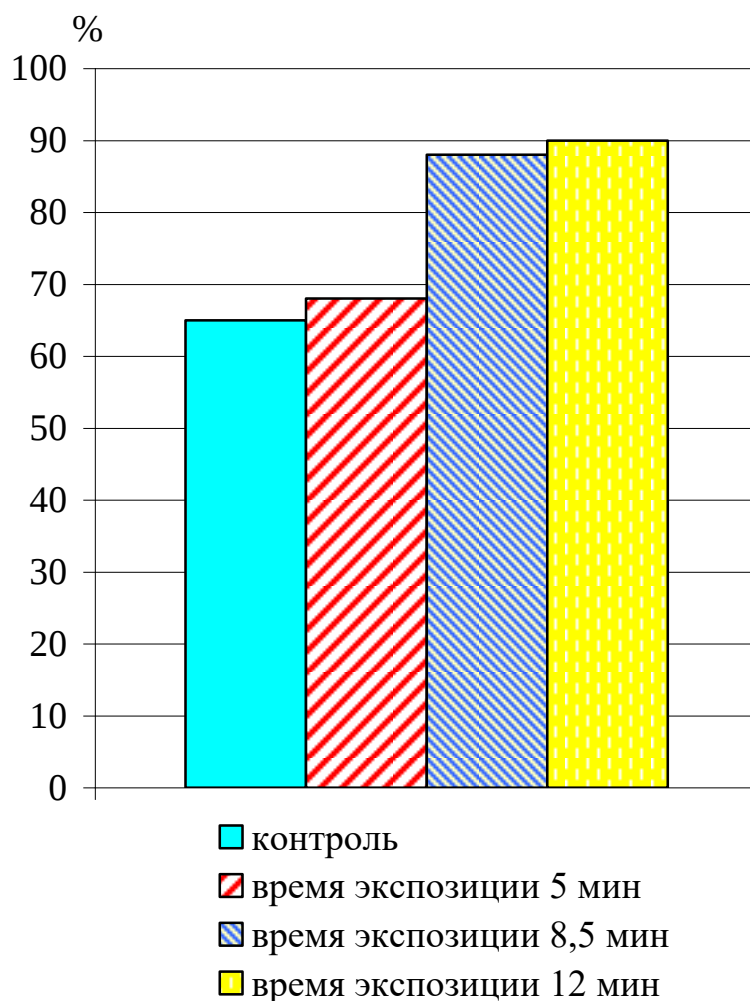


Рис. 4.31. Зависимость всхожести семян огурца «ТСХА-575» от времени облучения их ЭМП на частоте 37,25 ГГц и плотность потока

мощности $11,8 \frac{i \hat{e} V_0}{\tilde{n} l^2}$

Сравнивая всхожесть семян огурца, при обработке ЭМП на частоте 37,25 ГГц в течение 5 мин., 8,5 мин., 12 мин. следует отметить, что процент появившихся всходов при экспозиции 8,5 мин. и 12 мин. выше контроля на 25% и выше всходов при экспозиции 5 мин. на 22%. Всхожесть семян в контроле составляла 65%.

Всхожесть семян томата «Rinato» от времени облучения их ЭМП показана на рис. 4.32.

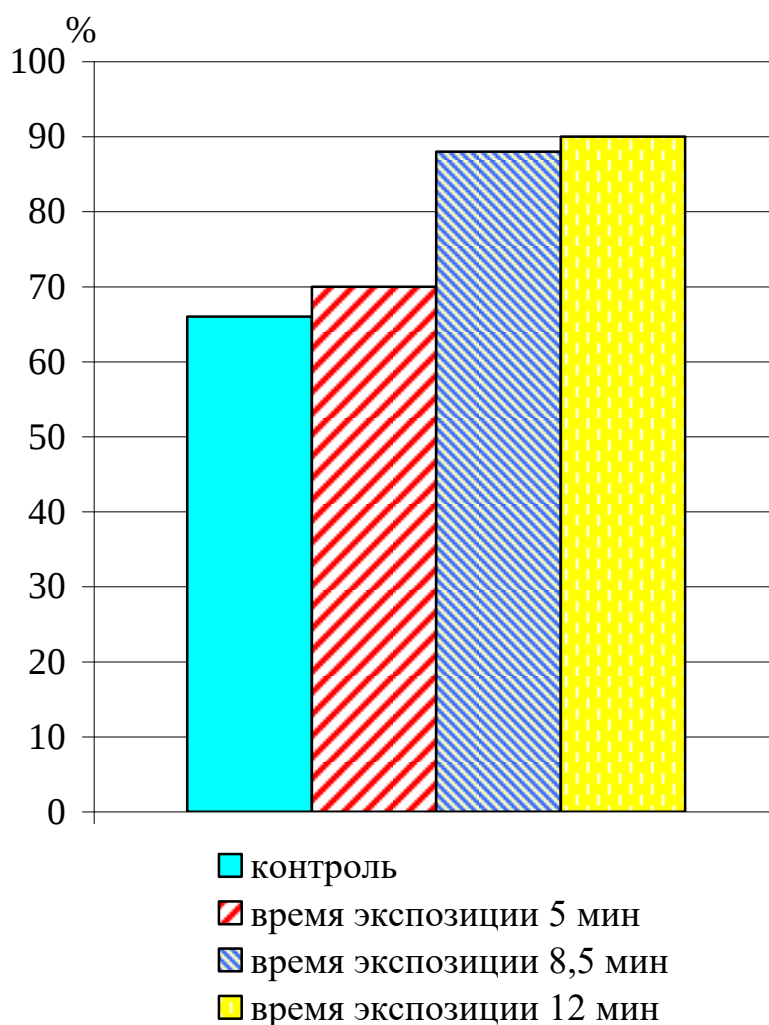


Рис. 4.32. Зависимость всхожести семян томата от времени облучения их ЭМП на частоте 37,705 ГГц и плотностью потока мощности

$$7,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Из приведённого эксперимента следует, что обработка семян томата ЭМП с экспозицией 8,5 мин. и 12 мин. почти не изменила всхожесть семян и составила 88-89%. Уменьшение времени облучения семян томата до 5 мин. приводит к различию всхожести по отношению к контролю всего на 3%.

Эксперимент с обработкой семян огурца ЭМП на частоте 37,25 ГГц при изменении плотности потока мощности ЭМП от $5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ показал, что

всхожесть семян изменяется не более 1% (рис. 4.33).

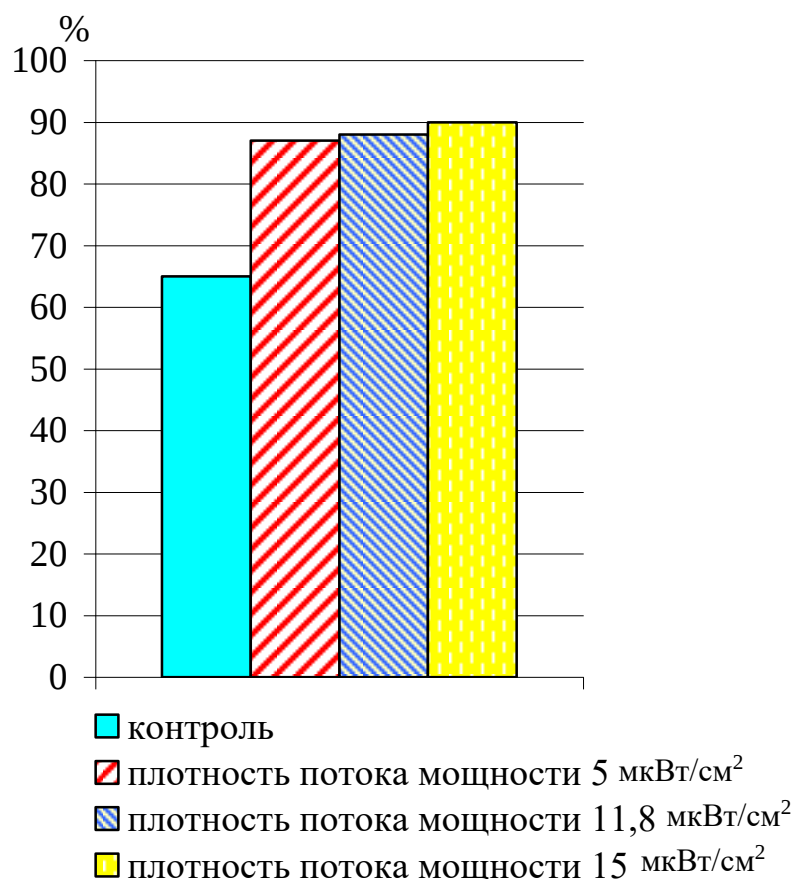


Рис. 4.33. Зависимость всхожести огурца «ТСХА-575» от плотности потока мощности на частоте 37,25 ГГц с экспозицией 8,5 мин.

Обработка семян томата ЭМП с плотностью потока мощности 5-10 $\frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ на частоте 37,705 ГГц также показала, что их всхожесть почти не изменялась и по отношению к контролю составила 21%.

4.5.3. Исследование пигментов хлорофилла «а» в листьях огурцов и томатов после обработки их семян электромагнитным излучением.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений является важным показателем их развития и зависит от воздействия различных факторов электромагнитной природы. Это наблюдается и после

предпосевной обработки семян огурцов и томатов ЭМП крайневысокой частоты.

Определение содержания хлорофилла проводили на проростках огурцов и томатов. Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла «а») определяли по методике А.А. Шлык [218] на спектрофотометре СФ-26 в 24 исследуемых вариантах. Содержание хлорофилла рассчитывали по соответствующим формулам [218].

Результаты эксперимента представлены на рис. 4.34.

При обработке семян огурца «ТСХА-575» ЭМП на частоте 37,25 ГГц было получено увеличение содержания хлорофилла в листьях огурца на 0,98 мг/г по отношению контроля при экспозиции от 8,5 мин до 12 мин. С уменьшением экспозиции до 5 мин (рис. 4.34) содержание хлорофилла «а» по отношению к контролю составила менее 0,13 мг/г. В контроле содержание хлорофилла «а» было на уровне 0,24 мг/г. На рис. 4.35 показано содержание хлорофилла «а» в проростках томата.

Из эксперимента следует (рис. 4.35), что содержание хлорофилла «а» в проростках томата из семян, облучённых ЭМП на частоте 37,705 ГГц увеличилось по сравнению с контролем на 1 мг/г для экспозиции 8,5 мин.

При экспозиции 12 мин. отмечено увеличение хлорофилла «а» всего на 0,12 мг/г по сравнению с содержанием хлорофилла при экспозиции 8,5 мин. и на 1,12 мг/г по сравнению с контролем.

При изменении плотности потока мощности (см. табл. 4.4), как для огурцов так и для томатов не было выявлено существенных различий в содержании хлорофилла в проростках при облучении семян огурца ЭМП на частоте 37,25 ГГц и семян томата на частоте 37,705 ГГц с экспозицией 10 мин.

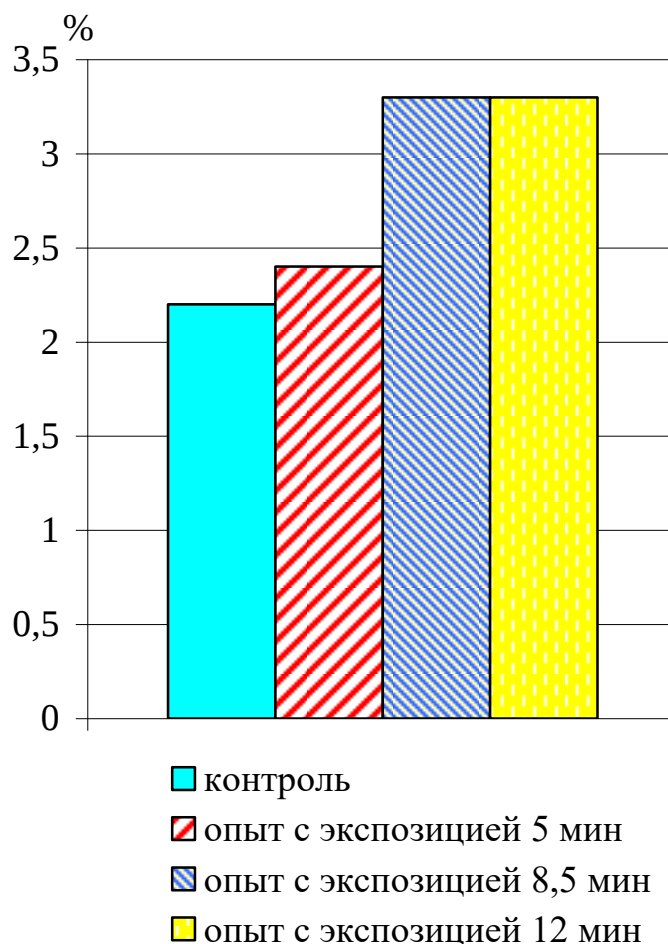


Рис. 4.34. Зависимость содержания хлорофилла «а» в листьях огурца «ТСХА-575» частоте 37,25 ГГц с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

4.5.4. Влияние ЭМП на содержание азота и фосфора в зелёной массе огурцов и томатов.

Изучение содержания азота и фосфора в проростках огурцов и томатов, при воздействии на их семена ЭМП, представляет собой большой интерес, так как эти вещества играют большую роль в физико-химических процессах растений, являются составной частью нуклеопротеидов, определяющих наследственные свойства растений.

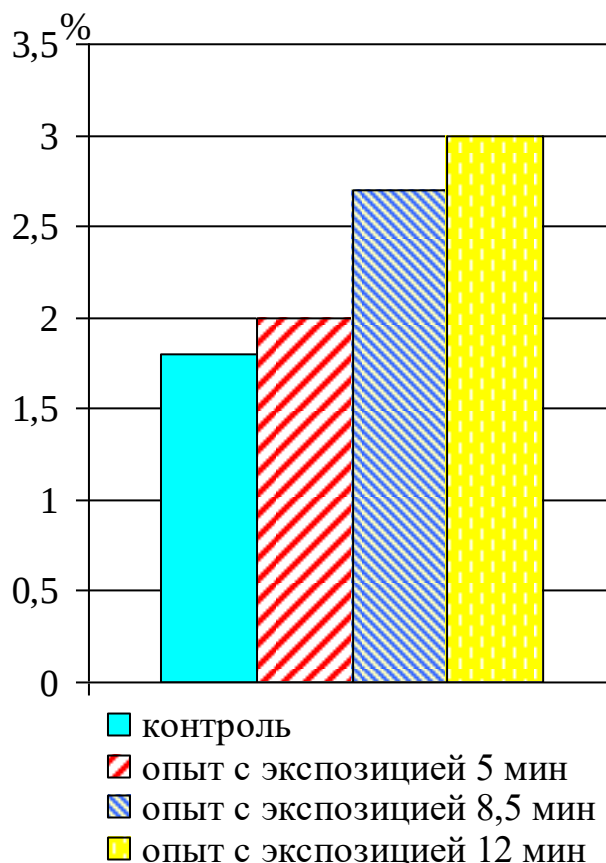


Рис. 4.35 Зависимость содержания хлорофилла «а» в проростках томата из семян, обработанных ЭМП на частоте 37,705 ГГц с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Недостаток фосфора и азота в растениях приводит к замедленному развитию и снижению их урожайности. Для определения азота и фосфора использовали 24 варианта в двух повторностях.

Предварительная подготовка материала проводилась в следующем порядке: фиксация материала до 110°C в течение 10-15 мин.; высушивание материала до постоянного веса при температуре 70°C.

Содержание гигроскопической влаги определяли путём высушивания материала при температуре 100°C. Материал считался абсолютно сухим, когда разница между последующим взвешиванием не превышала 0,0003 г [215]. Общий азот и фосфор определяли в одной навеске после мокрого озоления по методу Пеневич.

По этому методу навеска сжигается при нагревании концентрированной серной кислотой в присутствии перекиси водорода. При этом образуется кислота (H_3PO_4), аммиак и свободный калий.

Азот определяли ускоренным методом Э.В. Чмелёвой и С.Л. Тютерева с использованием реактива Неслера [216]. В зависимости от содержания азота раствор окрашивался в жёлтый или оранжевый цвет. Для измерения интенсивности окраски растворов использовали фотоэлектрокалориметр 56М-УЧ с синим фильтром. Для расчётов количества азота использовали калибровочную кривую, снятую для образцового раствора NH_4Cl .

Для определения фосфора использовали метод Дениже. Сущность метода состояла в том, что фосфорная кислота взаимодействует молибденовокислым аммонием и в кислой среде в присутствии восстановителя (хлористого олова) образует комплексное соединение голубого цвета. Интенсивность голубого цвета пропорциональна содержанию в растворе фосфорной кислоты. Интенсивность цвета определяли на фотокалориметре ЛМФ-72 с красным светофильтром. Содержание фосфора рассчитывали на калибровочной кривой, для построения которой использовали KH_2PO_4 .

На рис. 4.36 и 4.37 приведены результаты воздействия электромагнитного поля крайневисокой частоты на содержание азота в проростках огурца «ТСХА-575» после облучения ЭМП семян.

Сравнивая содержание азота в проростках огурцов, семена которых были обработаны электромагнитным излучением на частоте 37,25 ГГц с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ в течение 5 мин., 8,5 мин., 12,0 мин. можно заметить, что процент содержания азота в вариантах с экспозицией 5 мин., 8,5 мин. и 12,0 мин. был выше содержания азота в контроле на 0,3%, 1,8%, 2,1% соответственно. Содержание азота в контроле проростков огурца составило 3,9%.

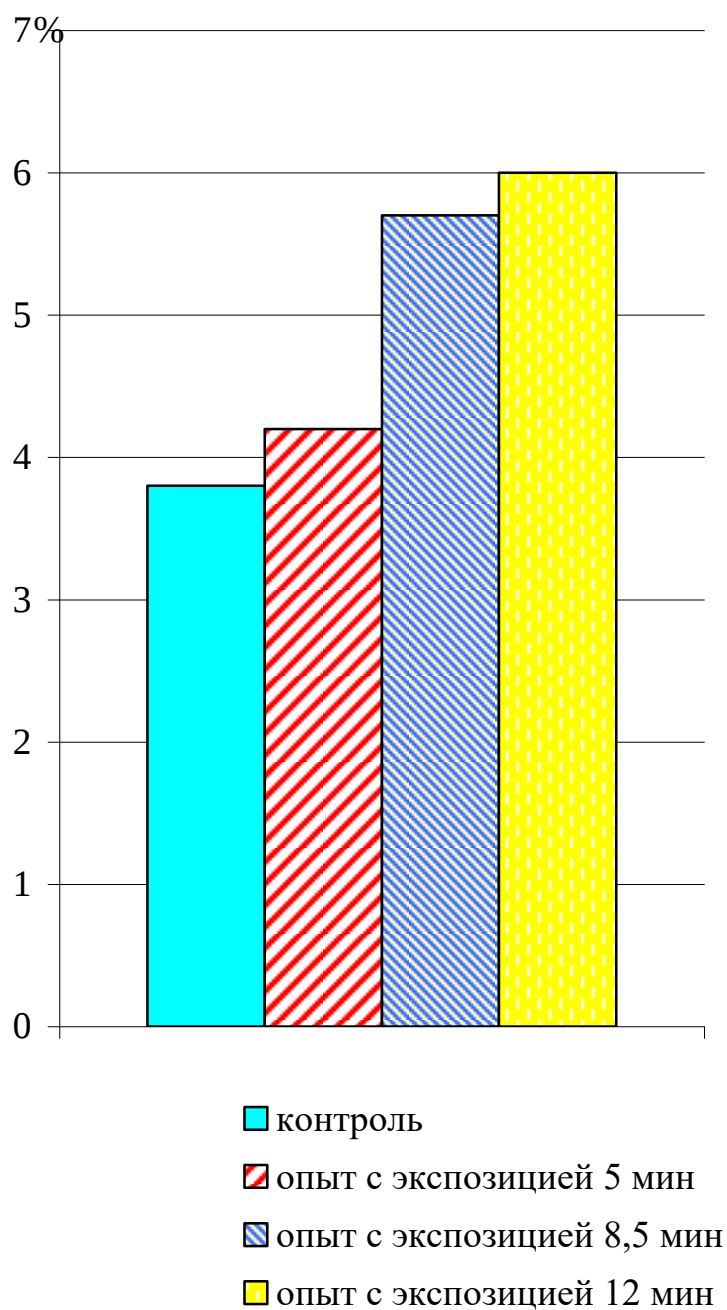


Рис. 4.36. Зависимость содержания азота в проростках огурца «ТСХА-575» из семян, обработанных ЭМП на участке 37,25 ГГц с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$

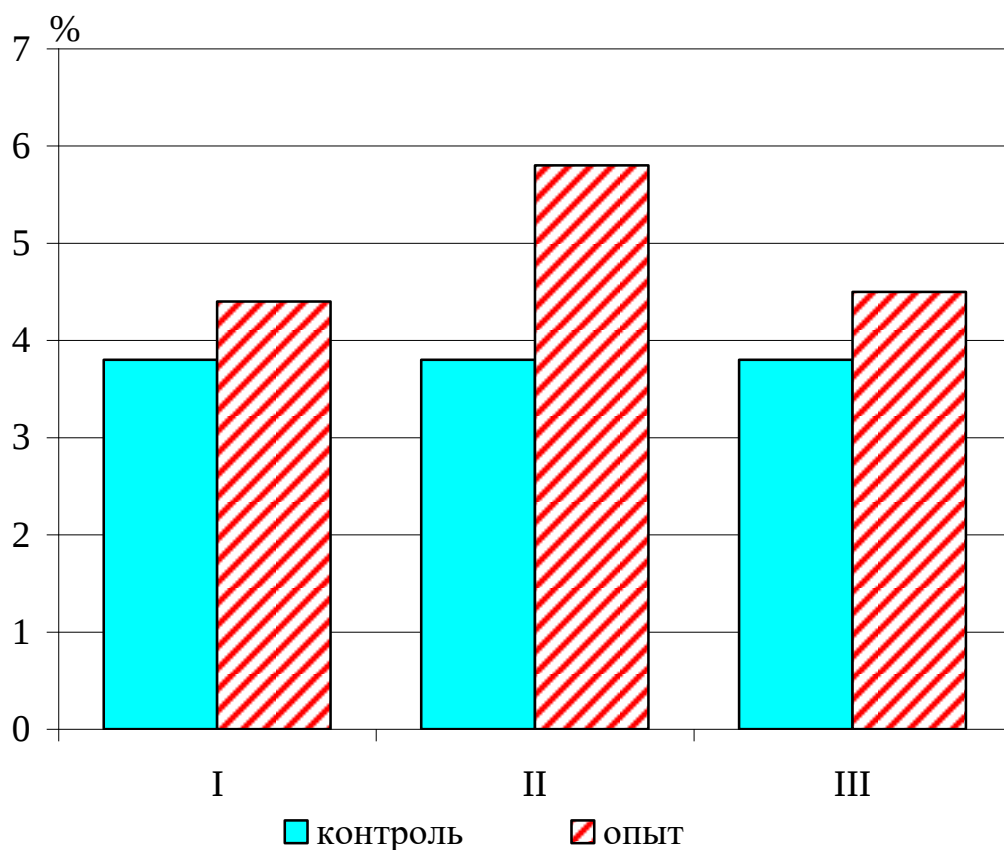


Рис. 4.37. Процент содержания азота в проростках огурца «ТСХА-575» при обработке семян ЭМП в диапазоне частот с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$ и экспозицией 10 мин.

- I – частота ЭМП 36,25 ГГц;
- II – частота ЭМП 37,25 ГГц;
- III – частота ЭМП 38,25 ГГц;

Как следует из рис. 4.37, уменьшение или увеличение частоты облучения семян огурцов от частоты 37,25 ГГц приводит к уменьшению азота в проростках огурцов. Так, на частоте 36,25 ГГц уменьшение азота составило 1,6%, а на частоте 38,25 ГГц – 1,5% по отношению к количеству азота на частоте 37,25 ГГц.

Полученные результаты свидетельствуют о более эффективном использовании ЭМП на частоте 37,25 ГГц. Зависимость содержания

фосфора в проростках огурца «ТСХА-575» от изменения экспозиции, при облучении семян огурцов ЭМП, приведена на рис. 4.38.

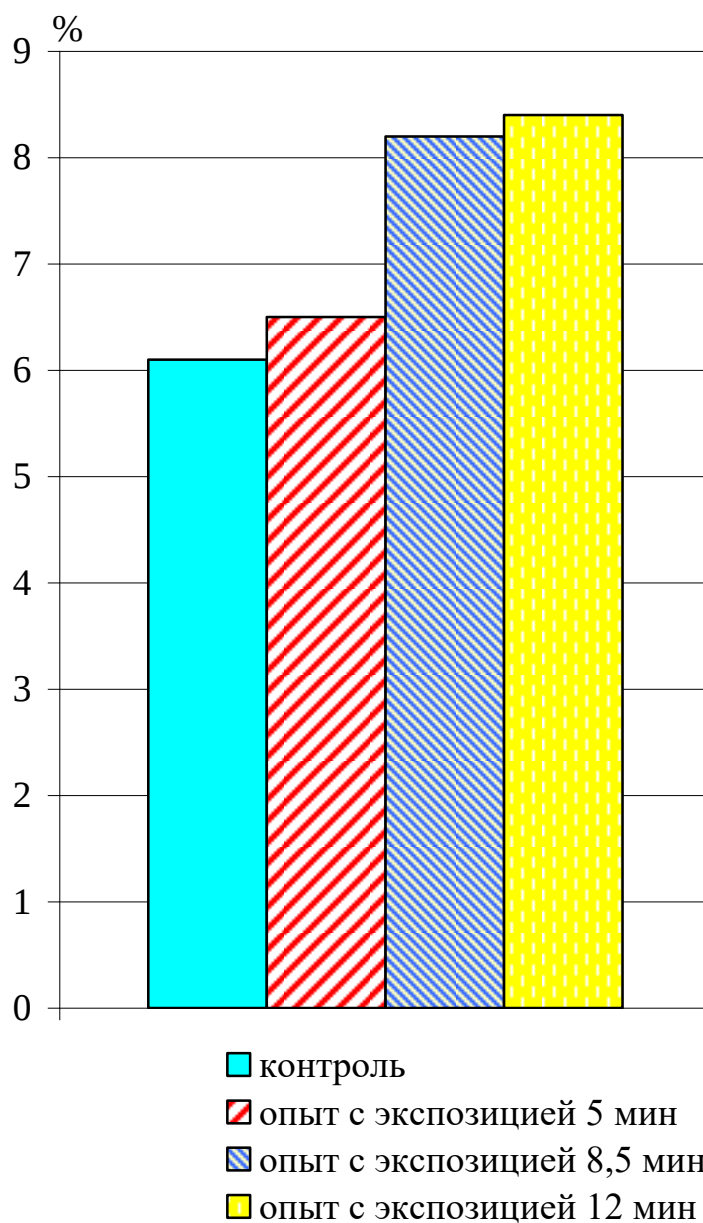


Рис. 4.38. Зависимость содержания фосфора в проростках огурцов из семян, обработанных ЭМП на частоте 37,25 ГГц с плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{м}^2}$

Содержание фосфора (рис. 4.38) в проростках огурцов на частоте 37,25 ГГц составил увеличение по отношению к контролю для экспозиции

5 мин., 8,5 мин. и 12,0 мин. – 0,4%, 2,1%, 2,3% соответственно. В контроле количество фосфора не превышало 6,1%.

Процент содержания азота в проростках томата «Rinato» показано на рис. 4.39.

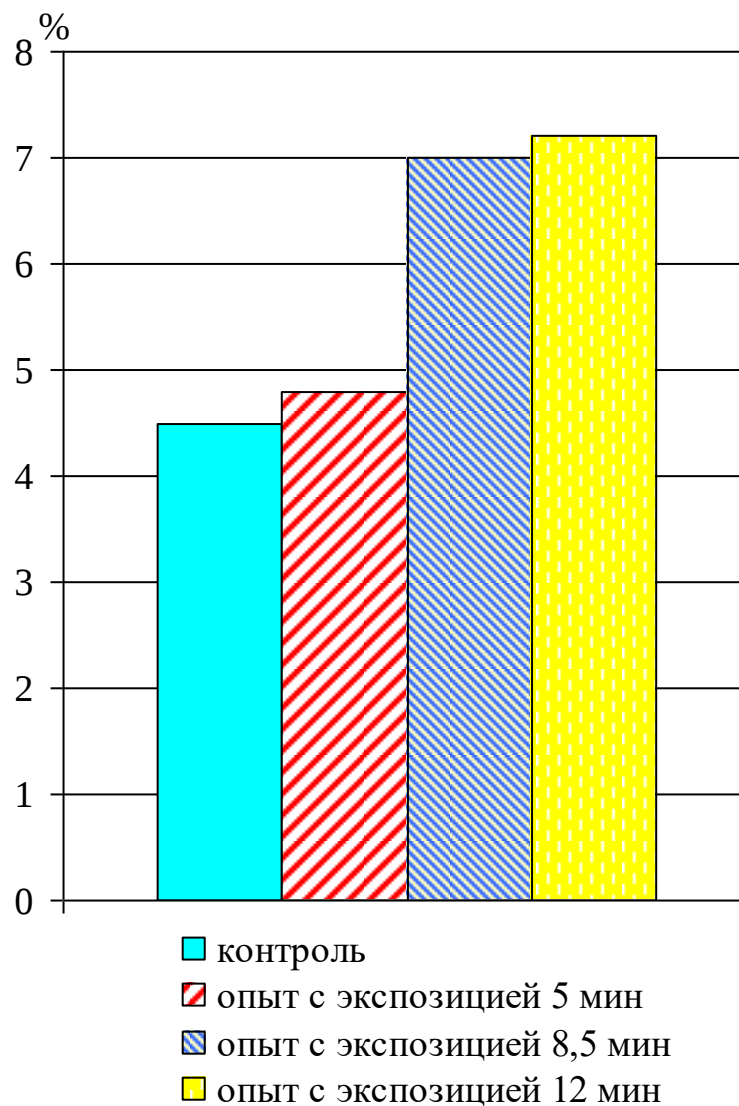


Рис. 4.39. Зависимость содержания азота в проростках томата «Rinato» из семян, обработанных ЭМП на частоте 37,705 ГГц с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Результаты процентного содержания азота в проростках томата «Rinato» (рис. 4.39) из семян, облучённых ЭМП на частоте 37,705 ГГц с

экспозицией 5 мин., 8,5 мин., 12,0 мин показали, что по отношению к контрольным проросткам содержание азота в опытных проростках было выше на 0,25% для экспозиции 5 мин., на 2,5% для экспозиции 8,5 мин. и на 2,6% для экспозиции 12 минут. В контрольных проростках содержание азота не превышало 4,5%.

Зависимость содержания фосфора в проростках томата «Rinato» от изменения экспозиции, при облучении семян томата ЭМП, приведена на рис. 4.40.

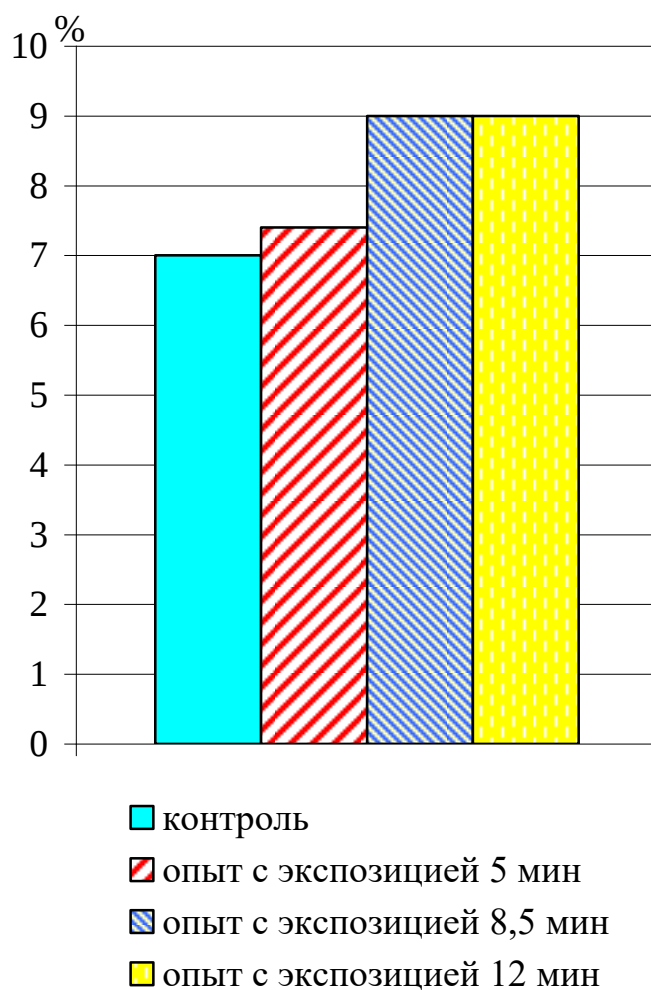


Рис. 4.40. Зависимость содержания фосфора в проростках томата из семян, обработанных ЭМП, на частоте 37,705 ГГц с плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2}$

Экспериментальные исследования (рис. 4.40) показали, что

содержание фосфора в опытных проростках томата составило увеличение на 2%, по отношению к контролю, полученному при облучении семян ЭМП на частоте 37,705 ГГц с экспозицией 8,5 мин. и плотностью потока мощности $7,5 \frac{\text{ì êBò}}{\text{ñî}^2}$. В контроле содержания фосфора составило 7%.

При уменьшении времени облучения семян томата ЭМП содержание фосфора в опытных проростках находится почти на уровне контроля и отличается от контроля всего на 0,4%.

4.6. Влияние ЭМП крайневысокой частоты на урожайность огурцов и томатов

Лабораторные и полевые исследования показали, что предпосевная обработка семян огурца «ТСХА-575» и томата «Rinato» ЭМП с оптимальными параметрами приводит к увеличению по сравнению с контролем: хромосомных aberrаций огурцов и томатов на 5,4% и 5,5% соответственно; полевой всхожести огурцов и томатов на 24% и 18% соответственно; содержанию пигментов хлорофилла в проростках огурцов и томатов на 0,48 мг/г и 1мг/г соответственно; содержанию азота в проростках огурцов и томатов на 1,8% и 2,5% соответственно; содержанию фосфора в проростках огурцов и томатов на 2,1% и на 2% соответственно.

Для диагностирования состояния растений, выращенных из обработанных ЭМП семян с найденными технологическими параметрами, использовался программно-аппаратный комплекс, работу которого реализовывал алгоритм замкнутого цикла [219-220].

При полевом эксперименте с целью проверки биометрических характеристик растений, выращенных из обработанных семян, согласно алгоритму (Рис. 4.41) фиксировались: влажность почвы (при помощи динамического рефлектметра, (Рис. 4.42)), температура почвы (при помощи системы сканирования среды (Рис. 4.43)), диаметр стебля, плодов

и водного потока растения (Рис. 4.44 - 4.46) [221].

В режиме текущего времени информация о значении вышеуказанных параметров поступала, посредством устройства сопряжения, на ЭВМ, происходила оцифровка и обработка полученных сигналов.

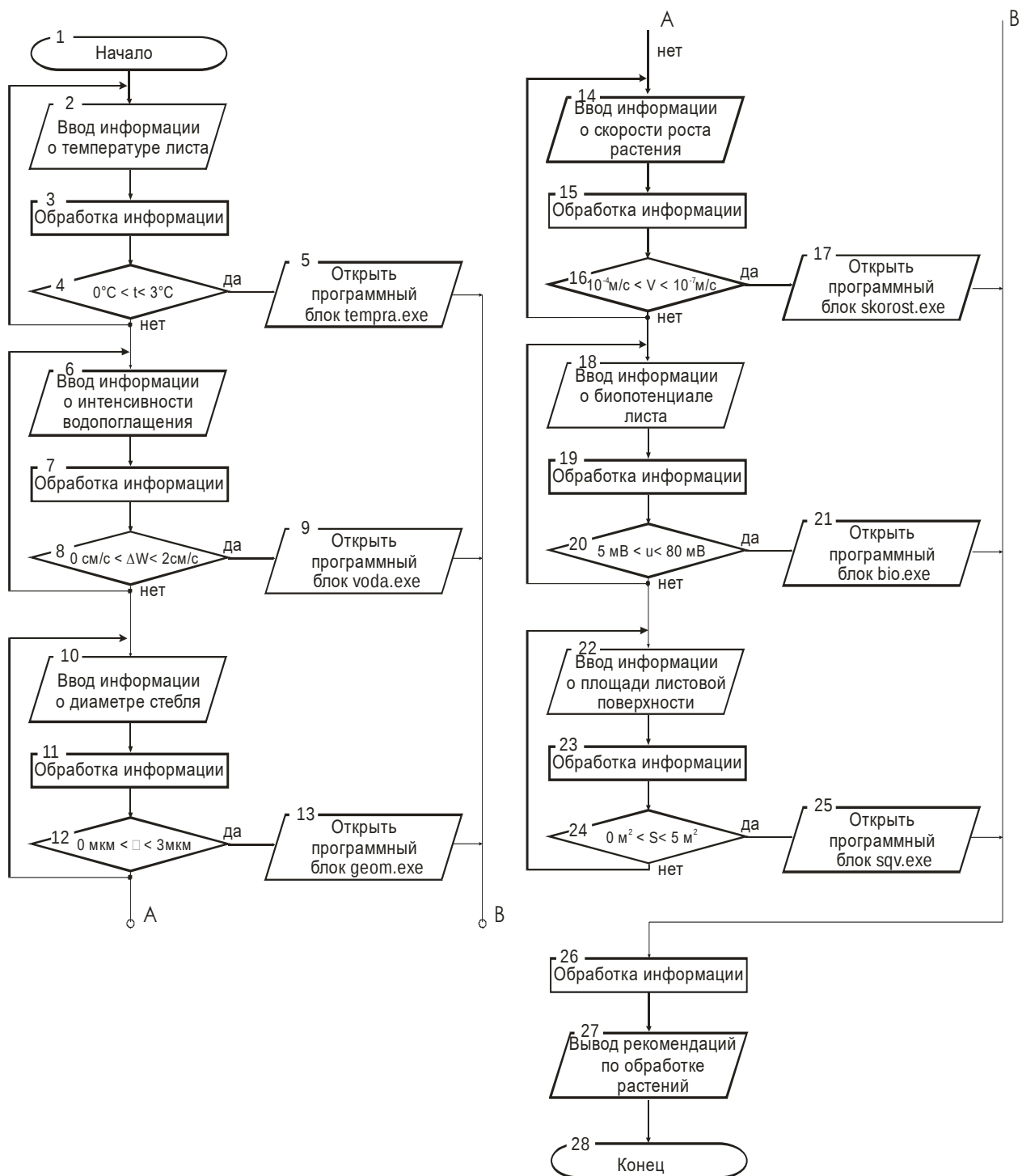


Рис. 4.41. Алгоритм обработки информации



Рис. 4.42. Определение влажности почвы при помощи динамического рефлектометра



Рис. 4.43. Датчик сканирования среды



Рис. 4.44. Измерение диаметра плодов



Рис. 4.45. Измерение диаметра стебля томатов



Рис. 4.46. Датчик измерения водного потока, установленный на стебле растения

В результате полученных данных было определено, что у опытных растений диаметр стебля и плодов был больше, по сравнению с контролем в среднем на 10%, водопоглощающая способность при одинаковых параметрах почвы (химический состав, влажность, температура) оказалась выше на 15%. Данный факт свидетельствует о том, что имеет место ускорение обменных процессов в растительном организме, выращенном из активированных семян.

В таблице 4.5 приведены данные о структуре урожайности огурцов «ТСХА-575» и томатов «Rinato»

Таблица 4.5

Структура урожайности огурцов и томатов

Вид тепличной культуры	Число пестичных цветков, шт			Урожай кг/м ²		Прибавка урожая относит. контроля	
	всего на растение	на главном побеге	на боковых побегах	контроль	опыт	кг/м ²	%
контроль огурцы «ТСХА- 575»	7,9±0,9	3,3±0,7	4,6±0,5	150,2	208,8	58,6	39,0
	28,2±2,8	12,3±1,5	15,9±1,3				
контроль томаты «Rinato»	14,2±1,0	6,8±0,6	7,4±0,5	285	355	70	24,6
	42,6±2,1	19,2±1,0	23,4±1,1				

Из результатов урожайности огурцов и томатов (Табл. 4.5) следует, что предпосевная обработка семян огурцов и томатов ЭМП с оптимальными параметрами увеличивает урожай огурцов и томатов по отношению к контролю на 39% и 24,6% соответственно.

Выводы

1. Для предпосевной обработки семян огурцов и томатов в лабораторных условиях следует применять перестраиваемые по частоте ГЛПД с параметрами: частотный диапазон 36-39 ГГц; кратковременная нестабильность частоты ($\tau_u=10^{-2}$ с) 10^{-6} ; выходная мощность 600 мВт.

2. Установлено, что для стимуляции жизнедеятельности семян

огурцов их предпосевную обработку следует проводить электромагнитным излучением с параметрами: частота 37,25 ГГц; плотность потока мощности $P=12 \text{ мкВт/см}^2$; нестабильность частоты 10^{-6} ; экспозиция 8,5 мин.

3. Предпосевную обработку семян томата следует проводить низкоэнергетическим электромагнитным излучением с параметрами: частота 37,705 ГГц; плотность потока мощности $P=7,5 \text{ мкВт/см}^2$; экспозиция 8,5 мин.

4. Предпосевная обработка семян огурцов и томатов низкоэнергетическим ЭМП КВЧ диапазона позволит увеличить прорастание на 16-20%; энергию роста на 13-15%, урожайность на 25...40% по сравнению с контролем.

РАЗДЕЛ 5

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ

5.1. Общие положения методики низкоэнергетической электромагнитной обработки семян

На основе разработанных научно – технических предпосылок использования информационно - резонансных свойств действия низкоэнергетических электромагнитных излучений на семена тепличных растений созданы технические приборы и сформулированы общие положения методики разработки низкоэнергетической электромагнитной технологии, дана оценка эффективности её воздействия для активации семян тепличных культур [222-225].

Полученные научные результаты положены в основу разработки технологических средств по активации семян тепличных культур. На основании экспериментальных исследований сформулированы общие положения методики разработки технологии активации семян тепличных культур (Рис. 5.1.)

Условно при реализации алгоритма разработки технологии решают две задачи: первая связанная с оценкой жизнеспособности семян и их кондиционности с использованием экспресс методов, а вторая - связана с формулированием требований к техническим параметрам источника высокочастотного излучения и пространственно-временной ориентацией системы «излучатель - растительный организм».

От точности решения первой задачи зависит эффективность низкоэнергетической электромагнитной технологии, а результатом решения второй задачи является получение технологических параметров электромагнитного поля, на основании чего, определяются конструкционные параметры системы обработки растений.

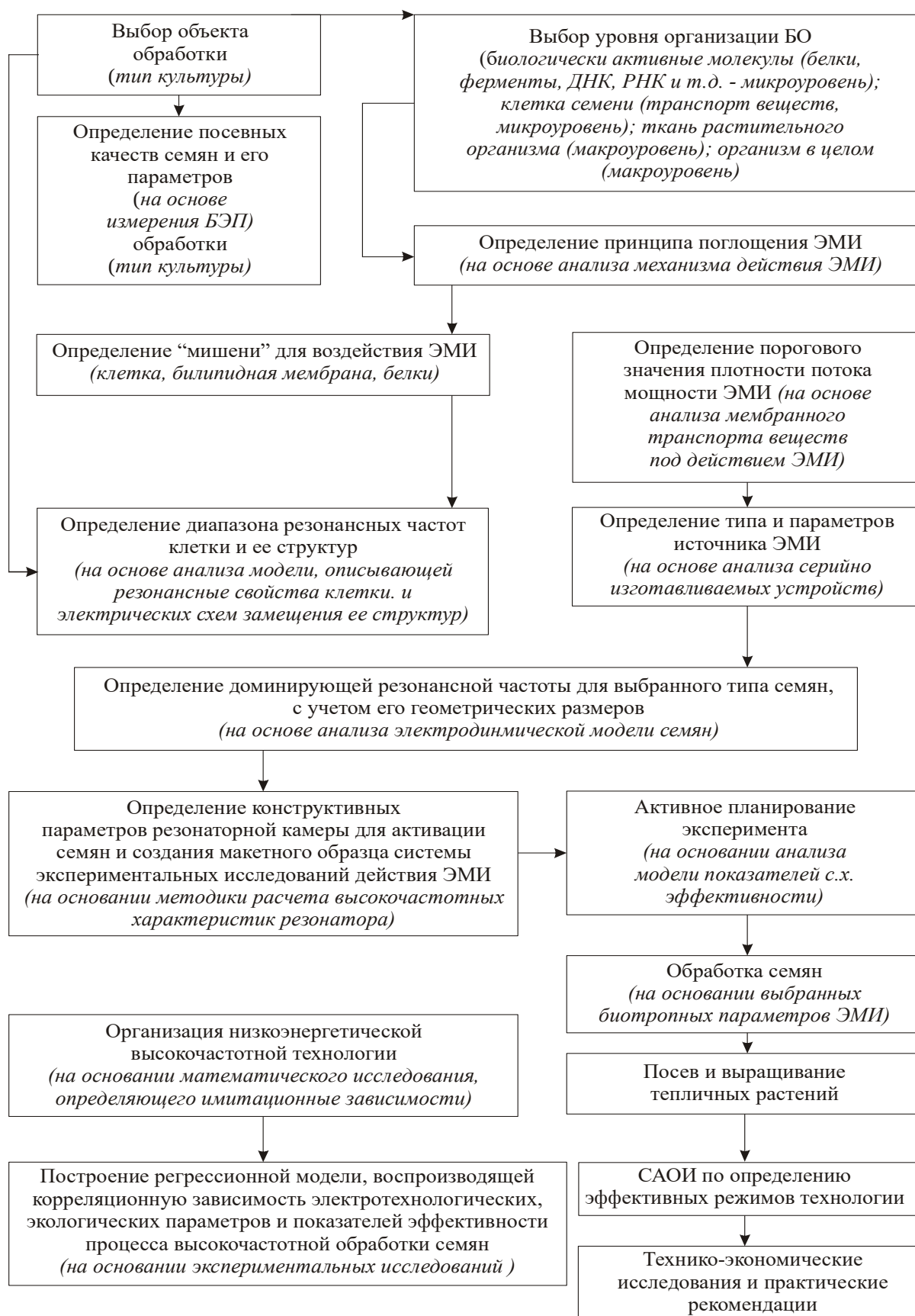


Рис. 5.1 Алгоритм разработки низкоэнергетических электромагнитных технологий активации семян.

5.2. Технические средства низкоэнергетической электромагнитной активации семян тепличных культур

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования по предпосевной обработке семян тепличных культур показывают, что для промышленного использования необходимы источники излучения для диапазона частот 37-38 ГГц с выходной мощностью 4-5 Вт с нестабильностью частоты 10^{-6} . Получить такую величину мощности на ГЛПД возможно лишь путём суммирования нескольких генераторов на основе открытого бочкообразного резонатора (ОБР).

На рис. 5.2 показана конструкция сумматора мощности на основе ОБР, а на рис. 5.3 его общий вид.

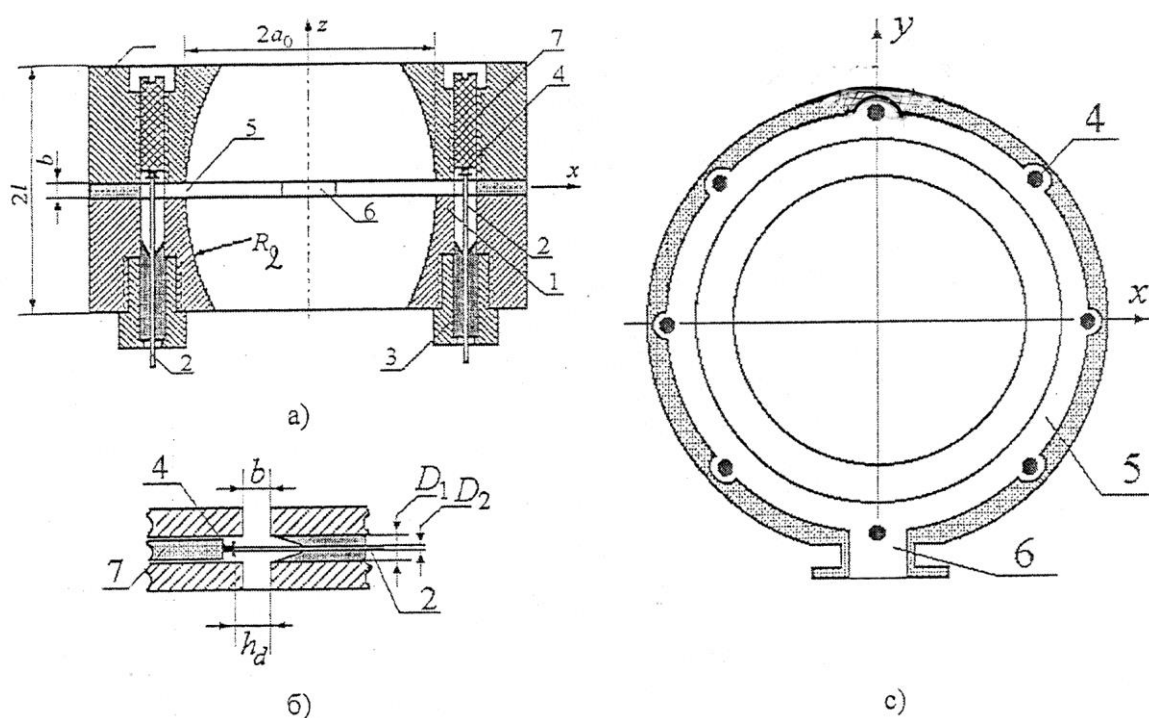


Рис. 5.2 Конструкция сумматора мощности на основе ОБР

Резонатор изготовлен из латуни и состоит из двух частей (1) стянутых болтами. В конструкции имеется несколько отрезков

коаксиальных линий (2), связанных с углублением в резонаторе. В торцы этих отрезков включаются ЛПД 3А-759Б (4).

Отрезок коаксиала имеет поглотитель (3), необходимый для устранения паразитных колебаний. ЛПД (4) и элементы связи (6), в виде волновода с зауженным сечением, включенные в углубление (5). Прямоугольное углубление является своеобразным волноводом, в котором удалена одна боковая сторона. Изменение размеров прямоугольного углубления ($b=0,5; 1,5; 3,4$ мм; $a=0; 3; 4; 5; 6$;) производится набором прокладок, т.е. размерами съёмного кольца, которое зажато между частями ОБР.

В данном сумматоре должны существовать две системы волн, одна из которых - волна резонатора, а вторая - волна прямоугольного углубления.

Согласование этих волн зависит от размеров углубления. В сумматоре были использованы конструктивные элементы с размерами: радиус кривизны зеркал $a_0=20$ мм; $R_2=40$ мм; $L=18$ мм; $D_1=2,5$ мм; $D_2=1$ мм.

Согласование импульсов диодов с импульсом колебательной системы сумматора осуществляется в диапазоне частот, путём перемещения диода микровинтом (7), за счет изменения фазы коэффициента стоячей волны в месте включения диодов.

Питание ГЛПД осуществляется от одного источника напряжения. Напряжение на каждый диод подаётся через регулируемые стабилизаторы тока. Выходная мощность сумматора-генератора снимается с волноводного разъёма (6). В сумматоре используется 8 диодов, схема подключения которых показана на рис. 5.3.

Резонатор изготовлен из латуни и состоит из двух частей (1), стянутых болтами. В конструкции имеется несколько отрезков коаксиальных линий (2), связанных с углублением в резонаторе.

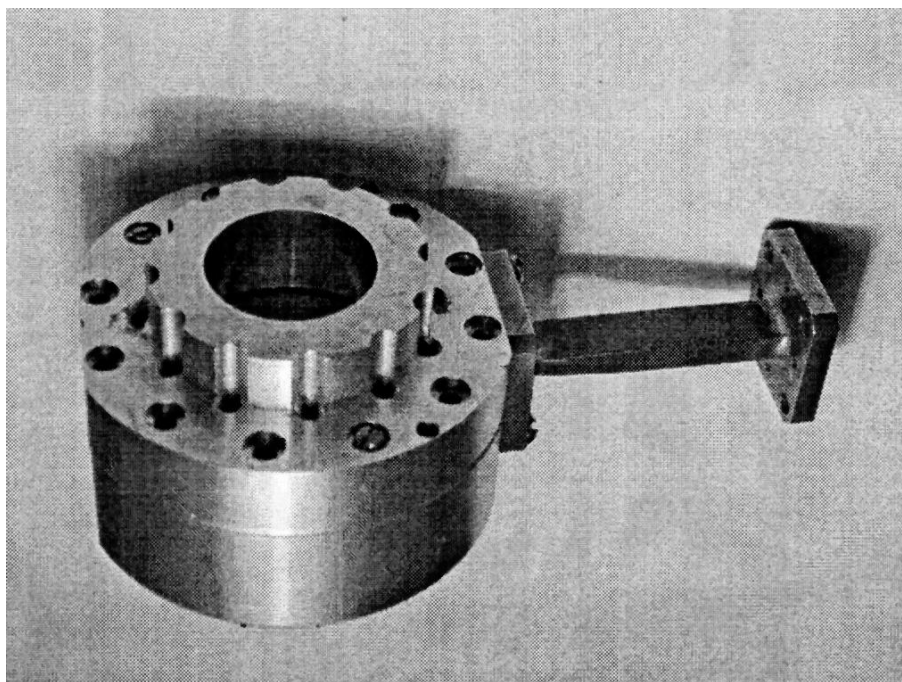


Рис. 5.3 Общий вид генератора-сумматора мощности на основе ОБР.

Сумматор мощности на ЛПД работает следующим образом. В пучности напряжений электромагнитного поля располагаются восемь диодов 3А-759Б (рис 5.2). К диодам подаются нормальные токи питания (140-150 МА), создающие отрицательное сопротивление в рабочей точке вольт-амперной характеристики диода на рабочей частоте (37...38) ГГц. Если диоды имеют идентичные характеристики, то для их синфазной работы достаточно незначительно изменять положение ЛПД в коаксиальном резонаторе. Условие взаимной синхронизации проверялось следующим способом: если при отключении и включении источника питания частота и мощность не изменялись, то это означало синхронную работу сумматора. Перестройка генератора в диапазоне частот (37...38) ГГц осуществляется изменением тока питания на одном из диодов.

Результаты эксперимента с генератором-сумматором показали, что нагруженная добротность ОБР с восьмью ЛПД составила $Q_H \approx 10^4$.

На рис. 5.4 показано как влияет на выходную мощность сумматора и его частоту положение ЛПД в коаксиальном резонаторе.

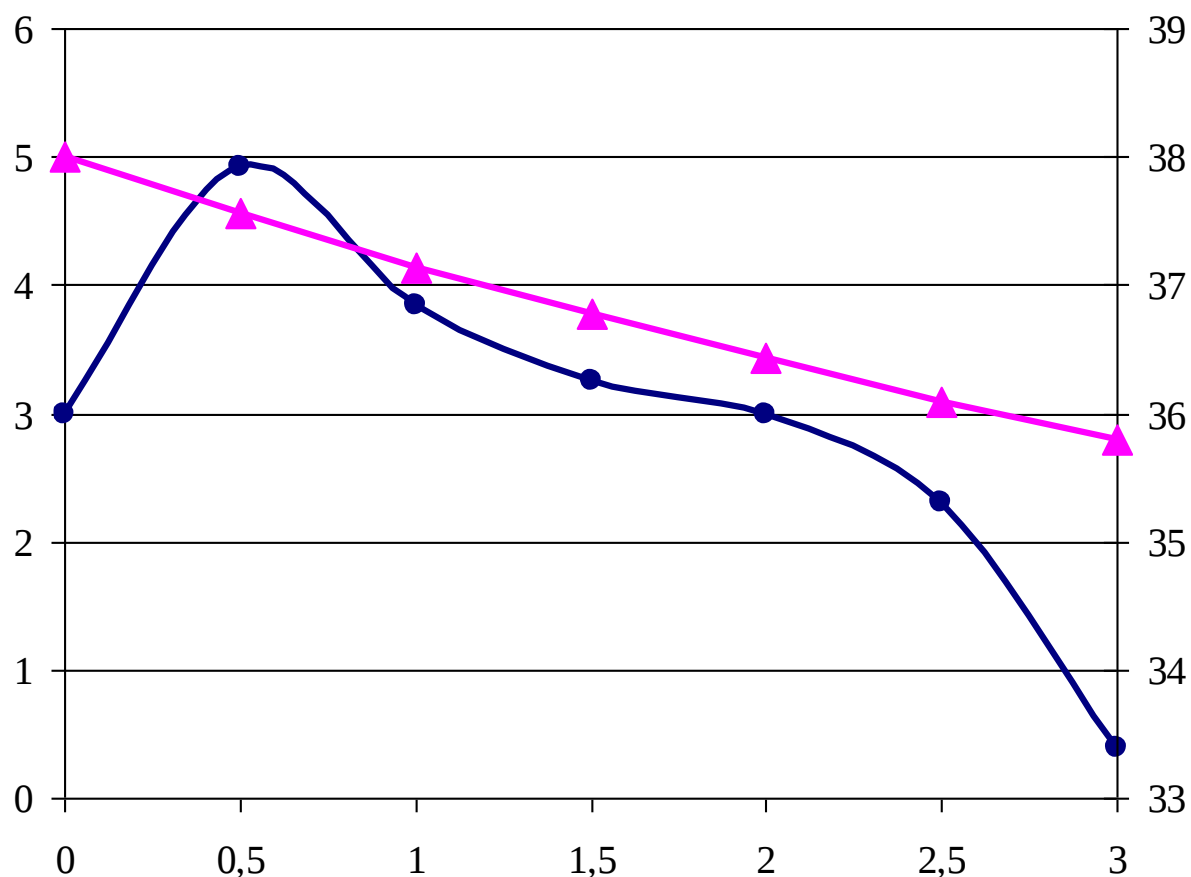


Рис. 5.4 Графики зависимости мощности сумматора на основе ОБР
и частоты от положения диодов:

- 1 – изменение мощности;
- 2 – изменение частоты.

Как следует из полученных зависимостей (рис. 5.4), максимальная величина мощности на выходе сумматора составляет 4,8 Вт при положении диодов $h_d = 0,5$ мм (см рис. 5.2) на частоте генерации 37,8 ГГц. С увеличением размера h_d до 2,5 мм величина частоты генерации уменьшается до 35,8 ГГц, а мощность до 0,5 Вт. Экспериментальная проверка электронной перестройки частоты генерации приведена на рис. 5.5.

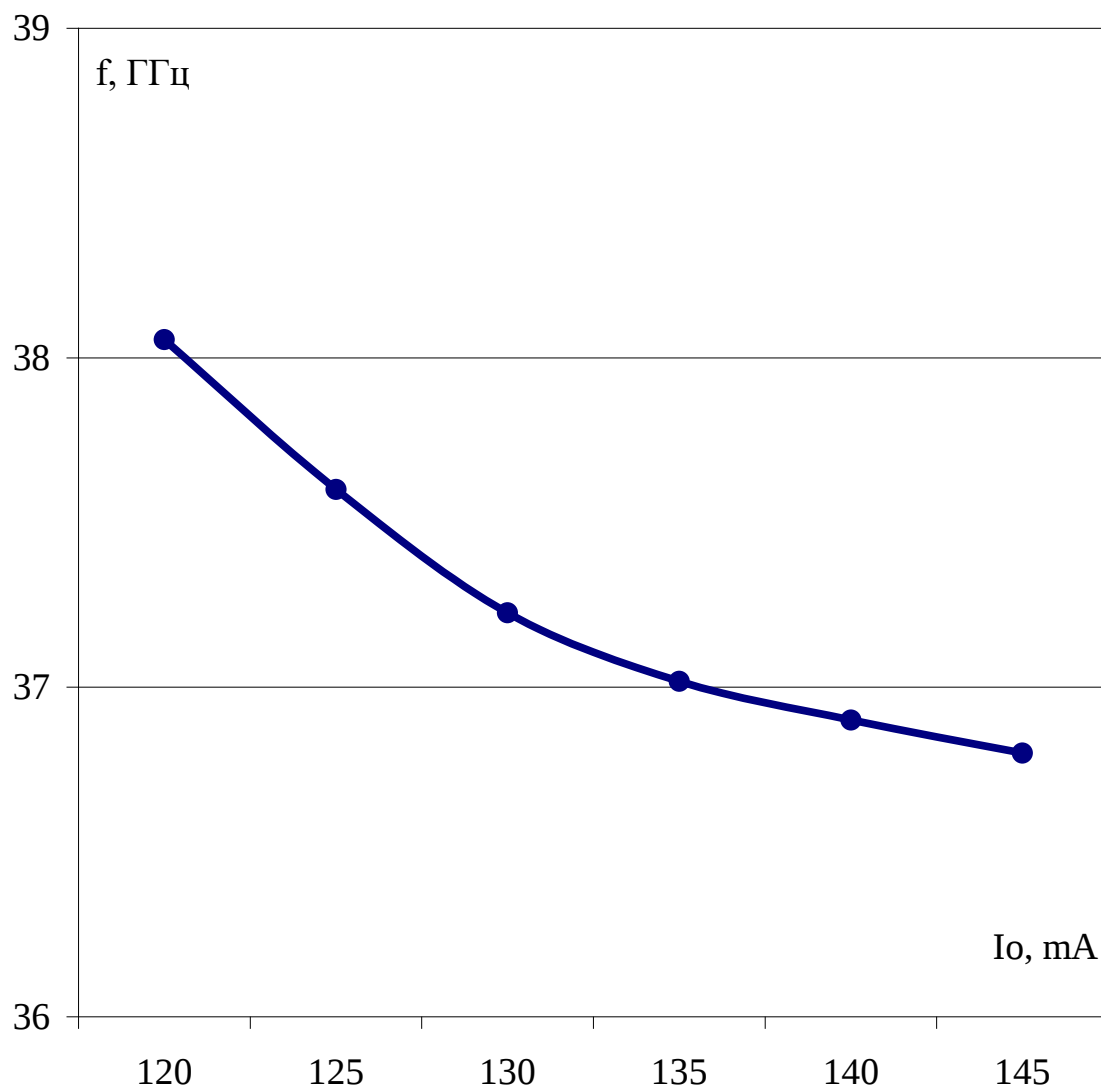


Рис. 5.5 Зависимость частоты генерации сумматора от величины тока одного из диодов.

Зависимость электронной перестройки частоты сумматора показывает (рис. 5.4), что крутизна электронной перестройки составляет 40 мГц/мА для диапазона частот 37...38 ГГц. Результаты измерений нестабильности частоты приведены на рис. 5.6.

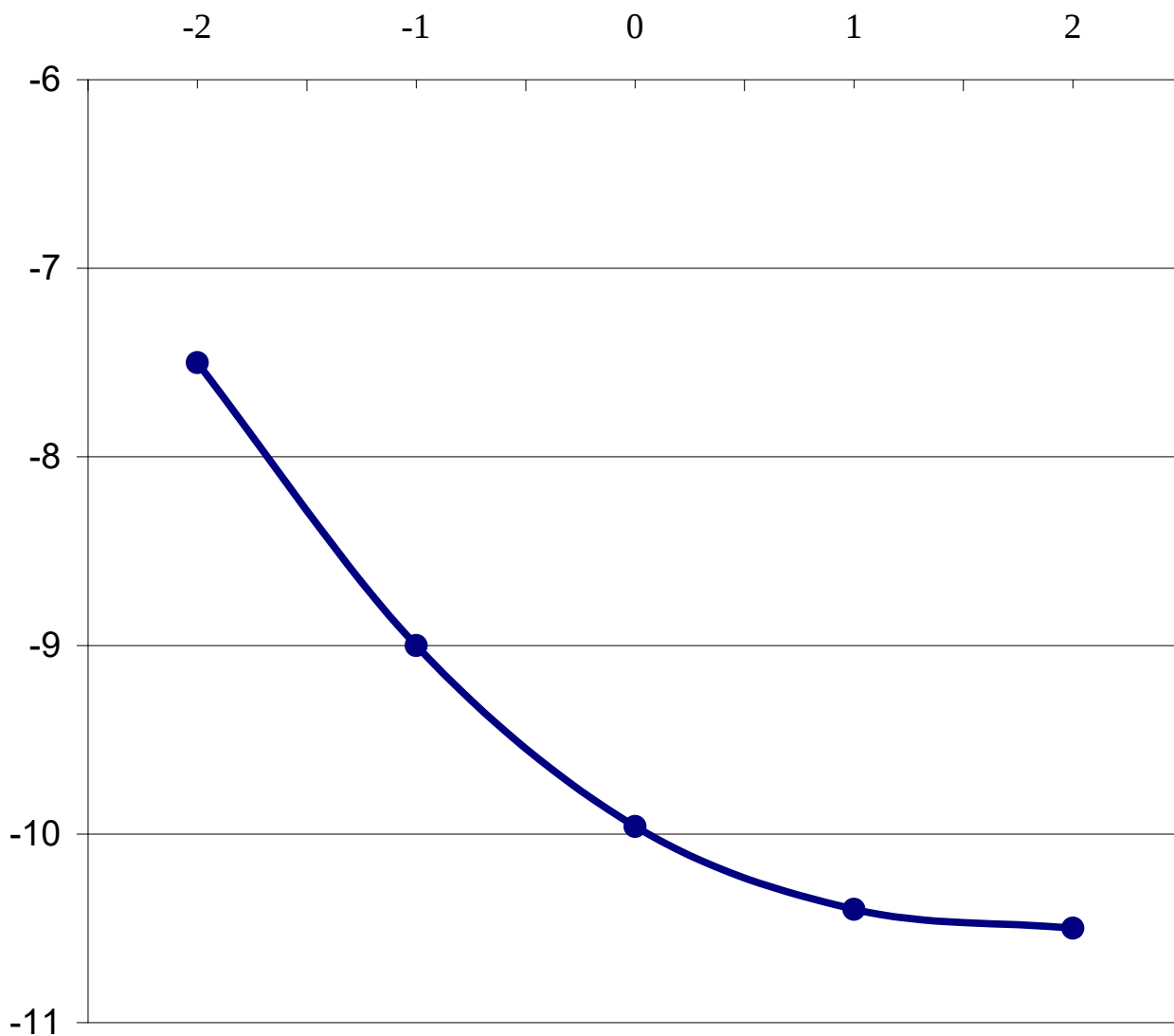


Рис. 5.6 Нестабильность частоты сумматора мощности на ОБР.

Проведённые измерения показывают (рис.5.6), что кратковременная относительная нестабильность частоты генератора-сумматора в диапазоне частот (37...38) ГГц составляет 10^{-7} .

Структурная схема установки по предпосевной обработке семян тепличных культур низкоэнергетическим электромагнитным излучением КВЧ диапазона представлена на рис. 5.7.

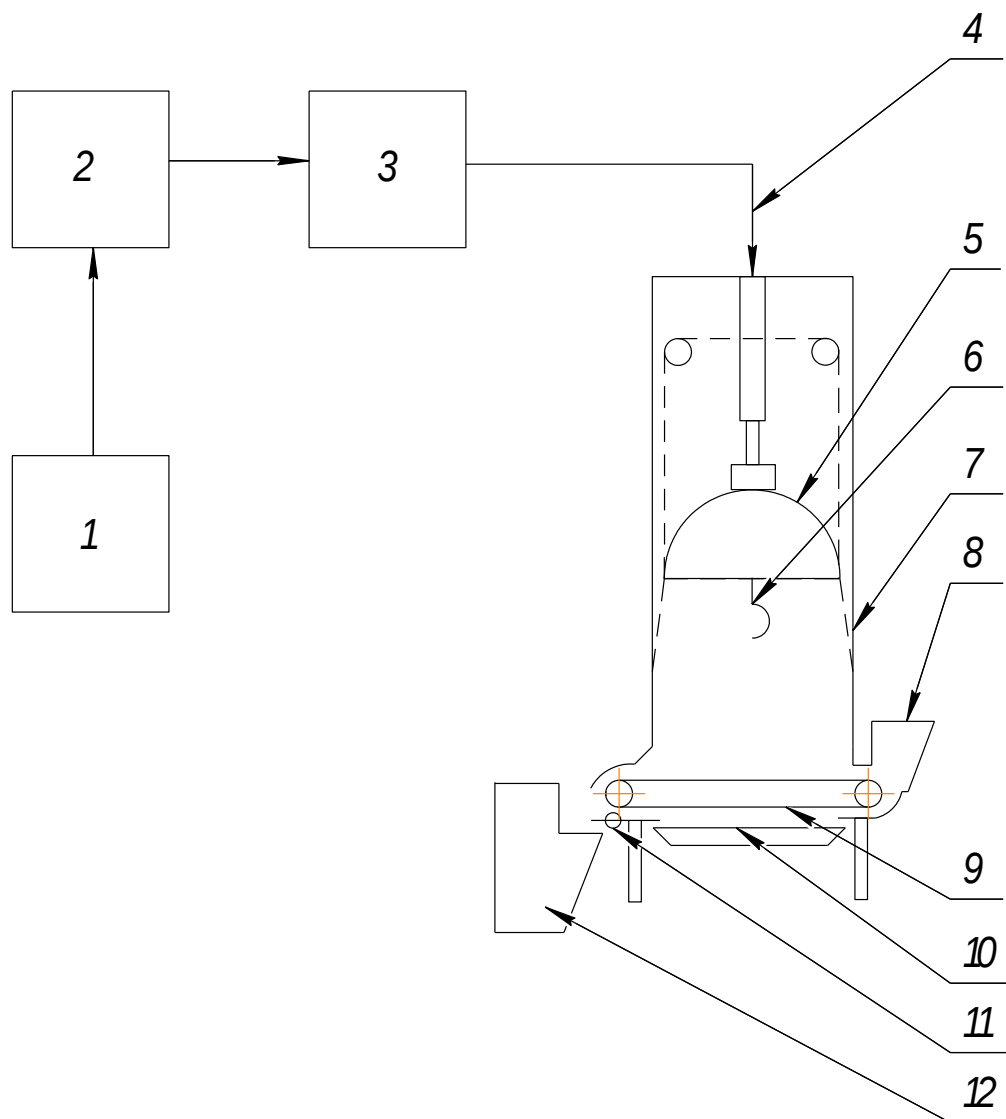


Рис. 5.7 Структурная схема установки для электромагнитной обработки семян тепличных культур:

- 1 – источник напряжения;
- 2 – блок стабилизаторов тока;
- 3 – генератор-сумматор мощности;
- 4 – волновод;
- 5 – фокусирующий отражатель;
- 6 – излучатель;
- 7 – экран;
- 8 – загрузочная камера;

- 9 – ленточный транспортёр;
- 10 – поддон;
- 11 – очистительная лента;
- 12 – приёмная камера.

В установке семенной материал поступает в резонаторную ёмкость из загрузочной камеры 8, а после обработки электромагнитным излучением сбрасывается в приёмную камеру 12 с ленточного транспортёра 9. При этом происходит очистка ленточного транспортёра от прилипших семян с помощью очистительной линии 11 в поддон 10.

Для ленточного транспортера используется фторопласт-4 с характеристиками: относительная диэлектрическая проницаемость – 1,9...2,2, тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 3,0 ГГц - $(2...3) \times 10^{-4}$, при электрической прочности 40 кВ/мм.

Камера обработки закрыта металлическим экраном 13 из алюминия имеющего проводимость $3,72 \times 10^7$ См/м, магнитную проницаемость $4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м, поверхностное сопротивление $3,26 \times 10^{-2}$ Ом и глубину проникновения (скин - эффект) $0,0826/\sqrt{f}$ м.

Максимальное количество обрабатываемого семенного материала 20 кг/час. Установленная мощность установки 50 Вт.

Технические характеристики установки для предпосевной обработки семян тепличных культур:

- диапазон рабочих частот 37-38 ГГц;
- кратковременная нестабильность частоты 10^{-7} ;
- выходная мощность 0,1...4,5 Вт;
- крутизна электронной перестройки 40 мГц/мА
- масса 5 кг.

5.3. Производственная проверка технических средств и режимов низкоэнергетической электромагнитной активации семян.

5.3.1. Оценка эффективности низкоэнергетической электромагнитной технологии активации семян тепличных культур

Основные регулируемые микроклиматические факторы (температура, влажность питательного субстрата, освещенность и др.) в защищенном грунте находятся под сильным влиянием природно-климатических параметров внешней среды. В процессе роста и развития тепличных растений природно-климатические параметры внешней среды усиливают или снижают уровни факторов микроклимата в теплице и влияют на процессы жизнедеятельности тепличных овощных растений, конечную величину урожая и качество продукции. Под действием внешних природно-физических факторов в микроклимате защищенного грунта возникают временные (короткие и продолжительные) стрессовые ситуации, приводящие к задержке роста и развития, угнетению или гибели растений. Кроме того, металлические конструкции теплицы экранируют растения от атмосферного электричества, что приводит к нарушению процессов их функциональной жизнедеятельности. Таким образом, имеет место периодическое возникновение неблагоприятных факторов, различных стрессовых ситуаций при выращивании тепличных растений в условиях защищенного грунта. Усиление адаптации тепличных растений к возникающим неблагоприятным факторам, условиям стресса снижает потери их продуктивности, что подтверждает целесообразность применения низкоэнергетической электромагнитной технологии активации семян, улучшающей посевные качества семян и повышающие адаптационные способности растений, выращиваемых из обработанных семян.

Практическая реализация низкоэнергетической электромагнитной активации семян и исследование выращенных из них растений в условиях тепличных хозяйств осуществлялась по традиционной методике

[32]. Испытания проводились на протяжении 2002-2006 г.г. в Гродненской овощной фабрике, г. Минск, плодоовощном хозяйстве "Южная сельскохозяйственная компания", г. Николаев, тепличном комплексе ООО "Оксамит" Николаевской области Октябрьского района и фермерском хозяйстве "Фермерское хозяйство Мехтиев Ш.А." Мелитопольского района Запорожской области.

Результативность данной обработки семян показана на рис 5.8-5.10.



Рис. 5.8 Дружность прорастания семян огурца после обработки НЭ ЭМП.



Рис. 5.9 Рассада огурца (слева) из семян, обработанных по низкоэнергетической электромагнитной технологии и (справа) без обработки.



Рис. 5.10 Полевой опыт по оценке эффективности низкоэнергетической электромагнитной обработки семян томата. (слева - опыт, справа - контроль).

Активация семян по разработанной технологии приводит к повышению их всхожести на 15- 21%, энергии роста - на 19 - 27%, сохранению растений за вегетацию- на 12%. Урожайность приведена в таблица 5.1-5.2.

Таблица 5.1.

Результаты внедрения технологий и технических средств низкоэнергетической электромагнитной активации семян томата (гибрид Rianto)

Варианты		Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Выход продукции за период вегетации
Опыт	кг/м ²	0,1	4,0	5,0	5,2	3,4	2,0	0,7	20,4±1,1
	кг	82	3684	4570	4784	3132	1812	608	18672
Кон- троль	кг/м ²	0,1	3,4	4,3	4,2	2,9	1,7	0,5	17,1±1,0
	кг	70	3160	3924	3918	2664	1520	411	15677
% к конт.		117,1	116,6	116,5	122,1	117,6	119,2	144,1	119,1

Таблица 5.2

Результаты внедрения технологий и технических средств низкоэнергетической электромагнитной активации семян огурца (гибрид Эстафета).

Варианты		май	июнь	июль	август	Выход продукции за период вегетации
Опыт	кг/м ²	5,0	8,9	3,4	0,1	17,4±1,3
	кг	4608	8209	3171	131	16119
Контроль	кг/м ²	4,2	7,7	2,8	0,1	14,8±1,1
	кг	3902	7118	2532	116	13668
% к контролю.		118,1	115,3	125,3	113,0	117,6

Эффективность воздействия низкоэнергетического электромагнитного излучения высокочастотного диапазона при обработке тепличных культур подтверждается повышением урожайности на 25 - 30%.

Основные результаты производственных испытаний приведены в таблицах 5.3-5.4.

Таблица 5.3

Основные результаты производственных испытаний низкоэнергетической электромагнитной технологии активации семян на их полевую всхожесть.

Культура, сорт	Полевая всхожесть, %	Всхожесть в контроле, %
Капуста “Подарок”	89	61
Морковь “Карлена”	75	44
Лук – чернушка “Голландский желтый”	71	55
Томаты “Rinato”	95,5	78
Огурец “ТСХ 575”	98	79,5

Таблица 5.4

Основные результаты применения низкоэнергетической электромагнитной технологии активации семян тепличных культур

Культура, сорт	Повышение урожайности на:	Год и место использования
Огурец “ТСХ 575”, Корольок, Амазонка, Гладиатор, Эстафета, Concerto	30 -35 кг/м ²	2002-2006 гг. фермерское хозяйство “Мехтиев Ш.А”, тепличном комплексе ООО "Оксамит"
Томаты гибрид “Rinato”, Фараон, Мастер, Кострома, Recento	50 - 70 кг/м ²	2002-2006 гг. фермерское хозяйство “Мехтиев Ш.А”, тепличном комплексе ООО "Оксамит"
Морковь Карлена, Найтская	15 кг/м ²	2004-2006 гг. Фермерское хозяйство “Мехтиев Ш.А.”

Сравнительная характеристика удельных затрат электроэнергии на обработку семян по технологиям, использующие различные физические факторы приведена на рисунке 5.8.

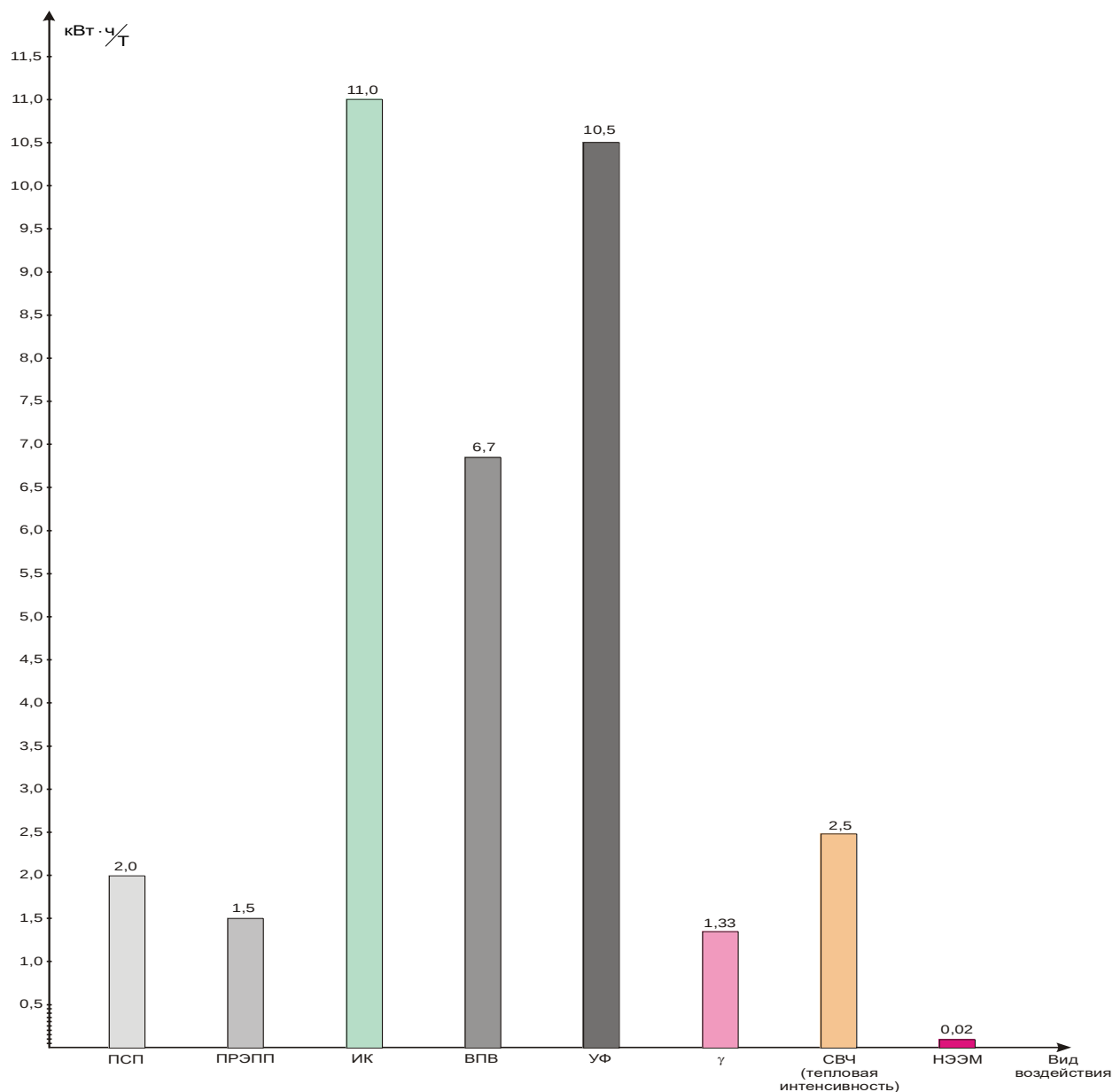


Рис. 5.8. Сравнительная характеристика удельных энергозатрат на обработку семенного материала при различных электротехнологиях.

Из данной диаграммы видно, что удельные затраты на обработку 1 т семян по низкоэнергетической электромагнитной технологии на два-три порядка ниже существующих.

Данный вид воздействия влияет на внутриклеточные процессы в растительных системах - на: окислительные и ферментативные реакции, а также на процессы, протекающие на молекулярном уровне - структуру макромолекул белка. Суммарный эффект от обработки выражается в улучшении посевных качеств семян, их всхожести, энергии роста. Обработанные растения огурца и томата вызвали улучшение количественных показателей повышения урожайности и снижение нормы высева, сокращение сроков созревания за счет максимальной мобилизации потенциальной продуктивности растений и подтвердили эффективность применения новой низкоэнергетической технологии активации семян тепличных культур.

5.3.2 Техничко-экономические показатели эффективности внедрения разработанной технологии.

Проведенные исследования позволили получить конкретные данные, подтверждающие технико-экономическую эффективность низкоэнергетической электромагнитной активации семян тепличных культур. Причем, воздействие эффективно не только как стимулирующий, но и как корректирующий фактор на развитие растительного биологического объекта в целом.

Оценка экономической эффективности от внедрения новой технологии определялась критерием увеличения урожайности и сокращением нормы высева. За сравниваемый базовый вариант принималась обработка растительного организма химическими стимуляторами роста, а за контрольный - разработанная технология

Расчет проводился по экономическим затратам и различиям в урожайности и посевных нормах культуры томата.

Сравнение двух вариантов проводилось по затратам на обработку 1га посевной площади.

$$Z_o = Z_c + Z_m + Z_a + Z_z, \text{ грн./га,}$$

где Z_o - затраты на обработку 1 га площади, грн.

Z_c - затраты на приобретение семян для засева 1 га, грн.

Z_m - затраты на технологию обработки, грн.

Z_a - затраты на амортизацию установки, грн.

Z_z - затраты на заработную плату, грн.

$$Z_m = Z_{\text{э}} + Z_{\text{ст}}, \text{ грн.}$$

где $Z_{\text{э}}$ - затраты на электроэнергию, потребляемую установкой, грн.

$Z_{\text{ст}}$ - затраты на приобретение химических стимуляторов, грн.

$$Z_a = A_o = K_v \cdot I / T,$$

где T - срок эксплуатации установки, лет

Капитальные вложения:

$$K_v = K_y \cdot C_o + M + H_p,$$

где K_y - коэффициент удорожания (10.00)

C_o - оптовая цена оборудования, грн.

M - затраты на монтаж (25% от оптовой цены)

H_p - затраты на транспортировку, упаковку, временное хранение (10-12% от оптовой цены)

Затраты на заработную плату:

$$Z_z = \sum T_{i\text{н}} \cdot Ч_{\text{с}} + Д_{\text{оп}} + Н_{\text{ес}},$$

где T_i - время работы обслуживающего персонала, час

$Чс$ - часовая ставка (7,5), грн./час

$Доп$ - дополнительная оплата (премии, доплаты за вредность и т.д., составляет 40% от основной), грн.

$Нсс$ - начисление на социальное страхование, грн.

$$Нсс = Ксс \cdot (Осм + Доп),$$

$$Осм = \sum T_i \cdot Чс,$$

где $Ксс$ - коэффициент для хозяйств (0,044)

В результате сравнительного экономического анализа получено, что затраты на обработку одного гектара посевных площадей по инновационной низкоэнергетической технологии снижаются в 6 раз, по сравнению с базовой.

Среднегодовой экономический эффект:

$$Эт = (P_{гн} + Z_{гн}) / (T_n \cdot (Kp + E_n)) - (P_{гб} + Z_{гб}) / (T_b \cdot (Kp + E_n)),$$

где $P_{гн}$ и $P_{гб}$ - неизменные по годам стоимостные оценки по результатам от мероприятий НТП (основные + сопутствующие результаты, производственный эффект базового и предлагаемого вариантов);

$Z_{гн}$ и $Z_{гб}$ - затраты на реализацию мероприятий НТП в двух вариантах.

$$Z_{гн} = И_n + (Kp + E_n) \cdot К_n, Z_{гб} = И_b + (Kp + E_n) \cdot К_b,$$

где $И_n$ и $И_b$ - годовые текущие издержки при использовании продукции без амортизации на реновацию.

K_n и K_b - единовременные затраты на использование продукции.

K_p - коэффициент реновации основных фондов.

E_n - нормативный коэффициент приведения разноименных затрат и результатов.

T_n и T_b - срок службы нового и базового оборудования (3 года)

Таблица 5.5.

Технико-экономические показатели эффективности
низкоэнергетической электромагнитной активации семян

Наименование показателей	Обработка посевного материала и растений			
	Базовый вариант		Новая технология	
	Томаты	Огурцы	Томаты	Огурцы
Капитальные вложения, грн./га	1767,08	3684,55	2347,65	4895,10
Затраты труда на обработку, чел./час.	0,34	0,35	0,07	0,07
Текущие издержки без учета отчислений на реновацию, грн./га	554,76	1156,12	935,23	1949,72
Затраты на реализацию технологии, принятые с учетом срока службы оборудования, грн./год	3344,65	6661,31	1741,25	3630,37
Среднегодовой экономический эффект, грн./га	-	-	984,32	2351,15
Среднегодовой экономический эффект, грн/га.	-	-	984,32	2351,15

В результате расчета получено, что годовой экономический эффект от внедрения инновационного способа обработки составил около 10000 тысяч гривен. Срок окупаемости капитальных вложений на расчетный период составил 0,67 года.

Таким образом, применение низкоэнергетической технологии обработки семян тепличных культур перед посевом, экономически целесообразно. Использование данной технологии позволяет отказаться от химических способов обработки, что экологически выгодно, и снизить затраты энергии и материальных средств при улучшении качественных и количественных характеристик продукции овощеводства.

Технико-экономические расчеты показали, что экономическая эффективность от использования новой электротехнологии активации семян с площади 2000 м² составляет 11-12 тыс. грн. за год (Акты внедрения, Приложение С).

Исследования показывают, что данный вид электромагнитного излучения является наименее энергоемким из существующих излучений, применяемых на практике в качестве стимулирующих. С точки зрения безопасности применения низкоэнергетического стимулирующего воздействия высокочастотного диапазона по отношению к персоналу, обслуживающему установки данного типа и воздействию на окружающую среду, следует отметить что интенсивность ЭМИ, используемого в качестве главного фактора воздействия на семена составляет 2 мВт/см². Согласно основным гигиеническим требованиям, эта величина менее пороговой в 10 раз, что позволяет утверждать о безопасности данного вида воздействия для людей, животных и окружающей природы

Выводы к разделу

1. Для предпосевной обработки семян тепличных культур низкоэнергетическим ЭМП следует использовать установку с

параметрами: диапазон частот 37-38 ГГц; выходная мощность 0,1-4,5 Вт; относительная нестабильность частоты 10^{-7} ; производительность до 20кг/час.

2. Получение прибыли 11-12 тыс. грн. в год в теплицах площадью 2000 м² возможно с применением для предпосевной обработки семян низкоэнергетических ЭМП КВЧ диапазона.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Воздействие электромагнитного поля на семена с целью его активации является не до конца изученным. В работе исследована проблема активации семян тепличных культур под воздействием электромагнитных полей.

2. На основе математической модели получены закономерности резонансного поглощения электромагнитного поля в семенах тепличных культур, позволяющие определять его частотный диапазон, обеспечивающий активацию семян. Для тепличных культур он составляет 37...38 ГГц.

3. На основании теоретических исследований по влиянию низкоэнергетических электромагнитных полей на мембранный транспорт веществ в растениях, получены зависимости изменения ионного тока в клетках семян, позволяющие находить плотность потока мощности и экспозицию действующего электромагнитного поля. Для тепличных культур плотность потока мощности составила 10...15 мкВт/см², экспозиция – 10-15 минут.

4. Предложено, для разработки генератора на лавинопролетных диодах с выходной мощностью 4-5 Вт в диапазоне частот 36-39 ГГц, использовать радиально-волноводный резонатор с параметрами: радиальная высота линии $h = 0,4$ мм; отношение диаметра диска к ширине волновода $d/a = 0,52$.

5. Для получения относительной нестабильности частоты генератора на лавинопролетных диодах в пределах $10^{-6} \dots 10^{-7}$, предложен внешний стабилизирующий резонатор с собственной добротностью - $(2 \dots 5) \cdot 10^3$, внешней - 10^3 .

6. Для получения мощности 4-5Вт генератора на лавинопролетных диодах, в диапазоне частот 36-39 ГГц, предложены в качестве сумматора мощности открытые бочкообразные резонаторы с

параметрами: радиус резонатора в средней плоскости - 20 мм, в меридиальном сечении - 40 мм; возбуждаемые моды колебаний $m = 5$, $n = 3$, $q = 1$ (частота 37,5 ГГц) и $m = 11$, $n = 1$, $q = 1$ (частота 37,3 ГГц).

7. Установлено, что в сумматоре мощности, на основе открытых бочкообразных резонаторов (добротность до $70 \cdot 10^3$), необходимо располагать в пучностях электромагнитного поля до 10 лавиннопролетных диодов.

8. Для определения оптимальных технологических параметров низкоэнергетического электромагнитного поля, которые обеспечивают повышение урожайности тепличных культур, предложен метод биоэлектрических потенциалов.

9. Установлены параметры, обеспечивающие стимуляцию жизнедеятельности семян огурцов: частота 37,25 ГГц; плотность потока мощности 12 мк Вт/см²; нестабильность частоты 10^{-6} ; экспозиция 8,5 мин.

10. Установлены параметры, обеспечивающие стимуляцию жизнедеятельности семян томатов: частота - 37,705 ГГц; плотность потока мощности - 7,5 мк Вт/см², нестабильность частоты - 10^{-6} ; экспозиция - 8,5 мин.

11. Экспериментально установлено, что предпосевная обработка семян огурцов и томатов низкоэнергетическими электромагнитными полями крайневисокочастотного диапазона увеличивает прорастание на 16-20%; энергию роста на 13-15%; урожайность на 25...40% по сравнению с контролем.

ПРОТОКОЛ

о совместной научно-исследовательской работе Харьковского аграрного университета им. В.В.Докучаева, Таврийского агротехнологического университета и Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П.Василенко

I. Цель исследования

Изучение действий низкоэнергетических электромагнитных полей крайневысокой частоты на первичные клетки и целого организма тепличных культур с целью повышения их продуктивности.

II. Объект исследования

Семена огурца «ТСХА-575» и томата «Rinato».

III. Аппаратура, примененная при исследованиях

В качестве источников КВЧ излучения для предпосевной обработки семян огурцов и томатов применялись генераторы: ГЧ-141; ГЧ-142 и высоковольтный генератор в твердотельном исполнении, разработанный доц., к.т.н. Никифоровой Л.Е.

IV. Основные результаты исследования

1. Хромосомные aberrации.

Обработка семян огурцов и томатов проводилась ЭМП в диапазоне частот 36-39 ГГц, с экспозицией 5 мин., 8,5 мин., 12 мин. И плотностью потока мощности $5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$, $11,8 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$, $15 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ для семян огурцов и для семян томатов $5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$, $7,5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ и $10 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$.

Хромосомные aberrации были максимальными для семян огурцов на частоте 37,25 ГГц и составили $10,6 \pm 0,01\%$ для экспозиции 8,5 мин. и плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$. Хромосомные aberrации в контроле составили $2,1 \pm 0,01\%$.

Для семян томата хромосомные aberrации были максимальными на частоте 37,7 05 ГГц и составили $11,3 \pm 0,01\%$ для экспозиции 8,5 мин и плотности потока мощности $7,5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$. В контроле хромосомные aberrации составили $2,6 \pm 0,01\%$.

2. Полевая всхожесть.

Семена огурцов облучались на частотах 36,25 ГГц, 37,25 ГГц, 38,25 ГГц. При проведении опыта было изучено 55 вариантов. Для каждого варианта обрабатывались ЭМП по 100 семян. Посев проводили через два дня после облучения ЭМП семян.

Опыт проводился на учебно-опытном участке. Контролем служили необработанные ЭМП семена. Всхожесть семян огурцов была максимальной на частоте 37,35 ГГц и составила 89% для экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности $11,8 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$. Всхожесть семян в контроле

составила 65%. Всхожесть семян томатов была максимальной на частоте 37,705 ГГц и составила 88%) для экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности $7,5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$. В контроле всхожесть составила 67%.

4. Содержание хлорофилла «а» в листьях огурцов и томатов.

При исследованиях на содержание хлорофилла в листьях огурцов было установлено, что обработка семян огурцов ЭМП на частоте 37,25 ГГц позволило увеличить хлорофилла на $0,98 \frac{\text{мг}}{\text{г}}$ по отношению к контролю для экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности $11,8 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$.

Увеличение хлорофилла в листьях томата по отношению к контролю составило почти $1 \frac{\text{мг}}{\text{г}}$ при обработке семян ЭМП на частоте 37,705 ГГц, экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности $7,5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$.

4. Содержание азота и фосфора в зелёной массе огурцов и томатов. Обработка семян огурцов ЭМП на частоте 37,25 ГГц, экспозицией 8,5 мин. и плотностью потока мощности $11,8 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$ приводит к увеличению азота в листьях огурцов на 1,8% по сравнению с контролем. В контроле содержание азота составило 3,9%. Увеличение фосфора в проростках томатов составило 2%, по отношению к контролю, полученному при облучении семян томатов ЭМП на частоте 37,705 ГГц, экспозиции 8,5 мин. и плотности потока мощности $7,5 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$. В контроле содержание фосфора составило 7%.

5. Урожайность огурцов и томатов.

Предпосевная обработка семян огурцов и томатов ЭМП с оптимальными параметрами приводит к увеличению урожайности на 20-30%) по отношению к контролю.

V. Предложения по дальнейшему внедрению результатов работы

Для предпосевной обработки семян огурцов и томатов следует применять ЭМП с установленными оптимальными биотропными параметрами, что позволит увеличить урожайность и качество указанных культур.

От ХНУУ им. В.В. Докучаева

Зав. каф. механизации и электрификации, проф. *В.Ф.* В.Ф. Пашенко

От ХНТУСХ им. Петра Василенко, проф. *А.С.* А.С. Черепнёв

От ТГАУ, доц. *Л.Е.*

Л.Е. Никифорова



Приложение Б

Результаты статистической обработки экспериментов с семенами огурца «ТСХА-575».

Полином, используемый для описания процесса в данном плане, имеет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (\text{Б.1})$$

где Y – выходной параметр;

x_i – факторы, определяющие протекание процесса;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – эмпирически определяемые коэффициенты.

Таблица Б.1

Матрица планирования эксперимента

Уровни опытных точек	Номер опыта	Факторы		
		x_1	x_2	x_3
Ядро плана	1.	-	-	-
	2.	+	-	-
	3.	-	+	-
	4.	+	+	-
	5.	-	-	+
	6.	+	-	+
	7.	-	+	+
	8.	+	+	+
Звездные точки	9.	$-\alpha$	0	0
	10.	$+\alpha$	0	0
	11.	0	$-\alpha$	0
	12.	0	$+\alpha$	0
	13.	0	0	$-\alpha$
	14.	0	0	$+\alpha$
Центр плана	15.	0	0	0
	16.	0	0	0
	17.	0	0	0
	18.	0	0	0
	19.	0	0	0
	20.	0	0	0

Расчётная матрица для $K=3$ приведена в табл. Б2. расчёт коэффициентов регрессии и расчётная матрица для определения построчной остаточной суммы квадратов и дисперсии адекватности приведены в табл. Б.3, Б.4, Б.5.

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_1	y_2	$\bar{y}$
1.	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	21,9 8	21,7 8	21,8 8
2.	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	17,7 4	17,7 6	17,7 5
3.	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	17,7	17,9	17,8
4.	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	20,3	20,5	20,4
5.	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	17,3 9	17,4 1	17,4
6.	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	26,0	26,0	26,0
7.	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	19,6 2	19,6 6	19,6 4
8.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	33,3 9	33,6 5	33,5 2
9.	+	- 1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	○	19,5 5	19,5 7	19,5 6
10.	+	1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	○	28,1 5	28,1 9	28,1 7
11.	+	○	- 1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	16,6 2	16,6 4	16,6 3
12.	+	○	1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	19,6 9	19,8 9	19,7 9
13.	+	○	○	- 1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	18,6 6	18,7	18,6 8
14.	+	○	○	1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	26,2 1	26,2 3	26,2 2
15.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16,9	16,9	16,9
16.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16,5	16,9	16,7
17.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16,8 9	16,7 1	16,8
18.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16,8 1	16,7 9	16,9

20.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	16,8	0,0072
Σ	22,713	13,645	31,413	12,01	24,01	11,79	309,418	277,422	301,411		0,22

Таблица Б.4

Расчет коэффициентов регрессии и проверка их значимости

№	Наименование величины	Расчетная формула	Расчетное значение
1	2	3	4
1.	Сумма квадратов построенных дисперсий []	$S_n^2 = \frac{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2}{2}$	
2.	Сумма квадратов ошибок	$S_E = \sum_{n=1}^{N=20} S_n^2$	0,22
3.	Повторность опытов	γ	2
4.	Количество опытов	N	20
5.	Уровень значимости	α	0,05
6.	Расчетные значения критерия Кохрена	$G_P = \frac{S_n^2 \max}{S_E}$	0,154
7.	Табличное значение критерия Кохрена	$G_T \text{ при } \alpha=0,05; N=20; f=\gamma-1=1$	0,47
8.	Проверка воспроизводимости опытов	$G_P < G_T$	0,154 < 0,47
	Коэффициенты	$b_0 = \delta'_0 \sum_{n=1}^{N=20} \bar{y}_n - \delta''_0 \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{y}_n$ $\delta'_0 = 0,166388; \delta''_0 = 0,05679$	$b_0=16,8$
9.	Уравнения регрессии	$b_{ii} = b'_{ii} \sum_{n=4}^N x_{in}^2 \bar{y}_n + \delta'' \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{y}_n - \delta''' \sum_{n=1}^K \bar{y}_n;$ $\delta_{ii} = 0,0625; \delta''_{ii} = 0,006889; \delta'''_{ii} = 0,056791$	$b_{11}=2,5$ $b_{22}=0,5$ $b_{33}=2,0$
		$b_i = \delta_i \sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n; \delta_i = 0,073224$	$b_1=2,62$ $b_2=1,0$ $b_3=2,3$
		$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{y}_n; \delta_{ij} = 0,125$	$b_{12}=1,5$ $b_{13}=3,0$ $b_{23}=1,4$
10.	Дисперсия воспроизводимости	$S_y^2 = \frac{S_E}{N}$	0,011
11.	Дисперсия коэффициентов регрессии []	$S_{bo}^2 = \gamma_0 S_y^2; \gamma_0 = 0,1603$	0,0017
		$S_{bii}^2 = \gamma_{ii} S_y^2; \gamma_{ii} = 0,0625$	0,00068
		$S_{bij}^2 = \gamma_{ij} S_y^2; \gamma_{ij} = 0,125$	0,00137
		$S_{bi}^2 = \gamma_i S_y^2; \gamma_i = 0,0732$	0,0008
12.	Табличное значение Критерия Стьюдента	$t_P \text{ при } \begin{cases} d = 0,01 \\ f = N(r-1) \end{cases}$	2,7

Продолжение таблицы Б.4

1	2	3	4
13.	Условия значимости коэффициентов уравнения регрессии	$ b_0 \geq S_{b_0} \cdot t_p$	0,11
		$ b_i \geq S_{b_i} \cdot t_p$	0,07
		$ b_{ii} \geq S_{b_{ii}} \cdot t_p$	0,1
		$ b_{ij} \geq S_{b_{ij}} \cdot t_p$	0,076
14.	Остаточная сумма квадратов	$S_{обц}^2 = \sum_{n=1}^N \left(\bar{Y}_n - \hat{Y}_n \right)^2$	0,412
15.	Частота $f_{a\partial}$ []	$f_{a\partial} = N - \frac{(K+2) \cdot (K+1)}{2} - (N_0 - 1)$	5
16.	Остаточная сумма квадратов в центре плана	$S = \sum_{n=1}^{N_0} \left(\bar{Y}_{on} - \hat{Y}_{on} \right)^2$	0,06
17.	Ошибка опыта при рототабельном планировании	$S_0^2 = \frac{S}{N_0 - 1}$	0,012
18.	Разность дисперсий	$S_{обц} - S$	0,352
19.	Дисперсия адекватности	$S_{a\partial}^2 = \frac{S_{обц} - S}{f_{a\partial}}$	0,07
20.	Расчетное значение критерия Фишера	$F_p = \frac{S_{a\partial}^2}{S_0^2}$	1,17
21.	Табличное значение критерия Фишера	$F_{Тпри} \begin{cases} \alpha = 0,05; f_1 = N - g \\ f_2 = N(\gamma - 1) \end{cases}$	2,77
22.	Условие проверки адекватности модели	$F_p \leq F_T$	$1,17 \leq 2,77$

Матрица планирования эксперимента

[illegible]

Приложение В

Результаты статистической обработки экспериментов с семенами томата «Rinato».

Полином, используемый для описания процесса в данном плане, имеет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (B,1)$$

где Y – выходной параметр;

x_i – факторы, определяющие протекание процесса;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – эмпирически определяемые коэффициенты.

Таблица В.1

Матрица планирования эксперимента

Уровни опытных точек	Номер опыта	Факторы		
		x_1	x_2	x_3
Ядро плана	1.	-	-	-
	2.	+	-	-
	3.	-	+	-
	4.	+	+	-
	5.	-	-	+
	6.	+	-	+
	7.	-	+	+
	8.	+	+	+
Звездные точки	9.	$-\alpha$	0	0
	10.	$+\alpha$	0	0
	11.	0	$-\alpha$	0
	12.	0	$+\alpha$	0
	13.	0	0	$-\alpha$
	14.	0	0	$+\alpha$
Центр плана	15.	0	0	0
	16.	0	0	0
	17.	0	0	0
	18.	0	0	0
	19.	0	0	0
	20.	0	0	0

Расчётная матрица для $K=3$ приведена в табл. В.2. расчёт коэффициентов регрессии и расчётная матрица для определения построчной остаточной суммы квадратов и дисперсии адекватности приведены в табл. В.3, В.4, В.5.

Таблица В.2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_1	y_2	$\bar{y}$
1.	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	23,0 3	23,0 5	23,0 4
2.	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	20,6	20,6 6	20,6 3
3.	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	19,4 5	19,6 3	19,5 4
4.	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	23,1 3	23,1 5	23,1 4
5.	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	19,6 7	19,6 5	19,6 6
6.	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	27,2 5	27,2 7	27,2 6
7.	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	21,2 7	21,4 7	21,3 7
8.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	34,9 5	34,9 7	34,9 6
9.	+	- 1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	○	20,2 9	20,3 9	20,3 4
10.	+	1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	○	29,9 8	29,8 4	29,9 6
11.	+	○	- 1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	18,6 5	18,8 5	18,7 5
12.	+	○	1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	○	22,3 8	22,5 8	22,4 8
13.	+	○	○	- 1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	20,8 5	21,0 5	20,9 5
14.	+	○	○	1,68 2	○	○	○	○	○	2,82 9	28,3 1	28,1 1	28,2 1
15.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,7	19,5	19,6
16.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,4	19,4	19,4
17.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,2	19,6	19,4
18.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,9	19,5	19,7

19.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,5	19,7	19,6
20.	+	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,3	19,3	19,3

Таблица В.3

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$x_1 \bar{Y}_n$	$x_2 \bar{Y}_n$	$x_3 \bar{Y}_n$	$x_1 x_2 \bar{Y}_n$	$x_1 x_3 \bar{Y}_n$	$x_2 x_3 \bar{Y}_n$	$x_1^2 \bar{Y}_n$	$x_2^2 \bar{Y}_n$	$x_3^2 \bar{Y}_n$	$\bar{Y}_n$	S_n^2
1.	- 23,0 4	- 23,0 4	- 23,0 4	+23,0 4	+23,0 4	+23,0 4	+23,0 4	+23,0 4	23,04	23,04	0,000 2
2.	20,6 3	- 20,6 3	- 20,6 3	- 20,63	- 20,63	20,63	20,63	20,63	20,63	20,63	0,001 8
3.	- 19,5 4	19,5 4	- 19,5 4	- 19,54	19,54	- 19,54	19,54	19,54	19,54	19,54	0,016 2
4.	23,1 4	23,1 4	- 23,1 4	23,14	- 23,14	- 23,14	23,14	23,14	23,14	23,14	0,000 2
5.	- 19,6 6	- 19,6 6	19,6 6	19,66	- 19,66	- 19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	0,000 2
6.	- 27,2 6	- 27,2 6	27,2 6	- 27,26	27,26	- 27,26	27,26	27,26	27,26	27,26	0,000 2
7.	21,3 7	21,3 7	21,3 7	- 21,37	- 21,37	21,37	21,37	21,37	21,37	21,37	0,02
8.	34,9 6	34,9 6	34,9 6	34,96	34,96	34,96	34,96	34,96	34,96	34,96	0,000 2
9.	- 34,3 8	○	○	○	○	○	57,82	○	○	20,34	0,005
10.	50,2 2	○	○	○	○	○	84,47	○	○	29,96	0,000 8
11.	○	- 31,7	○	○	○	○	○	53,32	○	18,75	0,02
12.	○	37,6 4	○	○	○	○	○	63,31	○	22,48	0,02
13.	○	○	- 35,6 4	○	○	○	○	○	59,55	20,95	0,02

14.	○	○	47,2 8	○	○	○	○	○	79,52	28,21	0,02
15.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,6	0,02
16.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,4	0,0
17.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,4	0,0
18.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,7	0,02
19.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,6	0,02
20.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19,3	0,00
Σ	26,4 4	14,3 6	28,5 4	10,04	18,04	12,4	331,8 9	306,2 3	328,6 7	447,2 9	0,26

Таблица В.4

Расчет коэффициентов регрессии и проверка их значимости

№	Наименование величины	Расчетная формула	Расчетное значение
1	2	3	4
1.	Сумма квадратов построенных дисперсий []	$S_n^2 = \frac{(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)^2}{2}$	см. табл.3
2.	Сумма квадратов ошибок	$S_E = \sum_{n=1}^{N=20} S_n^2$	0,26
3.	Повторность опытов	γ	2
4.	Количество опытов	N	20
5.	Уровень значимости	α	0,05
6.	Расчетные значения критерия Кохрена	$G_P = \frac{S_n^2 \max}{S_E}$	0,3
7.	Табличное значение критерия Кохрена	$G_T \text{ при } \alpha=0,05; N=20; f=\gamma-1=1$	0,47
8.	Проверка воспроизводимости опытов	$G_P < G_T$	$0,3 < 0,47$
	Коэффициенты	$b_0 = \delta_0' \sum_{n=1}^{N=20} \bar{Y}_n - \delta_0'' \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{Y}_n$ $\delta_0' = 0,166388; \delta_0'' = 0,05679$	$b_0=19,5$
9.	Уравнения регрессии	$b_{ii} = b_{ii}' \sum_{n=4}^N x_{in}^2 \bar{Y}_n + \delta_{ii}'' \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{Y}_n - \delta_{ii}''' \sum_{n=1}^K \bar{Y}_n;$ $\delta_{ii}' = 0,0625; \delta_{ii}'' = 0,006889; \delta_{ii}''' = 0,056791$	$b_{11}=2,0$ $b_{22}=0,4$ $b_{33}=1,8$
		$b_i = \delta_i \sum_{n=1}^N x_{in} \bar{Y}_n; \delta_i = 0,073224$	$b_1=2,8$ $b_2=1,05$ $b_3=2,1$

		$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{Y}_n; \delta_{ij} = 0,125$	$b_{12}=1,5$ $b_{13}=2,5$ $b_{23}=1,3$
10.	Дисперсия воспроизводимости	$S_y^2 = \frac{S_E}{N}$	0,013
11.	Дисперсия коэффициентов регрессии []	$S_{bo}^2 = \gamma_0 S_y^2; \gamma_0 = 0,1603$	0,0021
		$S_{bii}^2 = \gamma_{ii} S_y^2; \gamma_{ii} = 0,0625$	0,0008
		$S_{bij}^2 = \gamma_{ij} S_y^2; \gamma_{ij} = 0,125$	0,0016
		$S_{bi}^2 = \gamma_i S_y^2; \gamma_i = 0,0732$	0,00095
12.	Табличное значение Критерия Стьюдента	$t_{P\ npu} \begin{cases} d = 0,01 \\ f = N(r-1) \end{cases}$	2,7

Продолжение таблицы В.4

1	2	3	4
13.	Условия значимости коэффициентов уравнения регрессии	$ b_0 \geq S_{b_0} \cdot t_p$	0,124
		$ b_i \geq S_{b_i} \cdot t_p$	0,076
		$ b_{ii} \geq S_{b_{ii}} \cdot t_p$	0,11
		$ b_{ij} \geq S_{b_{ij}} \cdot t_p$	0,083
14.	Остаточная сумма квадратов	$S_{общ}^2 = \sum_{n=1}^N \left(\bar{y}_n - \hat{y}_n \right)^2$	0,17
15.	Частота $f_{a\partial}$ []	$f_{a\partial} = N - \frac{(K+2) \cdot (K+1)}{2} - (N_0 - 1)$	5
16.	Остаточная сумма квадратов в центре плана	$S = \sum_{n=1}^{N_0} \left(\bar{y}_{on} - \hat{y}_{on} \right)^2$	0,06
17.	Ошибка опыта при рототабельном планировании	$S_0^2 = \frac{S}{N_0 - 1}$	0,012
18.	Разность дисперсий	$S_{общ} - S$	0,11
19.	Дисперсия адекватности	$S_{a\partial}^2 = \frac{S_{общ} - S}{f_{a\partial}}$	0,022
20.	Расчетное значение критерия Фишера	$F_P = \frac{S_{a\partial}^2}{S_0^2}$	1,83
21.	Табличное значение критерия Фишера	$F_T при \begin{cases} \alpha = 0,05; f_1 = N - g \\ f_2 = N(\gamma - 1) \end{cases}$	2,77
22.	Условие проверки адекватности модели	$F_P \leq F_T$	$1,83 \leq 2,77$

Матрица планирования эксперимента

[illegible]

Блок обработки электрофизической информации

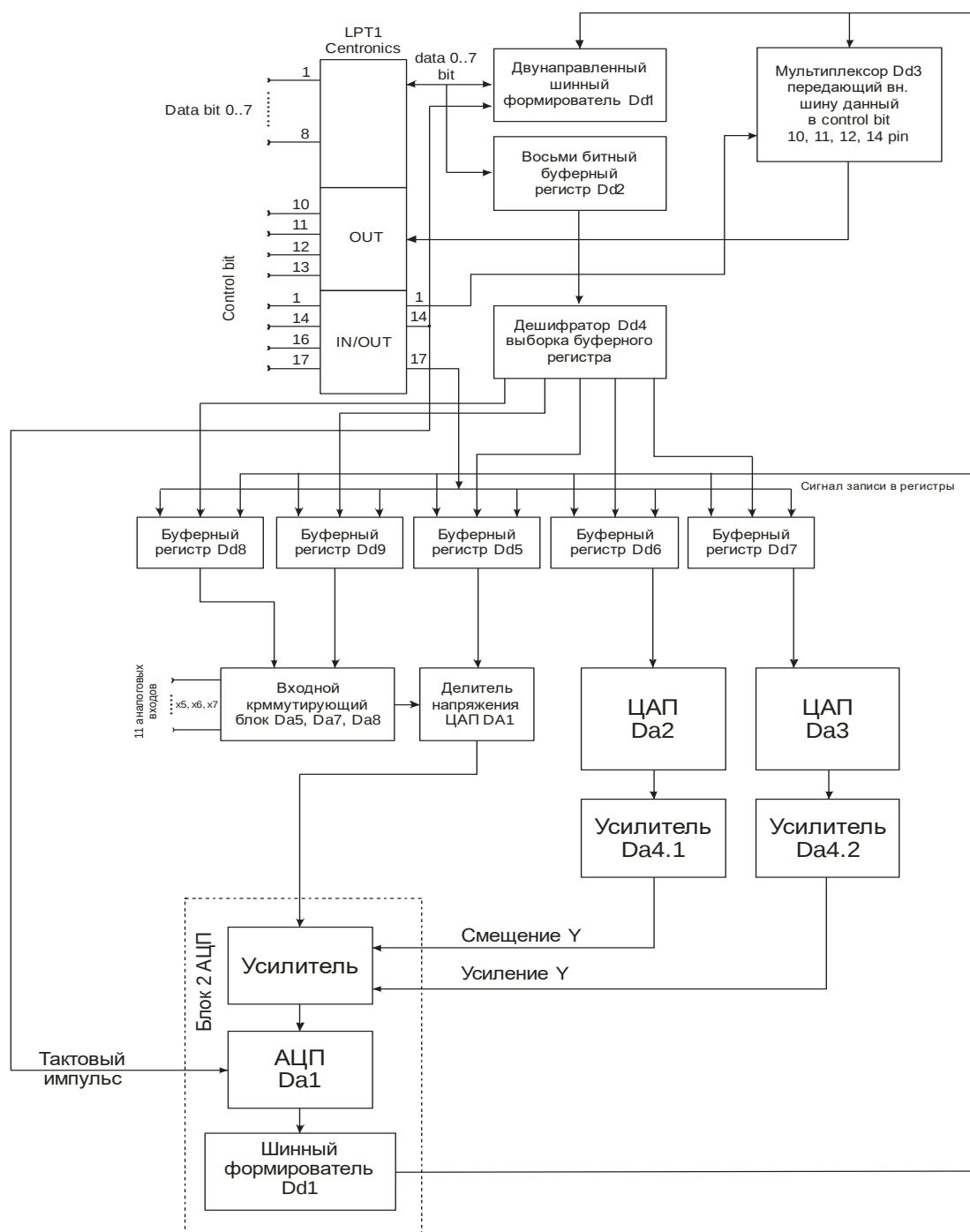


Рис.1. Структурная схема блока обработки электрофизической информации

Блок обработки электрофизической информации работает следующим образом. В блоке 1 управление осуществляется при помощи порта ввод/вывод LPT1. Через X1 блок 1 подключается к компьютеру

посредством порта LPT1, настроенного на какой – либо из режимов ввода – вывода. Микросхема DD1 741S245(555АП6) выполняет функцию буферизации шины данных порта на внутреннюю шину данных устройства. Микросхема DD2 741S374 (555ИР23) выполняет функцию защелки для микросхемы DD4 741S138 (555ИД7) дешифратора, что делает выборку необходимой микросхемы защелки DD5 DD10. Микросхема DD3 741S257 (555КП11) мультиплексора за два прохода передает шину данных устройства в порт LPT1 X1. Два прохода организованы с помощью канала управления А/В. Выбор канала А или В осуществляется при передаче младших четырех бит шины данных D0-D3, при этом подается сигнал низкого уровня, а при передаче старших четырех бит шины данных D4- D7 на каналА/В, подается сигнал высоко уровня. Микросборка RM1-RM2 предупреждает падение напряжения высокого уровня ниже рабочего диапазона. Микросхема DD5 выполняет функцию защелки информации с внутренней шины данных, при этом передавая управление на цифроаналоговый преобразователь DA1 572ПА1А. Микросхема DA1 влияет на уровень сигнала, поступающего от одного из каналов группы микросхем коммутации DA5, DA7-DA9 590КН5.

В блоке 2 сигнал, проходя через истоковый повторитель VT1, поступает на усилительный каскад(коэффициент усиления равен 10) на транзисторе. Режим каскада выбран таким образом, чтобы входной двуполярный сигнал был сдвинут в область отрицательных напряжений, необходимых для работы АЦП DA1. В связи с тем, что входная емкость последнего составляет 300 пФ, то между усилителем и АЦП включен мощный эмиттерный повторитель на транзисторе VT3. При помощи ЦАП DA2 572 ПА1А блока 1 регулируется сдвиг рабочей точки транзистора VT1 и тем самым регулируется постоянный сдвиг на эмиттере транзистора VT3. Резистором RP1 можно осуществлять подстройку рабочей точки. При перегрузке блока, транзистор VT2 входит в режим ограничения и сигнал на входе АЦП не выходит из диапазона –4..+1В. При

помощи ЦАП DA2 572 ПА1А блока 1 осуществляется регулирование опорного напряжения для АЦП, который формируется делителем на резисторе RP2,R10, эмиттерном повторителе на транзисторе VT4 и изменяется в пределах от -1 до -3 В. Оцифрованная информация от АЦП с шины данных подается на буферную микросхему DD1 555 АП6. Тактирование микросхемы осуществляется при записи в регистр дешифрации блока 1 DD2 сигналом с порта 14P₁ и передается в блок 2. Данное устройство обеспечит возможность подключения до 12 измерительных преобразователей, измеряющих параметры физиологического состояния растительных биосистем, в том и биопотенциалов; после чего получения информация, согласно вышеописанной схем, обрабатывается согласно разработанной программы на ПК.

Структура программы для сбора информации о состоянии растения, выросшего из обработанных семян по низкоэнергетической электромагнитной технологии приведена в таблице 3.1.

Таблица 3. 1

Структура программного обеспечения блока обработки электрофизической информации

	Название подпрограммы	Цель программы
1	temhra.exe	Сбор данных по температуре листа растения. Преобразование натуральной величины с учетом статических и динамических характеристик измерительных преобразователей
2	voda.exe	Сбор данных интенсивности водопоглощению листом. Преобразование натуральной величины с учетом статических и динамических характеристик измерительных преобразователей
3	geom.exe	Сбор данных по диаметру стебля растения. Преобразование натуральной величины с учетом статических и динамических характеристик

	Название подпрограммы	Цель программы
		измерительных преобразователей
4	skorost.exe	Сбор данных по темпу скорости роста растения. Преобразование натуральной величины с учетом статических и динамических характеристик измерительных преобразователей
5	sqv.exe	Сбор данных по площади листовой поверхности растения. Преобразование натуральной величины с учетом статических и динамических характеристик измерительных преобразователей
6	bio.exe	Сбор данных по уровню биопотенциала растения. Преобразование натуральной величины с учетом статических и динамических характеристик измерительных преобразователей
7	Baza.dbf	База данных
8	filtr.hub	Фильтрация случайных выбросов по Хьюберту
9	filtr.calm	Фильтрация помех в измерительном канале (фильтр Кальмана)
10	spravka.hlp	Справочный файл для работы с программным продуктом
11	matem.disp	Оценка математического ожидания и дисперсия
12	sign.spektr	Оценка спектральной плотности измеряемых сигналов
13	korel.kor	Оценка корреляционной функции



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор РУАП «Гродненская овощная фабрика»

Г.А. Федосевич

03 2003г.

АКТ

**о результатах выполненных работ
по предпосевной активации семян томатов и огурцов**

Мы, нижеподписавшиеся начальник тепличного комбината «Гродненская овощная фабрика» Шанчук И.И., к.ф.м.н. Карпович В.А. «Унитехпром БГУ», академик УААН, Мартыненко И.И., «НАУ», к.т.н., доц. каф. «АСП» ТГТА, Никифорова Л.Е., составили настоящий акт о том, что в 2003г. в тепличном комбинате «Гродненская овощная фабрика» засевались семена томатов «RAISSA» (1500 шт.) и семена огурцов сортов «Deltastar» (1500 шт.) и «Королек» (5000 шт.), обработанные низкочастотными электромагнитными полями на резонансных частотах.

Применение данной обработки повысило энергию прорастания семян, что позволило получить 100% всхожесть растений, стимулировало их рост во всех фазах развития. Увеличило фотосинтезирующий аппарат растений. Способствовало более быстрому развитию растений.

Применение данной технологии обработки семян томатов позволило получить урожайность - 36,8 кг/м² (на необработанных 31,2 кг/м²), огурцов «Deltastar» - 30,8 кг/м² (необработанные - 29,1 кг/м²), «Королек» - 23,5 кг/м² (необработанные - 20,9 кг/м²).

От «Гродненской овощной фабрики»

Карпович В.А.

Мартыненко И.И.

Никифорова Л.Е.

Шанчук И.И.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор фермерского х-ва
Мехтисв Ш.А. Мехтисв
 "14" 03 2004 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Гомон С.Н.
 "9" 03 2004 г.



А К Т

Мы, нижеподписавшиеся, акад. УААН Мартыненко И.И.(НАУ), д.б.н.
Фунтикова Л.А.(объединение Биолан) доц. Никифорова Л.Е., инж. Гомон
С.Н., асс. Адамова С.В. (ТДАТА), директор "фермерского хозяйства
Мехтисв Ш.А." Мехтисв Ш.А. Мелитопольского района Запорожской
области

составили настоящий акт о том, что за период с 2003- 2005 в "фермерском
хозяйстве Мехтисв Ш.А" Мелитопольского района Запорожской области
 проведена предпосевная обработка семян огурца (ТСХА – 575) и томата
 (гибрид Rianto) низкоэнергетическим электромагнитным полем на частоте
 соответственно 37,25 ГГц и 37,705 ГГц, при плотности потока мощности 1,9
 мВт/см² экспозицией 10 сек в режиме импульсной генерации.

Производственный эксперимент показал, что улучшились посевные качества
 семян : всхожесть на 15 – 20%, сила роста растений на 19 – 27%.

Сохранность растений за вегетацию возросла (по сравнению с контрольной)
 на 10 – 14%. Урожайность повысилась на 20 – 25%.

<i>И.И. Мартыненко</i>	И.И. Мартыненко
<i>Л.А. Фунтикова</i>	Л.А. Фунтикова
<i>Л.Е. Никифорова</i>	Л.Е. Никифорова
<i>С.Н. Гомон</i>	С.Н. Гомон
<i>С.В. Адамова</i>	С.В. Адамова
<i>Ш.А. Мехтисв</i>	Ш.А. Мехтисв
<i>М. В. Чапник</i>	М. В. Чапник

Утверждаю:
Директор ООО «Оксамит»


Крымчаков И.К.
 03.03.2005 г.

Утверждаю:
Ректор НАУ


академ. Мельничук Д.А.
 03.03.2005 г.

АКТ

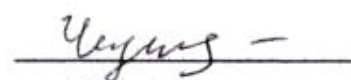
Мы нижеподписавшиеся, в лице акад. УААН Мартыненко И.И.; доц. Никифоровной Л.Е. и ТГАТА в лице ст. преп. Лободы А.И. и асс. Адамовой С.В. с одной стороны, и представители плодовоовощеводческого хозяйства ООО «Оксамит» в лице гл. агронома Чернова О.В., бриг. Станчо В.П. с другой стороны, составили настоящий акт в том, что за период с 2002 г. по 2005 г. в тепличном хозяйстве внедрены результаты нучно исследовательской работы «низко энергетические электромагнитные технологии активации семян и тепличных культур».

В результате внедрения получен фактический годовой экономический эффект в размере 5 440 грн. с пл. 1000 м² растений огурца «Эстафета» и 6580 грн. с пл. 1000 м² растений томатов «Ринато».

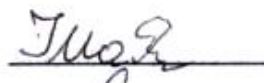
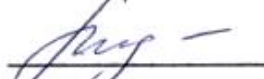
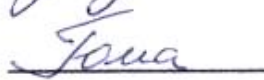
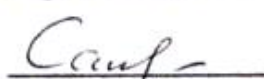
По состоянию на 10 марта 2005 г. с пл. 2000 м² – 12 020 грн.

Урожайность растений огурца «Эстафета» повысилась на 21,25% растений томатов на 23,85% от использования низко энергетической электромагнитной технологии активации овощных культур (за счет интенсификации жизнедеятельности растительных биообъектов путем обработки семян НЭ ЭМИ микроволнового диапазона при плотности потока мощности 1,6 – 2,0 мВт/см.² импульсной генерации с экспозицией 10 сек. и вегетирующих растений при плотности потока мощности 5 – 9 мВт/см.², импульсной генерации с экспозицией 5 – 10 сек.) по сравнению с базовыми вариантами (без электромагнитной обработки).

Представители плодовоовощеводческого
Хозяйства

 Чернов О.В.
 Станчо В.П.

Представители НАУ и ТГАТА

 И.И. Мартыненко
 Л.Е. Никифоровна
 С.Н. Гомон
 С.В. Адамова
 М.В. Чарний

Погоджено

Проректор з організаційної та
Наукової роботи
Ібатуллін І.І.

« 1 »

2005р



Затверджую

Директор ПП «Південна
Сільськогосподарська компанія»
Іонов М.Г.

« 2 »

2005р



А К Т

про впровадження результатів науково-дослідних, дослідно – конструкторських та технологічних робіт

Даним актом стверджується, що результати роботи по впровадженню низько енергетичної електромагнітної технології активації насіння та тепличних культур, виконаної Національним аграрним університетом кафедрою автоматизації сільськогосподарського виробництва 2002-2005рр впроваджені в плодоовочевому господарстві «Оксамит».

1. Вид впроваджуваних робіт: низькоенергетична електромагнітна технологія активації насіння та тепличних культур

технології, сорти, породи, лінії, гібриди, препарати, машини тощо

2. Масштаби впровадження 2000 м² – 2003р. 2000 м² – 2004р, 2000 – 2005 р.

3. Новизна результатів науково – дослідних робіт: застосування низькоенергетичних електромагнітних випромінювань для активації рослин томатів з резонансною частотою 24,25 ГГц, постійною генерацією, експозицією 30 хв та інтенсивністю 5 – 9 мВт/см² та– 37,705 ГГц, Т-15 хв, Р-1,9мВт,см²

4. Дослідно – промислова перевірка проведена плодоовочевою компанією ООО «Оксамит».

5. Річний економічний ефект у грошовому виразі 12,45 тис грн.(за реалізаційними цінами 2002-2005 рр)

6. Соціальний і науково – технічний ефект Завдяки активації насіння та рослин підвищується врожайність на 19 – 23%

Від національного

Аграрного університету

Академік Мартиненко І.І.

Доцент Никифорова Л.Є.

Чанний М.В.

Від підприємства

гл. агроном Бронченко О.В.

зав. теплицею Павлова Н.І.



А К Т

О результатах выполненных работ по предпосевной низкоэнергетической электромагнитной активации семян

Мы, нижеподписавшиеся, главный агроном и управляющий тепличным комбинатом КФХ Рыбников М.И., к.т.н., доц. каф. АСП ТГАТА Никифорова Л.Е., Составили настоящий акт о том, что в 2006 году в тепличном комбинате ИП КФХ Ростовской области была проведена предпосевная низкоэнергетическая электромагнитная активация семян томатов, направленная на повышение их посевных качеств.

В результате наблюдений, проводившихся в период с января по ноябрь 2006 года, было отмечено:

- 100% всхожесть семян;
- отсутствие выпадов сеянцев томатов;
- отсутствие массовых и очаговых заболеваний растений бактериозом.

Результаты этих наблюдений полностью подтверждают результаты работ по низкоэнергетической электромагнитной активации семян томатов, полученные в 2003-2005гг. в ЧПКП «Южная сельскохозяйственная компания», ООО «Оксамит», фермерском хозяйстве «Мехтиев Ш.А.» В связи с вышеизложенным, представляется целесообразным внедрение метода предпосевной активации семян в технологический процесс выращивания томатов.

ТГАТА

к.т.н.

Никифорова Л.Е.

ИП КФХ

Гл. агроном Рыбников М.И.



Ректор Т.А.М. Кюричев В.Н.
«25» 2007г.



Матвеева Л.А. Матвеевского Фермерского
«18» декабря 2007г.

А К Т

О результатах выполненных работ по предпосевной низкоэнергетической электромагнитной активации семян томатов и огурцов

Мы, нижеподписавшиеся главный агроном КФХ Рыбников М.И., к.т.н. доц. каф. АСП ТАТУ Никифорова Л.Е., инж. Гомон С.В. составили настоящий акт о том, что в 2007 в тепличном комбинате на площади 6 га засеивались семена томатов сорта «RASSIA» 145 тысяч семян и на 4 га (2 – в первом севообороте и 2 во втором) огурцы сорта «ТСХА-575» 41 тысяча семян и сорта «CONCERTO» 50 тысяч семян, обработанные низкоэнергетическим электромагнитным полем (частота 37-39 ГГц, плотность потока мощности 1,9-2,0 мВт/см²).

Применение данной обработки повысило энергию прорастания семян, что позволило получить 100% всхожесть растений, стимулировало рост растений во всех фазах развития, увеличило фотосинтезирующий аппарат растений, способствовало более быстрому развитию растений.

Применение данной технологии предпосевной обработки семян позволило получить следующую урожайность:

Томаты – 29,8 кг/м² (прибавка по сравнению 2006 г. – 6 кг/м²)

Огурцы – 35,3 кг/м² (прибавка по сравнению с 2006 г. – 2,3 кг/м²)

Таким образом, результаты выполненных работ по предпосевной обработке семян в тепличном комбинате достоверно подтвердили высокую эффективность данного вида обработки. Растения развивались быстрее и плодоносили раньше, характеризовались высокой устойчивостью к болезням, что в конечном итоге позволило получить весомую прибавку урожая (356 тонн томатов и 43 тонны огурцов)

ТАТУ

к.т.н. Никифорова Л.Е.
инж. Гомон С.В.

ИП КФХ

Гл. агроном Рыбников М.И.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криворучко В.І. Прогноз розвитку овочівництва на 2000-2010 роки // В.І. Криворучко, В.М. Скупий. Овочівництво України в умовах перехідної економіки - К.,1999.- С. 43-46.
2. Гусельникова М. Пути повышения эффективности производства овощей в защищенном грунте / М. Гусельникова, Н. Коваленко // АПК: экономика, управление.-1999. - №11.- С.66-72.
3. Жукова П.С. Регуляторы роста и гербициды / П.С. Жукова – Мн.: Ураджай, 1990 - 165 с.
4. Химические и биологические стимуляторы роста сельскохозяйственных растений. / Справочник. - М.: Колос, 1993. - 45с.
5. Наумов Г.Ф. Биологическая стимуляция семян подсолнечника как прием улучшения их посевных качеств и урожайности свойств / Г.Ф. Наумов Л.Ф. Носонова // Селекция и семеноводство, 1984. - Вып.56 . - С.89-93.
6. Алексеева А.М. Влияние янтарной кислоты на продуктивность различных сельскохозяйственных культур /А.М. Алексеева, М.А. Рассказов // Науч.тр. Воронежского СХИ, 1976. - Т.77. - С.60-69.
7. Алексеева А.М. Влияние микроэлементов бора, марганца, кобальта, молибдена на урожайность и лежкость корнеплодов моркови. / А.М. Алексеева, М.А. Рассказов // Науч.тр. Воронежского СХИ, 1976. - Т.85. - С.6-13.
8. Коненков Н.Ф. Обработка семян полиэтиленгликолем / Н.Ф. Коненков, В.Н. Губкин // Картофель и овощи, 1960. - №7- С.30.
9. Блузманс П.И. Перспективы использования в с/х витаминов группы «В» / П.И. Блузманс, Р.А. Шимкунас // Гуминовые удобрения: теория и практика их применения, 1983 - Т.9 - С54-56.
10. Гальчинска В.А. Напрями підвищення конкурентоспроможності овоченасіннєвої продукції / В.А. Гальчинска // Економіка АПК., 2002.- №5.- С. 49-51.

11. Гавришова В.И. Экономическая оценка технологий производства оздоровленных семян / В.И Гавришова // Картофель и овощи, 1990.- №4. - С.18-20.
12. Кошев Л.А. Рациональная организация семеноводства овощных культур / Л.А. Кошев, А.Н. Лебедев // Достижения науки и техники АПК, 1988. - №4. - С.27-29.
13. Адамень Ф. Состояние и направления развития семеноводства в Украине / Ф. Адамень // Междунар. с.-х. журнал, 1997. - №2. - С.49-50.
14. Маласай В.М. Урожайность семян овощных культур в разных почвенно-климатических зонах / В.М. Маласай // Вісн. агр. Науки, 2000. - №10.- С.78-79.
15. Черенков А.Д. Применение информационных электромагнитных полей в технологических процессах сельского хозяйства / А.Д. Черенков, Н.Г. Косулина // Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал: Харківська національна академія міського господарства. – Харків, 2005. – №5. – С. 77 – 80.
16. Яковенко К.І. Особливості розвитку товарного овочівництва в умовах перехідної економіки / К.І. Яковенко, В.П. Рудь // Економіка АПК., 2001.- №2. - С.90-94.
17. Криворотько А.І. Розміщення виробництва насіння овоче-баштанних культур / А.І. Криворотько. // Економіка АПК.-2002.-37.- с.57-61.
18. Лихацький В.І. Виробництво овочевої продукції в Україні / В.І. Лихацький, та ін. // Зб. наук. праць. - Умань, 2004.- Вип.58.- С.206-302.
19. Андрусяк Н.О. Сучасний стан виробництва і збуту овочів / Н.О. Андрусяк // Зб. наук. праць.- Умань, 2004.- Вип.58.- С.459-463.
20. Криворучко В.І. Розвиток овочівництва в Україні / В.І. Криворучко . // Економіка АПК, 1999.- №1.- С. 117-118.
21. Бородин И.Ф. Использование когерентного электромагнитного излучения в производстве продукции растениеводства / И.Ф. Бородин, А.В. Будаговский, О.Н. Будаговская, Г.А. Гуди // Доклады Россельхозакадемии.,

1996. - №5 - С. 41-44.

22. Бородин И.Ф. Электричество управляет растениями / И.Ф. Бородин // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1996 - № 4 - С. 28-30.

23. Гэлстон Л. Жизнь зеленого растения. / Л. Гэлстон А., Г. Девис., Р. Сэттер. - М.: Мир, 1983.- 552 с.

24. Яковенко К.І. Овочівництво України на порозі ХХІ століття / К.І. Яковенко // Вісн. агр. науки. , 2000 - №8.- С.21-24.

25. Кодзоев М. Улучшение элитного семеноводства овощных и бахчевых культур в России / М. Кодзоев и др. // Междунар. с.-х. журнал., 2001.- №1.- С. 54-57.

26. Щоткін В. Перспективи розвитку овочівництва закритого ґрунту / В. Щоткін // Пропозиція, 2000. - №1.- С.48-50.

27. Lai H., Horita A., Chou C.K. et al. // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine March, 1987.- P.31.

28. Lai H., Carino MA., Horita A et al. / Pharmacology Biochemistry and Behavior., 1989.- V.33., №1.- P.131.

29. Володин В.И. Стимуляция прорастания семян с помощью ультразвука и гибберелина: авторефавтореф. дис.... канд. биол. наук / В.И. Володин - Л.,1963 – 20с.

30. Докучаев В.И. Зарядовый эквивалент и его возможная роль в генерации электрического поля биологическими системами / В кн.: Электромагнитные поля в биосфере. М.: Наука, 1984. Т. 1. С. 350-361.

31. Дорохов Г.П. Изучение физиологического действия электрического поля высокого напряжения постоянного тока на клубни картофеля как фактора повышения урожайности : автореф. дис...канд.с-х.наук. М., 1974.- 27 с.

32. Овочівництво та баштанництво // Агропромисловий комплекс України: стан та перспективи розвитку (1990-2000).- К.,1999.- С.135-151.

33. Скрипник М.М. Енергозберігаючі електротехнології опромінювання рослин / М.М. Скрипник // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2006. – №2/3 (18). – С. 22 – 29.

34. Дубров А.П. Генетические и физиологические эффекты действия ультрафиолетовой радиации на высшие растения./ Дубров А.П. - М.: Наука, 1968. - 250 с.
35. Дерюгина З.П. О влиянии электрического воздействия на процесс репарации теплового повреждения проростков растений / З.П. Дерюгина, А.Л. Набоков, В.Г. Шахбазов // Вестник Харьк.ун-та. – Харьков, 1980.- № 195. - С.44-46.
36. Гунар И.И. Функциональное значение токов действия в изменении газообмена высших растений / И.И. Гунар, А.М. Синюхин // Физиология растений., 1963.- Т. 10. Вып.3. - С.265-274.
37. Блонская А.П. Влияние электрического поля на электропроводность проростков и растений пшеницы / А.П. Блонская, В.А. Окулова // Труды ЧИМЭСХ, 1975 - №97- С. 129-132.
38. Блонская А.П. К вопросу механизма воздействия электрического поля на семена. / А.П. Блонская, В.А. Окулова // Труды ЧИМЭСХ, 1977 - №121.- С. 100-103.
39. Девятков Н.Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н.Д. Девятков. // Успехи физических наук, 1973.- Т. 11 №3- С. 453-456.
40. Духовный А.И. Электрофизиология опыления у высших растений (на примере кукурузы) / А.И. Духовный. - Кишинев: Штиинца, 1973 - 100 с.
41. Никелл Л. Дж. Регуляторы роста растений в сельском хозяйстве / Л. Дж. Никелл . - Пер. с англ.- М.: Колос, 1984 .- 192 с.
42. Belyaev I.Y., Alipov Y.D., Shcheglov V.S., Lystcov V.N. // Z.Naturforsch., 1992.- V.47.- P.621.
43. Похвалитый А.П. Действующий фактор-электромагнитный импульс / А.П. Похвалитый, С.К. Кириленко, В.А Похвалитый // Электронная обработка материалов., 1991- № 4.- С. 55-58.
44. Саталкина Г.И. Повышение посевных качеств овощных культур путем предпосевной обработки их электрическим полем / Г.И. Саталкина,

А.Н. Шумаева . – Труды Кубанского СХИ, 1975 - Вып. 98/126, С. 82 – 86.

45. Басов А.М. Влияние электрического поля на некоторые физиолого-биохимические процессы, урожай и его качество / А.М. Басов, А.П. Блонская, В.А. Окулова, А.Н. Миронова // Электронная обработка материалов, 1977 - №1 - С. 72-74.

46. Мараквелидзе М.А. Результаты производственных испытаний предпосевной обработки семян в поле коронного разряда / М.А. Мараквелидзе, М.И. Гольдбаум, З. Р. Одикадзе. // Сб. науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ., 1977. - №121. – С.104 -106.

47. Волков В.А. К вопросу о влиянии электрического поля на посевные качества семян новых кормовых растений / В.А.Волков, В.В. Волков, В.П. Суворин. // Сб. науч. тр. ЛСХИ. – Л.: СХИ., 1975. – Т.275. – С.46-49.

48. Басов А.М. Влияние электрического поля на некоторые физиолого-биоклиматические процессы, урожай и его качество / А.М. Басов, А.П. Блонская, В.А. Окулова // Электронная обработка материалов., 1977. - №1. - С.72-74.

49. Пилюгина В.В. Электромагнитная стимуляция в растениеводстве / В.В. Пилюгина, А.В. Регуш . – М.: Наука, 1980. – 50с.

50. Басов А.М. Влияние предпосевной обработки клубней картофеля в электрическом поле на повышение продуктивности растений / А.М. Басов, А.Ф. Коваленко, А.Н. Миронова // Сб. науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1975. – Вып. 97. – С.117-120.

51. Миронова А.Н. Влияние электрического поля на урожай картофеля в поколениях / А.Н. Миронова // Сб. науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1976. – №109. – С.88-91.

52. Миронова А.Н. Влияние электрообработки на сохранность нового урожая картофеля / А.Н. Миронова // Сб. науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1977. – №121. – С.92-95.

53. Хлебный В.С. Изменение качества семян яровой пшеницы под влиянием постоянного магнитного поля / В.С. Хлебный., Э.В. Клейменов.

// Доклады ВАСХНИЛ. - М.: ВАСХНИЛ, 1976. - №4.- С. 37 – 39.

54. Кушнир П.И. Влияние обработки семян магнитным полем на их всхожесть./ П.И. Кушнир, А.И. Данилюк, П.Е. Швыдский и др. // Научные труды Львовского СХИ. – Львов: ЛСХИ, 1978 - Т. 79 - С. 90 – 98.

55. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы // (Сб. науч. ст. (науч. ред. акад. информ. МАИ Каменец Л.Г.) Международная акад. информ. Украинский научно-технологический центр. – Киев: ТЕС, 2002. – Вып. 4. - 220 с.

56. Никифорова Л.Є. Огляд існуючих способів підвищення врожайності овочевої продукції в захищеному ґрунті / Л.Є. Никифорова. // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків, 2004. – Вип. 27, Т.2 – С.85 - 89.

57. Никифорова Л. Є. Моделювання взаємодії електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону з насінням тепличних культур/ Л.Є. Никифорова.// Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Харків, 2009. – Вип.86, С. 127 – 130.

58. Цугленок Н.В. Современное состояние и перспективы развития технологии и предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур. / Н.В. Цугленок, Ю.А. Меновщиков // Научно-техн. бюлл. Сиб. НИИМЭСХ., 1977 - Вып. 6-7 - С. 77-80.

59. Калинин А.Г. Использование микроволнового поля для повышения урожайности и защиты семян от вредителей и болезней / А.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. внедрение. Проблемы. Перспективы. – Одесса: ТЕС, 2002. – Вып.4. – С. 8-36.

60. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы // Сб. науч. ст. (науч. ред. акад. МАИ Каменец Л.Г. Международная акад. информ. Украинский научно-

технологический центр. – Киев: ТЕС, 2000. – 192 с.

61. Хуратов А. Влияние предпосевной обработки семян электрическим полем переменного тока на рост и развитие овощного гороха / А. Хуратов, И. Черниану // Труды Кубанского СХИ. – Краснодар: СХИ., 1976. – Вып. 119. – С. 92-99.

62. Калинин А.Г. Некоторые результаты натурных испытаний по изучению влияния микроволнового поля на урожай овощных культур / А.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А. Левченко // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспектива. – Одесса, Киев: ТЕС, 202. – Вып. 4. – С. 56-63.

63. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Н.Д. Девятков. – М.: Связь, 1981. – 338с.

64. Девятков Н.Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н.Д. Девятков // УФН., 1973. – Т. 110. – С. 152.

65. Жуковский А.П. О биофизическом механизме воздействия миллиметровых излучений на биологические процессы / А.П. Жуковский, О.П. Резункова, С.В. Сорвин // 10 Российский симпозиум с международным участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии». – М.: ИРЭ РАН, 1995. – С. 152.

66. Чуков Ю.П. Открытие нетепловых резонансных эффектов ММ-излучения как начало новой биофизики / Ю.П. Чуков // 11 Российский симпозиум с международным участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии». – М.: ИРЭ РАН, 1997. – С. 132-136.

67. Тамбиев А.Х. Стимуляция роста сине-зелёных водорослей при действии электромагнитного диапазона низкой интенсивности / А.Х. Тамбиев, Н.Н. Киринова // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты. - М.: ИРЭ РАН. СССР, 1986. – С. 54-59.

68. Косулина Н.Г. Дослідження впливу електромагнітного поля на

насіння СОЇ. / Н.Г. Косулина, О.Д. Черенков // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Харків, 2005. – Вип. 37. Т.1. – С. 152-160.

69. Никифорова Л.Є. Використання резонансних явищ для моніторингу і впливу на життєдіяльність сільськогосподарських біологічних об'єктів / Л.Є. Никифорова, А.Г. Сабо // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь, 2001. – Вип.1,Т.18. – С. 56 – 60.

70. Никифорова Л.Є. До пошуку режимів та діапазонів ефективного впливу на життєдіяльність сільськогосподарських біологічних об'єктів. / Л.Є. Никифорова, А.Г. Сабо // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2000. – Вип.1; Т.11- С.44-47.

71. Никифорова Л.Є. Використання низькоінтенсивних електромагнітних полів діапазону НВЧ для діагностики та впливу на життєдіяльність сільськогосподарських біологічних об'єктів. / Л.Є. Никифорова // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь, 2001. – Вип.1; Т.24. – С. 47–49.

72. Телл Р.А. Облучение населения СВЧ и УВЧ сигналами широкополосных станций США / Р.А. Телл, Э.Д. Мэнтипли // ТИИЭР, 1980. – Т. 68, № 1. – С. 8-15.

73. Bloockman C.F. Biological response from AC electromagnetic fields coupled to geomagnetic fields. / C.F. Bloockman // Prog. 9th Annul Conf. IEEE on Eng. Med. And Soc – Boston: Mass (USA), 1987. – Vol. 1. – P. 83-84.

74. Оверкиллер Р. Психотропное оружие в США. Теоретические основы и история создания / Р. Оверкиллер - Пер. с англ. – М.: Кондор, 1995. – 42 с.

75. Schwan H.P. Microwave radiation: biophysical considerations and standards criteria / H.P. Schwan. // IEEE Trans. Biomed. Eng., 1972. – Vol. 19, № 4. – P. 304-312.

76. Смердов А.А. Аналіз латентності та акомодатії на основі частотно-вибірної моделі збудження нейрону / Смердов А.А., Романишин

Ю.М. // Фізика живого. -2005. – Т.13.- № 1. – С. 57-62.

77. Смердов А.А. Пристрій для визначення твердості кісткової тканини / Смердов А.А., Нагаєвич В.М., Ландер В.М., Петровський О.М. // Наукові праці ПДАА. – Полтава: Видавництво ПДАА.- 2007. – Т. 6 (25). – С. 139-146.

78. Experimental study of biological effects// Microwave Power., 1971. – Vol. 6, № 1. - P. 59-61.

79. Черенков А.Д. Применение информационных ЭМП в технологических процессах сельского хозяйства / А.Д. Черенков, Е.П. Пиротти // Вестник ХГПУ (ХПИ). – Харьков, 1999. – Вып. 62. – С. 72-77.

80. Binhi Theoretical concepts in magneto biology// Electro magnetobiol., 2001. – № 20 (1). – P. 47-62.

81. Бинги В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели / В.Н. Бинги – М.: МИЛТА, 2002. – 592 с.

82. Голант М.Б. Резонансное действие когерентных электромагнитных излучений миллиметрового диапазона волн на живые организмы / М.Б. Голант // Биофизика, 1989. – Т. 34; № 6. – С. 1004-1014.

83. Голант М.Б. О проблеме резонансного действия когерентных электромагнитных излучений миллиметрового диапазона волн на живые организмы / М.Б. Голант // Биофизика., 1989. – Т. 34; № 2. – С. 339-348.

84. Эмби У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эмби – М.: И.ИЛ, 1959 – 280с.

85. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон – М.: Мир, 1963. – 165с.

86. Антомонов Ю.Г. Системы. Сложность. Динамика. – К.: Наукова Думка, 1969. – 210 с.

87. Вернадский В.Н. Живое вещество. / В.Н Вернадский – М.: Наука, 1978. – 87с.

88. Лебедев С.Н. Физиология растений. / С.Н. Лебедев – М.: Колос, 1982. – 105 с.

89. Васильев А.Е. Функциональная морфология секреторных клеток

растений. / А.Е. Васильев – М.: Наука, 1977. – 100 с.

90. Никифорова Л.Є. Аналіз структурно – функціональних зв'язків у рослинній біосистемі. / Л.Є. Никифорова // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. - Харків, 2003. – Вип. 19; Т. 1. – С.188 – 191.

91. Кузнецов А.П. Электромагнитные поля живых клеток в КВЧ-диапазоне / А.П. Кузнецов // Электронная техника. Сер. 1 Электроника СВЧ., 1991. – Вып. 7 (441). – С. 3-6.

92. Чиркова Э.Н. Волновая природа регуляции генной активности: живая клетка как фотонная вычислительная машина / Э.Н. Чиркова // Русская мысль, 1992. - № 2. – С. 29-41.

93. Казначеев В.П. Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей / В.П Казначеев, Л.П Михайлова. - Новосибирск: Наука, 1985. – 182 с.

94. Никифорова Л.Є. Аналітичний розрахунок резонансних частот електромагнітних коливань клітини рослинної біосистеми. / Л.Є.Никифорова, Л.А. Фунтікова // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2006. – Вип.43. - С. 86 – 90.

95. Никифорова Л.Е. Электродинамическая модель и резонансные свойства биологической клетки. / Л.Е. Никифорова , А.И. Мартиненко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. - Київ, 2007. - № 2 (17). - С. 115-121.

96. Исмаилов Н.Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучений / Н.Ш. Исмаилов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

97. Девятков Н.Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности/ Н.Д. Девятков, М.Б. Голант О.В. Бецкий . – М.: Радио и связь, 1991. – 169 с.

98. Девятков Н.Д. Роль синхронизации в воздействии слабых электромагнитных сигналов миллиметрового диапазона волн на живые

организмы / Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, А.С. Тагер // Биофизика, 1983. – Т. 28; Вып. 5. – С. 895-896.

99. Арбер С.Л. Клеточные и молекулярные эффекты и механизмы действия микроволновых электромагнитных полей на биологические системы / С.Л. Арбер // Электронная обработка материалов, 1978. - № 3. – С. 59-65.

100. Молекулярна биология клетки/ Б. Альбертс, Д. Брей, Д. Льюис.- пер. с англ. В 2 т. – М.: Мир, 1987. – Т. 2. – 312 с.

101. Волченко В.Н. Элементы концепции биоэнергоинформатики / В.Н. Волченко // Труды междунар. междисциплинар. науч.-техн. школы-семинара «непериодические быстропротекающие процессы в окружающей среде. «Рабочие материалы». – Томск, 1992. – Том 3; ч. IV. – С. 41-49.

102. Keilmann F. Experimental RF and MW resonant nonthermal effects / F. Keilmann // In . Biological effects and dosimetry of non-ionizing radiation (ed. by M.Grandolf, S.Michaelson, A.Rindi). N.-Y., Plenum Publishing Corporation, 1983. - P.283-296.

103. Bonim N.M. // Cel Motility and the Cytoskeleton / N.M. Bonim, M.C. Gustin, D.L. Nelson, 1986., - V.6. - P.256.

104. Nakaoka Y. // J. Cell Sci., Y. Nakaoka, H. Tanaka, F. Oosawa., 1984., V.65. - P.223.

105. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа / А.С. Пресман. - М.: Наука, 1968. – 288 с.

106. Рубин А.Б. Проблемы физиологии в современном растениеводстве / Б.А. Рубин . - М.: Колос, 1979.- 302 с.

107. Анализ качества семян по рентгенограмме с помощью ЭВМ / В.П. Якушев и др.// Доклады РАСХН., 2001.- №1.- С.16-17.

108. Прищеп Л.Г. Электромагнитная релаксация и жизнедеятельность растений и животных. / Л.Г.Прищеп, И.И. Подтынков // Механизация и электрификация с/х. - М., 1982. - №1. - С.37-43.

109. Девятков Н.Д. Воздействие электромагнитных колебаний

миллиметрового диапазона волн на биологические системы / Н.Д. Девятков, О.В. Бецкий, Э.А.Гельвич // Радиобиология, 1981.- Т.21; Вып.2 - С. 163-171.

110. Леопольд А. Рост и развитие растений. / А. Леопольд - М.: Мир, 1968. - 494 с.

111. Frolich H. Microwave radiation: biophysical considerations and standards criteria / H. Frolich, F. Gutmann, H. Keyzer et al. // Plenum Press - New York, 1999. - P.241-261.

112. Прищеп Л.Г. Биоэлектромагнитология и управление жизнедеятельностью растений / Л.Г. Прищеп, В.В. Пилюгина, Ю.Х. Шогенов и др. // Науч. тр. Всеросс. НИИ электрификации с/х, 1992. - Т.79. - С. 3.

113. Коломиец А.А. Изучение пассивных электрических характеристик высших растений методом электротона. / А.А. Коломиец, Г.Н. Зацепина //Биофизика, 1990. - Т.35; Вып.2. - С. 336-339.

114. Николаева М.Г. Справочник по проращиванию покоящихся семян / Николаева и др. - Л.:Наука, 1985. - 348 с.

115. Красногорская Н.В. О возможных механизмах генерации электромагнитных излучений живыми системами / Н.В. Красногорская, В.П. Малов, Л.А.Шелепин // В кн.: Электромагнитные поля в биосфере. М.: Наука, 1984.- Т.1.- С. 133-139.

116. Новикова Г.В. Учет сортовой спецификации при высокочастотной обработке семян./ Г.В. Новикова С.И.Ушакова, Н.Д. Новикова // Науч.тр. ЧИМЭСХ., 1979.- Вып. 154, Ч.2 - С.84-86.

117. Скулачев В.П. Энергетика биологических мембран./ В.П. Скулачев.- М.: Наука, 1989. - 564 с.

118. Смирнова И.Н. Биоэлектрический потенциал корня как средство диагностики токсичности ингибиторов / И.Н. Смирнова / В кн.: Бюл.н. -техн. информ. по агрофизике. - Л., 1968.- № 12.- С.42-45.

119. Бородин И.Ф. Применение СВЧ - энергии в технологических процессах сельскохозяйственного производства / И.Ф. Бородин // Применение СВЧ - энергии в технологических процессах и научных исследованиях. - Саратов, 1991- С. 37-39.

120. Григорьев Ю.Г. Влияние электромагнитного излучения сложного режима на высшие растения с различной метаболической активностью. / Ю.Г. Григорьев, Л.В. Невзгодина, Л.Н. Максимова // Тез. Докл. радиобиологического съезда - Пущино, 1993. - Ч.1.- С.266-267.
121. Девятков Н.Д. Эффекты нетеплового действия мм излучения на биологические объекты./ Н.Д. Девятков // Сб.ст. АН СССР ин-т Радиотехники и электроники, - М.: ИРЭ, 1983. - С.43-49.
122. Каменир Э.А. Совершенствовать технику обработки семян / Э.А. Каменир // Техника в сел. х-ве., 1984. - №12.- С.41-43.
123. Бородин И.Ф. Использование электромагнитных полей в экологически чистых сельскохозяйственных технологиях: Нетрадиционные технологии в сельскохозяйственном производстве и быту села / И.Ф.Бородин - М., 1991. - 3 с.
124. Гунар И.И. Электрофизиологическое исследование клеток устьичного комплекса традесканции / И.И. Гунар, И.Ф. Злотникова, Л.А. Паничкин // Физиология растений, 1975. - Т.22; Вып.4. - С.810-813.
125. Гунар И.И. Оценка морозостойкости и жаростойкости растений по биоэлектрическим реакциям / И.И. Гунар, Л.А. Паничкин, А.П. Маслов // Известия ТСХА, 1971 - №5. - С. 3-7.
126. Гордеев А.М. Физиологическое состояние растений при электровоздействии в условиях гипогравитации / А.М. Гордеев, А.Л. Машинский, Н.В. Мельников и др // Известия ТСХА, 1988.- Вып. 3 - С. 95-99.
127. Горланов Н.А. Об участии электрических разностей потенциалов в передвижении РЗ2 в корнях лука / Н.А. Горланов // Биофизика., 1960.- Т.5; Вып.3.- С.586-612.
128. Волков А.Г. Биоэлектрохимические сигналы в растениях огурца /А.Г. Волков, Р.А. Хаак // Физиология растений., 1995.- Т. 42; № 1.- С. 23-29.
129. Костина Г.И. Стимуляция продуктивности сорго воздействием магнитного и электрического поля. / Г.И. Костина // Тез. докл. Всесоюзной

науч. конф. «Применение низкоэнергетических физических факторов в биологии и сельском хозяйстве»./ Киров, 1989. – С.120-121.

130. Воробьев В.А. Электрификация сельскохозяйственного производства./ В.А. Воробьев. - М.: Агропромиздат, 1985 - 208 с.

131. Жизнеспособность семян / Пер. с англ. Н.А. Емельяновой. - М.: Колос, 1978. - 415 с.

132. Галай Н.В. Распознавание видов и качества растений для автоматизации технологических процессов растениеводства: автореф. дис. д-ра техн. наук. / Н.В. Галай – Мн., 1989. - 34 с.

133. Албертс Б. Молекулярная биология клетки./ Б. Албертс, Д.Брей и др. – М.: Мир, 1994 - Т.1.- 430 с.

134. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц У.Хилл: пер. с англ. под ред. М.В.Гальтерина. – М.: Мир, 1984 – 590с.

135. Анисимов В.И. Транзисторные модуляторы / В. И. Анисимов, А. П. Голубев - Л.: Энергия, 1964. – 224 с.

136. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. - М.: Агропромиздат, 1985. - 351 с.

137. Доспехов Б.А. Энергетика биологических мембран. / Б.А. Доспехов М.: Наука, 1989 - 564 с.

138. Самуилов Ф.Д. О связи между биоэлектрическими потенциалами и поглощением воды растениями / Ф.Д. Самуилов, Л.А Кудрин // Тр. Казанского с.-х. ин-та., 1967. - Вып.54. - С.3-14.

139. Ветров Е.П. Предпосевная обработка семян томата. / Е.П. Ветров //Картофель и овощи., 1982. - №2, С. 24-25.

140. Тимирязцев К.А. Жизнь растения / К.А. Тимирязев. – ОАО Новости, 2006. – 320 с.

141. Третьяков Н.Н. Физиология и биология сельскохозяйственных растений / Н.Н.Третьяков, Е.И.Кошкин, Н.М.Макрушин. – М.: Колос, 1998. – 640с.

142. Шевелуха В.С. Рост растений и его регуляция в онтогенезе

/В.С. Шевелуха. – М.: Колос, 1992. – 594 с.

143. Опритов В.А. К экспериментальному обоснованию участия биоэлектрических потенциалов в передвижении веществ у высших растений / В.А. Опритов, С.В. Мичурин // Физиология растений. 1973.- Т.20; Вып. 3 - С.451-461.

144. Галай М.В. Принципи та методологія автоматичного розпізнавання об'єктів за їх фізичними властивостями / М.В. Галай та ін. - Полтава: АСМІ, 2000. – 339 с.

145. Справочник по радиоизмерительным приборам / под ред. В.С. Насонова. - М: Сов. Радио, 1986. - 485с.

146. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи: (Монографія) / С.В.Павлов, В.П.Кожем'яко, В.Г.Петрук, П.Ф.Колісник – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2007. – 254 с.

147. Павлов С.В. Методологічні аспекти побудови оптико-електронних „око-процесорних” систем діагностики периферичного кровонаповнення // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 2 (14). – С. 183-192.

148. Павлов С.В. Аналіз методів взаємодії оптичного випромінювання з біотканинами та шляхи їх удосконалення / Павлов С.В., Думенко В.П., Козловська Т.І., Марков С.М. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С.129 – 135. Schneider J. Stimulated emission of radiation be relativistic electrons in a magnetic filed / J. Schneider // Phys.: Rev. Leters., 1959. - V.2, №12. - P. 504-505

149. Freund H.P. Free-electron lasers: vacuum electronic generators of coherent radiation / H.P. Freund, G.R. Neil // Proceeding of the IEEE., 1999. - V.87; №5. - P. 782-803.

150. Parker R.K. Vacuum Electronics / R.K. Parker, R.H. Abrams, B.G. Danly, B. Levush // IEEE Trans. On MTT., 2002. - V.50, № 3. - P.835-845.

151. Корнеенков В.К. Генераторы дифракционного излучения непрерывного и импульсного действия / В.К. Корнеенков, В.С.

Мирошниченко, Б.К. Скрынник // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины, 1998. - Т.3, №1. - С. 67-70.

152. Скрынник Б.К. ГДИ миллиметрового диапазона длин волн / Б.К. Скрынник, В.К. Корнеев, В.С. Мирошниченко // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна: Радіофізика та електроніка. - 2002.- № 570; Вип. 2. - С. 105-108.

153. Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн / Л.В. Касаткин, В.П. Рукин, В.Д. Еремка, В.Д., Науменко, Г.Н. Рапопорт, В.С. Мирошниченко и др. - Севастополь: Вебер. - 2007. - 252 с.

154. Современное состояние твердотельной техники мм диапазона волн //Электронная техника: Электроника СВЧ., 1975. - Вып. 6.- 68с.

155. Касаткин Л.В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Касаткин Л.В., Чайка В.Е. - Севастополь: Вебер, 2006. - 319 с.

156. Misawa T. On oscillators circuit with var structures for millimeter-wave Impett diodes / T. Misawa, N.D. Kenyon // IEEE Trans., 1970.- MTT-18. №11 -Р. 120-125.

157. Зырин С.С. Стабильность частоты и выходная мощность пролётного автогенератора с колебательной системой произвольного типа // Электронная техника: Электроника СВЧ. - 1970. - Вып. 10.- С. 30 - 42.

158. Смердов А.А. Дослідження електростимулюючого впливу на біологічно-активні точки при діагностиці та лікуванні маститів / Смердов А.А., Дрипан Ю.А. // Вісник КДПУ. – 2007. – Вип. 2 (43). – Ч. II. – С. 56 – 61.

159. Жулев В.И. Исследование электрических процессов в клеточных структурах / В.И. Жулев, И.А. Ушаков // Биомедицинская электроника, 2001. - №7. – С.30-70.

160. Бецкий О.В. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты /О.В. Бецкий, Н.Н. Лебедева // Миллиметровые волны в биологии и медицине, 2001. - № 3. – С. 5-19.

161. Волькенштейн М.В. Молекулы и жизнь. Введение в

молекулярную биофизику / М.В. Волькенштейн . – М.: Наука, 1965. - 504с.

162. Стрэттон Д.А. Теория электромагнетизма / Д.А. Стрэттон - Л.: Гостехиздат, 1948. - 860 с.

163. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. /В.В. Никольский, Никольская Т.Н. - М.: Наука, 1989. - 543 с.

164. Зоммерфельд А. Электродинамика / А. Зоммерфельд - пер. с нем. - М.: Иностранная литература, 1958. - 657 с.

165. Пиротти А.Е. Моделирование распределения внутренних электромагнитных полей в деформированных биологических объектах / А.Е. Пиротти, А.Д. Черенков // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 2000. - Вып. 99. - С. 130-133.

166. Піротті О.Є. Розподіл електромагнітних полів у деформованих біологічних об'єктах / О.Є. Піротті, Ю.Ф. Сvergун // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2001. - Вип. 1, Т. 19. - С. 11-15.

167. Воробьев Н.Н. Теория рядов. / Н.Н. Воробьев - М.: Наука, 1986. - 408 с.

168. Янке Е. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы). / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш - М.: Наука, 1964. - 344 с.

169. Медведев С.С. Электрофизиология растений. / С.С. Медведев - Учебное пособие.- Санкт- Петербург: Издательство С.-Петербургского университета, 1998. - 180 с.

170. Плонси Р. Биоэлектричество. Количественный поход / Р. Плонси, Р. Барр - Пер. с англ. - М.: Мир, 1992. - 366 с.

171. Аккерман Ю. Биофизика / Ю. Аккерман - Пер. с англ. - М.: Мир, 1964. - 684 с.

172. Пилюгина В.В. Электромагнитная стимуляция в растениеводстве /В.В. Пилюгина, А.В. Регуш // Обзорная информация - М.: ВАСХНИЛ, 1980. - 50 с.

173. Саталкина Г.И. Повышение посевных качеств овощных культур путем предпосевной обработки их электрическим полем / Г.И. Саталкина,

А.Н. Шумаева // Труды Кубанского СХИ, 1975 - Вып. 98/126. - С.82 - 86.

174. Шван Х.П. Воздействие высокочастотных полей на биологические системы / Х.П. Шван // Электрические свойства и биофизические механизмы - ТИИЭР., 1980.-Т. 68, №1.-С. 121-132.

175. Докучаев В.И. Зарядовый эквивалент и его возможная роль в генерации электрического поля биологическими системами /Докучаев В.И. - В кн.: Электромагнитные поля в биосфере - М.: Наука, 1984.- Т. 1. - С. 350-361.

176. Никифорова Л.Є. Механізм впливу низькоенергетичного електромагнітного випромінення на тепличні культури. / Л.Є. Никифорова // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2005. - Вип.31. – С. 47–52.

177. Игнатов В.В. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов, В.И.Панасенко, А.П. Пиренко и др. – Саратов: Из-во ун-та, 1978. – 80с.

178. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения./ Под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Наука, 1981. – 338с.

179. Бруевич А.Н. Фазовая стабильность многокаскадных умножителей частоты / А.Н. Бруевич // Радиотехника, 1961. – Т.21, Вып.63. – С.43 – 48.

180. Жаботинский М.Е. Фазовая нестабильность многокаскадных умножителей частоты / М.Е. Жаботинский, Ю. Л. Свердлов // Радиотехника, 1964. – Вып.74. – С.15-16.

181. Головин Э.С. Некоторые возможности уменьшения паразитной фазовой модуляции в многократных умножителях частоты / Э.С. Головин, Н.И. Петров // Электросвязь, 1967. – Вып.48. – С.54-61.

182. Жаботинский М.Е. Основы теории и техники умножения частоты /М.Е. Жаботинский, И.П. Свердлов – М.: Сов.радио, 1964. – 328с.

183. Бруевич А.Н. Оптимальные углы отсечки многокаскадных умножителей частоты / А.Н. Бруевич // Радиотехника и электроника, 1962. – Т.7; Вып.19 – С.153 – 157.

184. Бруевич А.Н. Спектры в умножителях частоты / А.Н. Бруевич //

Радиотехника и электроника, 1962. – Т.7; Вып 22. – С.1082 – 1090.

185. Мельниченко Л.Е. Компаратор фазовый автоматизированный образцовый / Л.Е. Мельниченко // Радиотехника и электроника. – М.: Наука - №2 - С. 38-45.

186. Порсов В.Н. Исследование стабильности частоты генератора Ганна /В.Н. Порсов, О.Е. Орлов // Электросвязь, 1973. - № 12. – С. 26-41.

187. Свен. Генерация непрерывных колебаний миллиметрового диапазона кремневыми лавинными диодами / Свен, Мисава, Брикер // ТИИЭР, 1967. – Т. 55, № 10. – С. 106-110.

188. Тагер А.С. Лавинно-пролётные диоды и их применение в технике СВЧ/ Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. – М.: Сев. Радио, 1968. – 480 с.

189. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ. Перев. с англ./ Под ред. М. Хауэса, Д. Моргана. – М.: 1979. – 444 с.

190. Haddad G.I. Microwave solid-state active devices / G.I. Haddad, R.J. Trew // IEEE Trans on MTT, 2002. – Vol. 50, № 3. – P. 760-779.

191. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот / В.Ф.Коваленко . – М.: Сов. радио, 1955. – 344 с.

192. Григорьев А.Д. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: численные методы расчёта и проектирования / А.Д. Григорьев, В.Б. Янкевич . – М.: Радио и связь, №184. – 248 с.

193. Войнов Б.С. Широкодиапазонные колебательные системы / Б.С. Войнов . – М.: Сов. радио, 1973. – 303 с.

194. Бухарин В.А. Определение электродинамических характеристик аксиально-симметричных видов колебаний в ассиметричных резонаторах / В.А. Бухарин, А.Г. Третьяков // Ускорители, 1982. – Вып. 21. – С. 18-24.

195. Современное состояние твёрдотельной техники миллиметрового диапазона волн// Электронная техника. Электроника СВЧ, 1975. – Вып. – 6. – 168 с.

196. Nagano S. Highly stabilized impatt oscillators at millimeter Walecnghths /S. Nagano, SOhnako // IEEE Trans on MTT, 1973. -№7. -P. 530-532.

197. Теория линий передачи сверхвысоких частот / под ред. А.Н. Шпунтова. – М.: Сов. радио, 1951. – 263 с.
198. Москалёв И.Н. Диагностика плазмы с помощью открытых цилиндрических резонаторов/ И.Н. Москалёв, А.М. Стефановский – М.: Энергоиздат, 1985. – 144 с.
199. В. М. Черненко Электроника больших возможностей / В.М. Черненко. – М.: Наука, 1965. – 168 с.
200. Дворников А.А. О сложении мощности многих автогенераторов /А.А. Дворников, Г.М. Уткин // Радиотехника и электроника, 1974. - № 3. – С. 550-559.
201. Kurokawa K. Injection locing of microwave solid / K. Kurokawa //State oscillators - Proc. IEEE., 1973. -Vol.61. -P. 1386-1409.
202. .Russel K.J. Microwave power combining techniques / K. J.Russel. //IEEE Trans, 1979. – Vol. MTT. 27, № 5. – P. 472-478.
203. K.Chang. Millimeter – wave power combining techniques / K.Chang, C.Sun // IEEE Trans, 1983. – Vol. MTT. 31, № 2. – P. 91-107.
204. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн – М.: Сов. радио, 1957. – 581 с.
205. Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы / Л.А. Вайнштейн . – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
206. Мартыненко А.И. Электрические методы экспресс-диагностики фитотоксичности гербицидов: автореф. дис.... канд..техн.наук / А.И Мартыненко - М., 1985.- 18с.
207. Мартыненко А.И. Биоэлектрические явления в растении при действии факторов внешней среды / А.И. Мартыненко, В.Е. Начинкин // Труды Кубанского СХИ., 1985. - Вып. 249. - С.65-69.
208. Никифорова Л.Є. Пристрій для експрес-оцінювання стану рослин./ Л.Є. Никифорова, Ю.М. Куценко, Г.П. Селезньов, Г.І. Олійник // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2008. - Вип.8 , Т.2. - С. 139-147.

209. Никифорова Л.Є. Дослідження впливу низькоенергетичного електромагнітного випромінення на насіння тепличних культур. / Л.Є. Никифорова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2008. - Вип.8 , Т.2 – 154с.

210. Никифорова Л.Є. Багатоканальний автоматичний пристрій для діагностування стану сільськогосподарських біооб'єктів / Л.Є. Никифорова //Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь, 2001. – Вип.1,Т.19. – С.89 – 91.

211. Никифорова Л.Є. Аналіз проблеми ідентифікації стану сільськогосподарських біологічних об'єктів. / Л.Є. Никифорова // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. К., 2003. - № 1, - С. 73 – 75.

212. Mink J.W. Qusi – optical power combining of solid – state millimeter – wave sources / J.W.Mink // IEEE Trans., 1986. – Vol. MTT. 34, № 2. – PP. 273-379.

213. М.С. Винарский. Планирование эксперимента в технологических исследованиях/ М.С. Винарский, М.В. Лурье. – М.: Техника, 1975. – 168 с.

214. Петербургский А.В. Практикум по агрохимической химии/ А.В. Петербургский . – М.: Колос, 1968. – 87 с.

215. Плешков В.П. Практикум по биохимии растений / В.П. Плешков . – М.: Колос, 1976. – С. 18.

216. Радов А.С. Практикум по агрохимии/ А.С. Радов, Н.В. Пустовой, А.В. Корольков . – М.: Колос, 1978. – 207 с.

217. Шлык А.А. Биохимические методы в физиологии растений / А.А. Шлык, Г.И. Годнев – М.: Наука, 1981. – 65 с.

218. Никифорова Л.Є. Алгоритми для автоматичного діагностування стану сільськогосподарських біооб'єктів. / Л.Є. Никифорова // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. - Харків, 2001. – Вип 6.– С. 415 – 418.

219. Никифорова Л.Є. Шляхи універсалізації алгоритмів машинної

діагностики стану сільськогосподарських біологічних об'єктів. / Л.Є. Никифорова // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь, 2002. – Вип.8.-С. 52–55.

220. Мартыненко И.И. Средства информационного обеспечения автоматизации полива в сооружениях защищенного грунта / И.И. Мартыненко, Л.Е. Никифорова // Сб.науч.тр.: Автоматизация сельскохозяйственного производства. – М., 2004. Ч.1- С. 183-190.

221. Мартиненко І.І. Низькоенергетичні електромагнітні технології в закритому ґрунті./ І.І. Мартиненко, Л.Є. Никифорова // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – К., 2005. - № 11. - С. 85 – 88.

222. Мартыненко И.И., Никифорова Л.Е. Инновационная технология низкоэнергетической электромагнитной обработки семян // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К.: КПІ, 2007. - № 3, С 25-28.

223. Никифорова Л.Є. Техніко – економічна ефективність низькоенергетичних електромагнітних технологій активації тепличних культур / Л.Є. Никифорова // Проблеми енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. - Харків, 2006. – Вип.43, Т1 – С. 162-165.

224. Никифорова Л.Є. Стимулюючий вплив на овочеві культури низькоенергетичного електромагнітного поля./ Л.Є. Никифорова // Праці. Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2004. - Вип.19 – С. 80-83.