Министерство образования и науки Украины
Таврический государственный агротехнологический университет

На правах рукописи

СИЛИ ИВАН ИВАНОВИЧ

УДК 621.341

ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННАЯ РАДИОИМПУЛЬСНАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УНИЧТОЖЕНИЯ ВРЕДИТЕЛЕЙ КАРТОФЕЛЯ

05.11.17 – биологические и медицинские устройства и системы

Диссертация на соискание научной
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Федюшко Юрий Михайлович
доктор технических наук, профессор

Мелитополь – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ..... 4
ВВЕДЕНИЕ..... 5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ
ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ВРЕДИТЕЛЕЙ КАРТОФЕЛЯ..... 11
1.1. Народнохозяйственное значение картофеля.....11
1.2. Экономическое значение по влиянию вредных насекомых
на урожайность культурных растений..... 12
1.3. Характеристика и физиологические особенности колорадского жука.....14
1.4. Методы борьбы с колорадским жуком.....21
1.5. Использование электромагнитных излучений
в растениеводстве и ветеринарии..... 27
1.6. Обоснование угнетающего действия электромагнитного поля
на особи колорадского жука.....29

1.7. Анализ технических и энергетических особенностей систем электромагнитного излучения для угнетения колорадского жука..... 31
Выводы по разделу..... 37
РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОЛОРАДСКИМИ ЖУКАМИ В РАСТИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ КАРТОФЕЛЯ..... 39
2.1. Постановка электродинамической задачи о взаимодействии радиоимпульсов со слоем растительной среды картофеля..... 39
2.2. Алгоритм решения задачи о взаимодействии радиоимпульсов со слоем растительной среды картофеля..... 43
2.3. Расчет усредненного электромагнитного поля в растительном слое картофеля..... 57
Выводы по разделу..... 69

РАЗДЕЛ 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА СВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ БОРЬБЫ НАСЕКОМЫМИ-ВРЕДИТЕЛЯМИ КАРТОФЕЛЯ..... 71
3.1. Обоснование гибридно-каскадной схемы суммирования мощностей в генераторах на лавинно-пролётных диодах..... 71
3.2. Анализ геометрических и энергетических параметров синхронизирующего генератора на лавинно-пролетных диодах, стабилизируемого по частоте резонатором проходного типа ……..76
3.3. Теоретический анализ антенной системы с определением её параметров..... 87
Выводы по разделу..... 116
РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УНИЧТОЖЕНИЮ КОЛОРАДСКИХ ЖУКОВ И ЕГО ЛИЧИНОК..... 117
4.1. Цель и задачи экспериментальных исследований.....117
4.2. Разработка и анализ технических параметров синхронизирующего генератора..... 117
4.3. Экспериментальные исследования энергетических и спектральных характеристик многодиодного генератора сантиметрового диапазона..... 121
4.4. Экспериментальное исследование характеристик широкополосной антенны..... 124
4.5. Лабораторные и полевые исследования с колорадским жуком.....130
Выводы по разделу..... 135
ВЫВОДЫ..... 137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... 139
ПРИЛОЖЕНИЕ А..... 153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... 159

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭМП – электромагнитное поле;
ЭМИ – электромагнитное излучение;
КПД – коэффициент полезного действия;
СМ – сантиметровый диапазон;
ГЛПД – генератор на лавинно- пролётном диоде;
ЛПД – лавинно-пролётный диод;
ДП – диэлектрическая проницаемость;
ЭДП – энергетическая диаграмма направленности;
КСВ – коэффициент стоячей волны;
СВЧ – сверхвысокая частота;
КВЧ – крайневысокая частота;
ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота;
ШП – широкополосный;
ЭП – электрическое поле.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В сельскохозяйственном производстве Украины важное место занимает выращивание картофеля, так как картофель содержат необходимые вещества для организма человека: витамины, органические кислоты, микроэлементы и др. Кроме того, картофель, прежде всего превосходный продукт питания. Из него готовят сотни разных блюд и продуктов. Благодаря высокому содержанию углеводов и прежде всего крахмала картофель в значительной мере восполняет потребности человека в калориях. 1 кг картофеля способен дать до 830 ккал. Картофель широко используется и как сырьё для крахмально-паточной, спиртовой и ряда других отраслей.

Поэтому с повсеместным выращиванием картофеля возрастают и требования по защите его от насекомых-вредителей, которые влияют на

качество и количество урожая. Самым опасным вредителем картофеля является колорадский жук. Колорадский жук наносит огромный вред урожаю картофеля. За короткий промежуток времени жуки и их личинки питаясь листьями и стеблями картофеля, могут уничтожить весь куст, в результате чего урожай резко снижается. При средней численности от 20 до 40 личинок жуков на куст картофеля листья уничтожаются полностью, урожай снижается в 15...20 раз, либо совсем отсутствует.

Кроме того, жука также считают переносчиком зловредных картофельных нематод.

В настоящее время в Украине для уничтожения колорадского жука применяют только химические препараты: хлорофос, полихлорпинен, полихлоркамфен, гамма-изомер, дилор, фталофос и др. Применение химических препаратов вызывает обеднение биоценоза, загрязнение биосферы, появление устойчивых к пестицидам вредителей, повышение плодовитости отдельных насекомых, хрущей и др. Химические препараты, попадая в организм человека через клубни картофеля, снижают иммунитет, поражают печенку и другие органы, что приводит к разным заболеваниям, раннему старению.

Производство чистых продуктов питания, в том числе и картофеля, возможно только при полном отказе от применения ядохимикатов для уничтожения колорадского жука. Следовательно, для сохранения и повышения урожайности картофеля нужны другие подходы, основанные на применении энергоинформационной радиоимпульсной технологии для уничтожения колорадского жука.

Научные и практические исследования последних лет показывают, что альтернативой химическому методу защиты растений может быть метод на основе экологически безопасной и эффективной энергоинформационной радиоимпульсной технологии. Угнетение колорадского жука радиоимпульсным излучением связано не только с процессом высокой скорости нарастания температуры в объекте, но и с информационным действием радиоимпульсного излучения на мембраны клеток насекомых.

Практические результаты показывают, что при определенных параметрах радиоимпульсного излучения (частота следования импульсов, скважность, мощность, частота заполнения импульсов, модуляционные параметры, экспозиция) может происходить разрушение клеточных мембран и гибель жука и его личинок. В то же время, проведенный анализ литературных источников показывает, что в них недостаточно изучен вопрос создания моделей, способных дать аналитическое описание процессов, происходящих в насекомых-вредителях картофеля, отсутствует методология определения численных значений биотропных параметров радиоимпульсного излучения, недостаточно проведены исследования по созданию антенной системы со специальной диаграммой направленности. Таким образом, исследования и разработка метода энергоинформационной радиоимпульсной биотехнологии и электронных систем для уничтожения колорадского жука и его личинок является, несомненно, актуальной задачей.

Связь работы с научными программами, планами. Тема диссертационной работы связана с общими Украинскими программами: постановлением Президента Национальной академии наук Украины от 25.02. 09 г. №55 «Основні наукові напрямки, найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009 – 2013 роки»; постановлением Кабинета Министров Украины «Про основні напрямки державної аграрної політики на період до 2015 р.». По планам НИР и ОКР Таврического государственного агротехнологического университета были выполнены следующие работы: «Разработка средств для обеспечения продовольственной безопасности южного региона Украины», номер ГР №012U000678; «Імпульсні електромагнітні технології і пристрої для знищення шкідників-комах у сільськогосподарському виробництву», ГР №0110U002503.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является создание энергосберегающей, экологически чистой и эффективной энергоинформационной радиоимпульсной технологии и радиоимпульсной электронной системы излучения для угнетения жизнедеятельности колорадского жука и его личинок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ биологических характеристик колорадского жука и методов и его угнетения;
- обосновать биофизическое действие радиоимпульсных излучений с целью угнетения колорадского жука и его личинок;
- разработать модель взаимодействия радиоимпульсного излучения с колорадским жуком;
- на основе теоретических исследований определить биотропные параметры радиоимпульсного излучения для угнетения колорадского жука и его личинок;
- провести теоретическое обоснование по созданию высокостабильных по частоте радиоимпульсных источников электромагнитной энергии на лавинно-пролетных диодах на основе внешней синхронизации сигналом генератора стабилизированного по частоте высокодобротным резонатором;
- провести исследования характеристик синхронизирующего генератора, стабилизированного по частоте высокодобротным резонатором проходного типа;
- провести теоретический анализ антенной системы радиоимпульсного излучения с определением её параметров;
- провести производственную проверку теоретических и экспериментальных исследований по угнетению колорадского жука и его личинок энергоинформационным радиоимпульсным излучением.

Объект исследования. Процесс влияния энергоинформационных радиоимпульсных излучений на жизнедеятельность колорадского жука и его личинок.

Предмет исследования. Энергоинформационная радиоимпульсная биотехнология и электронные системы для угнетения репродуктивной способности колорадского жука .

Методы исследования основываются на способах решения дифференциальных интегральных и алгебраических уравнений различного типа; теоретические положения электродинамики, биофизики; основах электроники и схемотехники; математических методах планирования полнофакторного эксперимента.

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

- впервые, на основе разработанной модели, теоретически исследован процесс влияния энергоинформационных радиоимпульсных излучений на жизнедеятельность колорадского жука и определены биотропные параметры радиоимпульсного излучения для угнетения его репродуктивных свойств;
- получила дальнейшее развитие теория анализа синхронизирующего генератора с высокодобротным резонатором проходного типа для стабилизации частоты, отличающая от известных тем, что в ней элементы связи резонатора связаны с его добротностью и параметрами резонансной волноводной системы генератора;
- получила дальнейшее развитие теория анализа широкополосных антенн, которая отличается от известных тем, что в ней обоснованы параметры для излучения радиоимпульсов сантиметрового диапазона с величиной длительности импульсов;
- впервые математически интерпретировано влияние биотропных параметров энергоинформационного радиоимпульсного излучения сантиметрового диапазона на угнетение жизнедеятельности колорадского жука и его личинок.

Практическое значение результатов диссертационной работы состоит в том, что полученные результаты формируют научно-техническую базу по созданию радиоимпульсной биотехнологии и электронной системы для угнетения колорадского жука и его личинок.

Применение радиоимпульсной биотехнологии для борьбы с колорадским жуком позволит исключить химические препараты и повысить урожайность картофеля на 15...17% по сравнению с контролем.

Результаты исследований апробированы в 2013...2015 гг. в хозяйствах Сахновщинского района Харьковской области. Экономическая эффективность от внедрения радиоимпульсной технологии по угнетению жизнедеятельности колорадского жука составила 25 тыс./га.

Личный вклад соискателя в научных работах, написанных в соавторстве, состоит в следующем:

- в работе [130] автору принадлежать теоретические исследования по определению параметров широкополосной антенны.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на: 6 міжнародної науково-технічної конференції пам’яті І. І. Мартиненко

«Енергозабезпечення технологічних процесів в Агропромисловому комплексі України» (Мелітополь, ТДАТУ, 2015 р.); международной научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технологии, образование, здоровье» (Харьков, НТУ «ХПИ», 2014 г.); научно-практической студенческой конференции «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, ХНТУСХ, 2015 р.); международных научно-практических конференциях «Проблемы энергообеспечения и энергосбережения в АПК Украины» (Харьков, ХНТУСХ, 2014 г.); международной студенческой конференции «Проблемы энергообеспечения» (Белгород, БелГСХА, 2014 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в научно-технических сборниках, 2 статьях в научно-технических журналах и 3 тезисах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ВРЕДИТЕЛЕЙ КАРТОФЕЛЯ

1.1. Народнохозяйственное значение картофеля

Среди всех продовольственных культур, картофель, занимает важное место в жизни человека. Широкому распространению картофеля способствовали его вкусовые и питательные свойства. Главным показателем качества и ценности картофеля является его химический состав [1...3]. Химический состав клубней колеблется в довольно широких пределах и зависит от ряда факторов: сорта, степени зрелости, почвенных и климатических условий. Так содержание воды в клубнях колеблется от 64 до 86%, соответственно содержание сухих веществ равно 14...36%. Из сухих веществ клубня можно выделить следующие компоненты: 18,5% крахмала, 0,8% сахара, 1,5% пентозанов и пектиновых, 1,0% клетчатки, 2,0 % азотистых веществ, 0,2% жира и 1% золы. Азотистые вещества картофеля состоят, прежде всего, из белков (примерно 1,5%). Белок картофеля (туберин) содержит все необходимые организму человека аминокислоты. Из литературных источников следует, что клубни картофеля содержат витамины А (в виде керотина), B_1, B_2, B_6, С, РР, фолиевую кислоту и органические кислоты. Минеральные вещества представлены солями магния, кальция, железа, фосфора, йода. В 300 г картофеля содержится: витамина А – 1,5 мг, B_1 – 1,6 мг, B_2 – 1,7 мг, РР – 15 мг, С – 70 мг, кальция 1 г, калия 400 мг, фосфора 1,5 г, железа 10 мг.

Картофель является одновременно пищевой, технической и кормовой культурой [1].

В пищевой промышленности картофельные продукты находят самое широкое применение [1, 2]. Из картофеля готовят сотни различных блюд и продуктов. В качестве полуфабрикатов готовят сушёный картофель, скоростное пюре, чипсы и крекеры, замороженные котлеты и гарнир.

Картофель является прекрасным кормом для домашнего скота и птицы [1].

Ценность корма состоит в том, что в 100 кг картофеля содержится 30 корм.ед. и 0,9 кг перевариваемого белка. Урожай картофеля 200 ц/га может обеспечить надой молока до 120 ц или откорм десяти свиней до 140...150 кг живого веса каждый.

Картофель является важным техническим сырьём для производства крахмала и спирта, из которых производят патоку и глюкозу, клей, витамин С, синтетический каучук, медикаменты и десятки других ценных продуктов [1, 2]. Из одной тонны картофеля можно получить 170 кг крахмала или 80 кг глюкозы. Из той же тонны картофеля можно выработать 112 л этилового спирта, 55 кг

жидкой углекислоты и в качестве отхода получить ещё 1500 кг барды на корм скоту.

1.2. Экономическое значение по влиянию вредных насекомых на урожайность культурных растений

Вредные насекомые уже несколько тысячелетий наносят значительный ущерб сельскому хозяйству. Еще в давние времена вредная деятельность насекомых нередко была столь существенной, что вызывала не только голод, но и глубокие социально-экономические преобразования во многих странах [4]. Несмотря на эффективные средства защиты растений, предоставленные в распоряжение работников сельского хозяйства в последние десятилетия, отрицательная роль насекомых еще очень велика. В наиболее полной сводке об экономическом значении насекомых в сельском хозяйстве потери от вредителей оцениваются в 29,7 млрд. долл., или в 13,8% от потенциального мирового урожая ежегодно [5].

Департамент сельского хозяйства США оценивает потери урожая сельскохозяйственных культур только от вредных насекомых в 4 млрд. долл. [6]. Такие потери несет сельское хозяйство страны, в которой расходуется более 160 тыс. т. пестицидов общей стоимостью 560 млн. долл. [7].

По подсчетам специалистов ФАО, потенциальные потери урожая от вредных организмов в 1987 г. равнялись примерно 20%, а в 1997 – 35%, несмотря на все возрастающие затраты на защиту растений. Относительная доля затрат на защиту растений по сравнению с общей стоимостью продукции растениеводства также возрастает. В 1980 г. составила около 0,4 %, а в 1990 более 2%. В США стоимость использованных пестицидов в 1995 г. составляла около 1% от общей стоимости продукции растениеводства, а в 1998 г. эта цифра увеличилась до 4,6%.

В настоящее время картофельный колорадский жук распространён по территории Украины повсеместно. Ущерб наносимый колорадским жуком сельскому хозяйству, в первую очередь картофелеводству, огромен [8...10]. За короткий промежуток времени жуки и их личинки питаясь листьями и стеблями картофеля, могут уничтожить весь куст, в результате чего урожай резко снижается. Одна личинка, пока она пройдёт все стадии развития, съедает около грамма листьев. Взрослый жук – столько же.

Ущерб, наносимый картофелю колорадским жуком, определяется многими его особенностями:

- высокая плодовитость – одна самка может отложить за один раз до 1000 яиц;
- за лето развивается до трёх поколений;
- жук прекрасно летает;
- колорадский жук быстро приспосабливается к ядохимикатам.

Так что пока вредоносность колорадского жука не снижается, а растёт из года в год. И до настоящего времени неясно, можно ли уничтожить его вообще или хотя бы свести его численность к минимуму.

1.3. Характеристика и физиологические особенности колорадского жука

Колорадский жук – биологически пластичный вид, обладающий высоким адаптивным потенциалом, как к агроклиматическим условиям, так и кормовой базе [11...15]. Это позволяет ему развиваться в самых разных условиях окружающей среды. Темпы прохождения популяцией развития и размножения (пробуждения и динамика выхода из почвы перезимовавших жуков, длительность дополнительного питания и спаривания, интенсивность откладки яиц, продолжительность периода эмбрионального развития и появления личинок, сроки линьки и перехода их в более старший возраст, ухода личинок на окукливание в почву, продолжительность превращения их в жуков, сроки выхода жуков на поверхность, дополнительного питания и ухода на зимовку) зависят от многих факторов, но основными являются обеспеченность кормом и температурно-влажностный режим среды обитания [11,16...18].

Колорадский жук повреждает картофель, помидоры, баклажаны, перцы и другие пасленовые культуры. Тело взрослого насекомого овальное, сверху выпуклое, снизу плоское, блестящее, красно-желтое с более светлыми надкрыльями. На каждом надкрылье пять черных полосок. Длина жука – 6...7 мм. Яйца размером от 1,5 до 1,8 мм, удлиненно-овальной формы. Цвет яиц в процессе эмбрионального развития меняется от лимонно-желтого до темно-оранжевого. Личинки червеобразные, сверху особенно в средней части, выпуклые, снизу – плоские. В первом возрасте серые или темно-коричневые, во втором – преимущественно красные, в третьем и четвертом – оранжево-желтые. Длина личинок от 1,5 до 14...16 мм. Куколки в начале развития оранжево-желтые, в конце красные. По форме тела напоминают жуков, длина их в среднем достигает 10 мм, ширина – 6 мм [13, 15, 17].

Часть жизни вредителей протекает в почве. В ней они зимуют на глубине 20...30 см, укрываются при похолодании и жаре. Выход из мест зимовки начинается, когда почва на глубине их залегания прогревается до 14...15°С. Основная масса перезимовавших жуков (до 75%) выходит в течение 20... 60 дней, что растягивает откладку яиц и рождение личинок [11, 16, 18].

В сохранении вида большое значение имеют, наряду с зимней диапаузой, еще 5 типов физиологического покоя. Это – зимняя спячка жуков, которая сменяет зимнюю диапаузу в случае наступления весной холодного периода (она обеспечивает поддержание особями низкого уровня обмена веществ и проявление холодозащитных реакций); летний сон, которому подвергается среди лета на срок от 1 до 10 дней до половины всех перезимовавших особей; летняя диапауза, близкая по физиологическому механизму к зимней диапаузе (

она охватывает в наиболее жаркий период лета часть перезимовавших жуков на срок от 11 до 36 дней); повторная диапауза, проявляющаяся в конце лета у зимовавших жуков, выживших до осени; многолетняя диапауза, которая продолжается без перерыва 2 – года у небольшой части особей, главным образом первой генерации [19...24]. Весной, когда почва на глубине зимовки прогреется до 12...14°, а температура воздуха до 22...25°, начинается массовый выход жуков. Из легких песчаных и супесчаных быстро прогревающихся почв массовый выход жуков проходит на 5...7 дней раньше, чем из более тяжелых. Этому способствует хорошее увлажнение почвы, особенно теплые дожди. Выход жуков чаще бывает дружным (10...15 дней), хотя иногда растягивается на 2 – месяца. В южных регионах вредитель обычно появляется в апреле – первой половине мая, в средней полосе – во второй половине мая – начале июня. Начало выхода жуков на поверхность почвы часто опережает появление всходов картофеля. В поисках пищи жуки активно переползают, а в теплую (21 ° и более) и солнечную погоду перелетают на значительное расстояние [19...21].

После нескольких дней питания и спаривания самки начинают откладывать яйца плотными кладками, в среднем по 25...30 шт. (иногда 1000 и более), как правило, на нижней стороне листьев. Однако в том случае, когда спаривание и оплодотворение самок произошло осенью, еще до того, как они ушли на зимовку (это касается и самок, находящихся в многолетней диапаузе), спаривания весной может и не быть. Яйцекладка длится от нескольких недель до 3...4 месяцев, наиболее интенсивна она в июне-июле. За вегетационный период одна самка откладывает в среднем 500...800 яиц, реже – более 1000. Оптимальная для яйцекладки температура около 25°, относительная влажность воздуха 60...70%. Понижение и повышение температуры резко снижают плодовитость самок, а при похолодании ниже 12° откладка полностью прекращается [25, 26].

Продолжительность развития разных фаз насекомого тоже сильно зависит от погодных условий. Так, по данным многих исследователей, которые изучали биологию вредителя в разных зонах его распространения, эмбриональное развитие яиц при среднесуточной температуре воздуха 15...16 ° С продолжается 10...12 суток, а при 22...23 °С – 6...7 суток; развитие личиночной стадии соответственно 22...25 и 11...13 суток, куколка – 24...27 и 13 ...15 суток. Полный цикл развития генерации (от яйца до имаго) может пройти за один-два месяца [17, 18, 25, 26]. Отродившиеся личинки 1-го возраста в течение первых 2...3 дней находятся, как правило, на нижней стороне листьев, вокруг яйцекладки, в дальнейшем расселяются по периферии куста в верхнем ярусе листьев. Личинки 2-го возраста в основном концентрируются на растущих листьях стеблей («розетка роста стеблей»). Личинки 3...4-го возрастов обитают на всех частях растений. Окукливание личинок 4-го возраста происходит в почве на глубине 5...8 см, реже – более 10 см, как правило – в борозде между рядками растений картофеля. Вышедшие из почвы молодые жуки сосредотачиваются на ближайших кустах, в том числе на тех, где

питались и личинки. Они мягкие, их надкрылья прозрачные, и они не могут летать. После 2...3 дней интенсивного кормления молодые жуки приобретают свойственную имаго окраску и твердость хитинового покрова, а также способность к полету. Через 1...2 недели активность питания и спаривания часть популяции самок в благоприятных погодных условиях и при наличии кормовой базы начинает откладывать яйца, остальные, не приступая к яйцекладке, уходят в почву на зимнюю диапаузу. Плодовитость самок летних генераций меньше, чем перезимовавших.

С наступлением похолоданий все оставшиеся физиологически подготовленные жуки уходят на зимовку в почву, в основном в борозды, а недопитавшиеся могут остаться на поверхности почвы или под растительными остатками, где погибнут в осенне-зимний период.

Многочисленными наблюдениями за динамикой развития и численности популяции колорадского жука в разные годы и в разных агроклиматических зонах ареала установлено, что максимальная плотность особей приходится на период массового появления личинок 3...4-го возрастов и совпадает, как правило, с фенофазой «бутонизации – цветение» растений картофеля, то есть с периодом начала формирования урожая. В это время посадки наиболее чувствительны к повреждениям поэтому уничтожать вредителя надо как можно раньше, лучше всего в период массового появления личинок 1...2-го возрастов. Кстати, этот срок обработок выгоден и тем, что личинки младших возрастов наиболее чувствительны к применяемым интексицидам [25, 26].

Колорадский жук, является пойкилотермным животным, то есть не имеющим постоянной температуры тела, не только в развитии, но и в самом существовании зависит от климатических условий места обитания [11, 19, 21]. Это, прежде всего, тепло, влага и свет. Определенное влияние оказывает механический состав почвы. Смертность зимующих жуков способствуют как низкие температуры почвы в горизонтах их массовых залеганий, так и продолжительность их воздействия. Практически 100% гибель особей наблюдается после пребывания жуков от нескольких часов до 2...3 дней при температуре минус 8°...10°. Для колорадских жуков также губительны резкие колебания весенних температур почвы, которые стимулируют преждевременный выход жуков зимней диапаузы, а также повышенная влажность почвы. Понижение температуры и сухость почвы, тяжелый механический состав и уплотненность задерживают выход имаго и заселение всходов картофеля жуками на 2...3 недели и, следовательно, снижают потенциальную численность популяции вредителя в результате сокращения продолжительности ее развития [11, 18].

Оптимальны для развития вредителя от яйца до имаго температура воздуха около 24...26° относительная влажность воздуха 60...75%. Если эти показатели ниже 14° и 40% или выше 26...27° и 80% развития популяции замедляется. При температуре более 35...37° начинается гибель яиц и личинок от перегрева. Оптимальная для развития личинок стадии длина светлого дня –около 17 ч.

Существенно снижает численность отродившихся личинок (нередко на 25%) как дождливая холодная, так и жаркая сухая погода. Значительную гибель личинок младших возрастов вызывают интенсивные осадки и сильный ветер из -за того, что, упав на землю, в поисках корма (растения картофеля) насекомые не могут перемещаться на расстоянии 5…10 см. По наблюдениям ряда исследователей при низких температурах личинки 4-го возраста иногда, не закончив питания, уходят в почву на окукливание, и, как правило, погибают [25 , 26].

На превращение личинок 4-го возраста и куколок в молодых жуков влияет влажность почвы картофельного поля. При избыточном насыщении водой окукливание происходит в самых поверхностных слоях почвы или на ее поверхности и сопровождается большой гибелью. Не менее опасна для метаморфоза личинок в жуки сухость, если почва горячая и уплотненная. Часть популяции личинок не способны зарыться в нее, и погибает на поверхности, окуклившаяся – часто не может перелинять на имаго, а отродившиеся жуки – выбраться на поверхность. Все окрылившиеся в таких неблагоприятных условиях жуки менее жизнеспособны, у самок снижается плодовитость.

Наиболее благоприятны для зимовок жуков легкие песчаные и суперпесчаные почвы.

Интенсивность размножения и скорость развития колорадского жука в значительной степени определяется и качеством корма. Имаго и личинки могут питаться листьями многих растений семейства пасленовых, в том числе диких (сорных) видов. Однако наиболее предпочитаемым является культурный картофель. В этой связи широкое возделывание сортов, обладающих разнообразным механизмом устойчивости на широкой генетической основе, служит существенным фактором не только снижение численности вредителя в местах его распространения, но и сдерживания дальнейшего расселения [17, 19, 21]. Установлено также, что, чем старше возраст растений картофеля, тем ниже их кормовая ценность для летних генераций вредителя [21, 22]. В горячей сухой почве куколки часто не могут перелинять на имаго, а отродившиеся жуки не могут выбраться на поверхность почвы.

Условия низкой влажности среды не только вызывают высокую смертность куколок во время метаморфоза, но и оказывают большое влияние на дальнейшую жизнедеятельность окрылившихся жуков, значительно снижая плодовитость самок.

Полный цикл развития одной генерации от яйца до имаго у колорадского жука на полях продолжается разное время в зависимости от климатической зоны и погодных условий года [25, 26]. Оптимальными условиями для развития колорадского жука при его содержании в лаборатории можно считать температуру 25°, при относительной влажности воздуха 70% и длине дня 16…18 час. Для завершения последних стадий эмбрионального развития и выхода личинок из яиц необходима температура не ниже 14…15°, но процесс эмбриогенеза в этих условиях проходит очень медленно. Нормальное развитие зародыша идет при температуре от 17 до 33°С. Наиболее оптимальной является

температура 22…25°С при относительной влажности 70…75%. С понижением температуры за 20°С процессы эмбриогенеза сильно замедляются. При средней суточной температуре 20…24°С развитие яиц продолжается около 7 суток, а при температуре 25…30°С оно заканчивается на 5…5,5 суток. Температура выше 35…36°С вызывает гибель большей части зародышей на самых ранних этапах эмбриогенеза. По-видимому, именно этим объясняется то, что самки обычно откладывают яйца на нижнюю сторону листьев, где они не подвергаются прямому воздействию солнечной радиации и высокой температуры. На верхней стороне листьев и стеблях кормовых растений яйца можно обнаружить очень редко. Следует отметить, что очень высокая (выше 80…85%) и низкая (ниже 40…45%) относительная влажность воздуха отрицательно сказывается на эмбриональном развитии колорадского жука.

Скорость развития личинок также определяется температурой, но для этой стадии большое значение приобретает и кормовой фактор – количество и качество корма [21, 22, 27…29]. В работах [30…34] показано, что развитие личинок может начинаться при температуре около 11…13°С, которая может меняться с возрастом: у личинок I…III возрастов он составляет 10,8°С, у личинок IV возраста – 10,3°С. Оптимальная для развития личинок температура находится в пределах 23…28°С, в этом интервале продолжительность стадии личинки составляет при температуре 28° – 9,2…9,5 дней, а при температуре 24 °С – 13,5 дней. При понижении температуры до 18°С развитие личинок растягивается до 24 дней, а при 15°С – до 32 дней. Верхним температурным пределом нормального развития личинок является температура 37…38°С. Выше этого предела наблюдается сначала признаки беспокойства, а затем беспорядочное движение. При 46…48°С наступает тепловое оцепенение питающихся стадий (личинок и имаго) колорадского жука, более высокая температура (48…55°С) вызывает гибель личинок через короткое время, измеряемое минутами. В зависимости от температуры фаза предкуколки может продолжаться от 3 до 10…15 дней, а стадия куколки от 6 до 16 дней. Оптимальной для развития куколки является температура 22…27°, при которой метаморфоз заканчивается через 5 дней. Понижение температуры до 18° замедляет развитие куколки до 10…16 дней. Превращение личинок в предкуколку и куколку и метаморфоз куколок колорадского жука происходит в почве, на глубине 3…5 см, в связи с чем на этих стадиях особое значение приобретает влажность почвы. Сильная насыщенность почвы водой препятствует проникновению личинок на обычную для них глубину, и их окукливание в таких случаях наблюдается в самых поверхностных слоях почвы или на ее поверхности, сопровождаясь большой гибелью. Обильные дожди в период окукливания приводят к большой смертности предкуколок, куколок и молодых жуков. Не менее опасна для развивающихся личинок в период их окукливания и большая сухость воздуха. После длительного пребывания в условиях низкой влажности (около 30 %) закончившие питание личинки неспособны зарыться в почву и погибают.

1.4. Методы борьбы с колорадским жуком

Биологические особенности колорадского жука показывают, что он хорошо приспособлен к различным климатическим условиям и наносит ощутимый вред картофелю. Поэтому борьба с ним сложна и требует проведения комплекса мероприятий. Наиболее известными методами истребления колорадского жука являются: агротехнический, механический, биологический, химический и физический.

Агротехнический метод борьбы с колорадским жуком основан на применении таких агроприёмов, которые улучшают рост и развитие защищаемых растений, что способствует повышению их устойчивости к повреждениям; и тем самым затрудняет и ухудшает условия жизни вредителя, уменьшают его численность [35…41]. Вредоносность колорадского жука уменьшается, если посажены здоровые и качественные клубни, налажен оптимальный и агротехнически грамотный уход за посадками. Например, если в период яйцекладки жуков растения высоко окучивали, то яйца и личинки на нижних листьях будут засыпаны землей и частично погибнут. Рыхление междурядий через 3…4 дня, после ухода личинок в почву, травмирует развивающихся куколок и нарушит условия их развития. При перекопке почвы на глубину 25…30 см также погибает много личинок. Вместе с этим собирают и уничтожают выкопанных с землей взрослых жуков.

Для успешной борьбы с жуком механическим методом важно своевременно обнаружить его, собрать и уничтожить [42…46]. Для этого, как только начнут появляться всходы картофеля, надо регулярно и тщательно осматривать не только растения, но и окружающую их почву. Найденных жуков, яйцекладки и личинки собрать в посуду с насыщенным раствором поваренной соли, формалина или керосина и уничтожить.

В борьбе с колорадским жуков предпочтение надо отдать биологическим средствам [47…52]. Они не причиняют вреда человеку, теплокровным животным, птицам и полезным насекомым, позволяют избегать нежелательных изменений в природе, сохранять полезные организмы, предотвращать загрязнения воздуха, почвы, воды и растений и в конечном итоге дают возможность получить экологически чистую продукцию. На численность колорадского жука влияют хищные и паразитические членистоногие, энтомопатогенные бактерии, грибы и нематоды. Список энтомофагов этого насекомого насчитывает 293 вида, из них 23 – паукообразные и 270 – насекомые. Из местных активных многоядных хищников заметную роль играют жужелицы, златоглазка, кокцинеллиды и пауки. В целом они снижают численность вредителя на 20…25%. Комплекс природных энтомопатогенов, способных вызывать эпизоотии колорадского жука, включает представителей более 25 родов грибов, бактерий, простейших и актиномицетов [17, 45, 51].

Естественное регулирование численности популяций вредителя под влиянием комплекса природных полезных организмов в Украине пока еще не набрало силы.

В качестве биологических средств можно применить «Агравертин», «Бикол», «Битоксибациллин», «Колорадо», «Фитоверм». «Битоксибациллин» применяют при температуре не ниже 18 °С в дозе 40…100 г на 10 л воды с интервалом 7…10 дней 2…3 раза за сезон, а при использовании таблеток (4…10 таблеток на 10 л воды) – до 4-х раз. После опрыскивания личинки становятся вялыми, малоподвижными, почти не питаются. В это время в их кишечнике прорастают споры бактерий «Битоксибациллина», которые бурно развиваются, и вскоре личинки превращаются в мешочки, набитые спорами. Из этих личинок могут появиться уродливые жуки, которые не способны к дальнейшему размножению, но вызывают настоящую эпидемию среди здоровых вредителей.

«Биколом» опрыскивают 2…3 раза за сезон против каждого поколения жуков в дозе 20 г на 10 л воды с интервалом 7…8 дней. «Колорадо» за сезон опрыскивают 1…2 раза против каждого поколения жуков с интервалом 5…7 дней в дозе 130…160 г на 10 л воды.

«Фитоверм» – биопрепарат нового поколения. Проникая в организм личинок и жуков контактным или кишечным путем, он вызывает вначале паралич, а на 3…6 сутки погибают. Препарат не действует на яйца жука, и если из них появляются личинки, то обработку повторяют. Опрыскивание ведут в ясную погоду, после схода росы, при температуре не ниже 18 °С. «Агравентин» аналогичен «Фитоверму», но его можно применять и при более низкой температуре – 12 °С.

В отечественной энтомофауне довольно много видов, питающихся яйцами, личинками или имаго колорадского жука. Это в основном различные златоглазки кокцинеллиды. В центральной и Южной Америке известны специализированные паразиты яиц, а также активные хищники личинок жука. Неоднократно предпринимались попытки акклиматизации их, но попытки оказались безуспешными. Сезонная колонизация энтомофагов рентабельна только на дорогостоящих культурах, например, на раннем картофеле или баклажанах. На этой культуре применение хищных клопов-щитников (подизуса и пикромеруса) высокоэффективно и вполне целесообразно.

Следует отметить, что при биологических методах борьбы с колорадским жуком отмечено образование очагов инфекционного заражения насекомого в верхних слоях почвы, в том числе после применения грибных и нематодных биопрепаратов. Прослеживается и адаптация к питанию яйцами, личинками и имаго колорадского жука к местным энтомофагов.

Если биологические средства не помогают, то приходиться использовать химический метод уничтожения колорадского жука и его личинок [53…59].

В настоящее время химических препаратов для борьбы с колорадским жуком довольно много. Из них следует выделить наиболее популярные: «Актара», «Банкол», «Десиц Экстра», «Конфидор», «Регент», «Сонет», «Сэмпай». Норма расхода рабочей жидкости – 1 л на 10 кв.м. Обработку

проводят в ранние утренние (до 10.00) или вечерние часы (после 18.00) в безветренную погоду. При опрыскивании в жаркую погоду и в дневное время препарат большей частью испаряется, не достигая растений Повышение концентрации и расхода эффект не усиливает, но приводит к накоплению в клубнях и окружающей среде вредоносных веществ.

Среди зарубежных химических препаратов для уничтожения колорадского жука следует выделить следующие препараты [59, 60]: «Актелик» , «Арриво», «Карата», «Кинмикс», «Сумицин» «Цимбуш».

Актелик, 50%-ный концентрат эмульсии.

Инсектицид (препарат для борьбы с вредными насекомыми) широкого спектра действия: против вредителей хлебных злаков, в защищенном грунте, на овощных культурах, картофеле и для медицинской дезинфекции против тараканов.

Производит и поставляет его в 150 стран мира английская фирма Зенека.

Картофель опрыскивают этим препаратом не более 2 раза за вегетацию в период массового появления жука. Разбавляют 15 г препарата в 10 л воды и расходуют до 1 л раствора на 10 м^2 посевов (ведро на сотку).

Арриво, 25%-ный концентрат эмульсии.

Инсектицид еще более широкого спектра действия, чем предыдущий. Производит и поставляет его в продажу американская фирма ФМС.

Картофель опрыскивают также как и антеликом – не более 2 раз за вегетацию.

Карата, 5%-ный концентрат эмульсии.

Инсектицид английской фирмы Зенека обеспечивает быстрое уничтожение тлей, колорадского жука, цветоеда и других вредителей на многих культурах.

Подавляет клещей в плодовых садах.

Картофель опрыскивают не более 2 раз на вегетацию при массовом появлении личинок или взрослых жуков. На 10 л воды берут 1 г препарата. На 10 м^2 расходуют 1 л раствора.

Кинмикс, 5%-ный концентрат эмульсии и 55-ная минерально-масляная эмульсия.

Инсектицид той же фирмы, что и Каратэ. Против колорадского жука на картофеле растворяют 2 г в 10 л воды, а для борьбы с совками, молью и белянкой на капусту – 2…3 г, пильщиками и тлей на крыжовнике – 2…4 г. Наиболее удобно брать 1 ампулу препарата на 15…20 л воды и обрабатывать этим раствором 15…20 м^2 посевов. Проводят до 2 обработок за вегетацию.

Препарат наиболее эффективен против личинок вредителей, но хорошо и быстро уничтожает и взрослых особей.

Сумицин, 20%-ный концентрат эмульсии.

Препарат японского производства. Применяется против тех же вредителей, что и Суми-Альфа. Уничтожает также и морковную муху.

Против колорадского жука готовят раствор из 3 г препарата на ведро воды и обрабатывают им 100 м^2 посевов за вегетацию – в период массового появления вредителя.

Цимбуш, 25%-ный концентрат эмульсии.

Препарат широкого спектра действия, производит английская фирма Зенека.

Картофель опрыскивают в период массового появления вредителя не более 2 раза за вегетацию. Последняя обработка – за 20 дней до уборки клубней . На 10 л воды расходуют 1 г препарата и опрыскивают этим раствором 100 м^2 посадок.

Последнюю обработку посевов картофеля надо проводить не позднее чем за 20 дней до уборки урожая, а плодов и овощей – за 30 дней до уборки.

Выходить на участки для полива, прополки и других работ через 7…10 дней после обработки.

Как видно из вышесказанного ядохимикаты достаточно эффективны только в том случае, если их применяют, учитывая конкретные условия. Кроме того ядохимикаты наносят вред окружающей среде и не исключено, что вместе с паразитами гибнут и полезные насекомые

При выборе того или иного способа борьбы следует учитывать почвенные и климатические условия, сроки и способы посева культуры, степень зараженности почвы, размещение вредителей и другие особенности их поведения, а также условия среды их обитания.

Физический метод основан на использовании высоких и низких температур, ультразвуковых колебаний, электромагнитных импульсных излучений, радиационных излучений, с помощью которых ухудшается жизнь вредителя и даже наступает гибель [61…63]. Однако этот метод еще мало распространен и по причине его сложности не доступен массовому картофелеводу или огороднику.

1.5. Использование электромагнитных излучений в растениеводстве и ветеринарии

Использование электромагнитной энергии в растениеводстве и ветеринарии открывает новые возможности для угнетения вредных насекомых без применения химических препаратов [64…66]. Экспериментальные исследования последних лет показывает, что для решения данных задач следует использовать ЭМП [67, 68].

Анализ экспериментальных исследований по воздействию электромагнитных полей на физико-химические процессы в биологических объектах проводимых: в Харьковском НТУСХ им. Петра Василенко под руководством А. Черенкова, Ю. Мегеля, Н. Лисиченко, Н. Косулиной; в ИРЭ РАН под руководством Н. Д. Девяткова; в Новосибирске под руководством А. П. Казначеева; в Тул ГУ под руководством Е. Нефедова показывают, что наибольший эффект по уничтожению насекомых следует ожидать от радиоимпульсных ЭМП КВЧ диапазона.

Основной эффект уничтожения происходит из-за избирательного нагрева насекомых как влажных диэлектриков. Гибель насекомых и микроорганизмов

происходит не столько от нагрева, сколько от весьма высокой скорости нарастания температуры этих объектов при воздействии электромагнитного излучения. За одну секунду температура их повышается на несколько градусов, причем нагрев идет изнутри организма. СВЧ – метод борьбы с насекомыми –вредителями растений является более эффективным по сравнению с химическими и биологическими методами [64…68].

Электромагнитная энергия нашла применение для обеззараживания семян перед посевом вместо их химического протравливания. Помещение семян на 20…60 с в ЭМП практически полностью обеззараживает их от вредных микроорганизмов, а также грибковых, бактериальных и частично вирусных болезней [69].

Использование ЭМИ при обработке кормов позволяет убить вредные для животных и птиц микроорганизмы, содержащие, например, в концкормах, с улучшением их качества [64].

Обеззараживающий эффект достигается при температурах более низких, чем при традиционной обработке, значительно увеличивается длительность хранения комбикормов.

Электромагнитная энергия является одним из перспективных методов борьбы с вредными насекомыми зерновых запасов: мучным хрущаком и кольчатым шелкопрядом [70].

Облучение личинок и куколок мучного хрущака ЭМИ с параметрами: частота 38,7 ГГц, плотность потока мощности 400 мкВт/см^2, экспозиция 10 мин приводит к уменьшению числа куколок при окукливании до 82,8% по отношению к контролю, окукливание происходит с задержкой на 5...6 дней, выход имаго окуклившихся личинок с дефектом составляет 100% [70].

Дезинсекционный эффект при СВЧ облучении выявился при температуре 40...50°С. Эффект был зафиксирован для всех форм развития насекомых (яйцо, личинки, имаго). Одновременно с этим обеспечивалось 100% уничтожение патогенной микрофлоры, которая негативно влияет на семена при хранении.

С помощью СВЧ-энергии была решена проблема стерилизации молока [49]. Для воздействия на микроорганизмы молока в СВЧ-пастеризаторе было использовано три фактора: мгновенный нагрев с созданием локального источника внутри бактерии; высокая температура и плотность СВЧ-энергии. В медицине очень эффективным оказалось использование СВЧ-энергии для сушки и формообразования в фармакологическом производстве (капсулы, таблетки и пр.), сушки лекарственных прав при низких температурах (30°…40°С) с сохранением лечебных качеств, экстрагирования лекарственных растений, микроволновой томографии, микроволновых аппликаторов (внешние , внутриполостные и внутритканевые), стерилизации (инструмента, посуды, одежды, обуви, помещения) [71…73].

Проведенный анализ по воздействию импульсной СВЧ энергии на вредную микрофлору и насекомых продуктов сельского хозяйства показывает, что СВЧ энергия – это очень эффективный источник, который в ряде применений обладает несомненными преимуществами перед другими источниками. Такой источник не вносит каких-либо загрязнений при влиянии

на биологические объекты, отличается гибкостью в применениях и практически безинерционен в управлении.

Из анализа информационных и тепловых электромагнитных методов дезинфекции материалов и биологических веществ, следует отдать предпочтение информационному радиоимпульсному методу.

Следует отметить, что дезинфекционные эффекты при применении информационного ЭМП возможно только при оптимальном сочетании биотропных параметров радиоимпульсного ЭМП (частота заполнения импульсов, величина мощности в импульсе, длительность импульсов, скважность, экспозиция и др.). Однако определение оптимальных параметров ЭМП для угнетения колорадского жука и его личинок требует разработки моделей, учитывающих параметры импульсного ЭМП, воздействующего на насекомых и их электрофизические свойства.

1.6. Обоснование угнетающего действия ЭМП на особи колорадского жука

Практические результаты показывают, что электромагнитная энергия может изменять метаболические и биосинтетические процессы и при определенных параметрах импульсного излучения (частота следования импульсов, скважность, мощность, экспозиция) может замедлять и угнетать клеточный рост [74…77]. Облучение в мм диапазоне РНК и ДНК – содержащих вирус приводит к снижению их инфекционности [78]. Угнетение роста культур бактерий, изменение фагоцитарной активности, биосинтеза белков, ультраструктурные изменения в клетках при воздействии ЭМП КВЧ диапазона отмечено в работах [79, 80].

В опытах с микроорганизмами было установлено, что биологический эффект от действия ЭМП на микроорганизмы носил резонансный характер [81].

В качестве одного из основных механизмов угнетающего действия КВЧ излучения на вредные микроорганизмы является роль биологических мембран в реакциях микроорганизмов на ЭМИ [82…84]. Электрические явления, происходящие в биомембранах, играют исключительно важную роль. Образование трансмембранной разности потенциалов обусловлено избирательной ионной проводимостью мембран в целом, являющихся отличным диэлектриком, так биослои электроизолирующих липидных молекул способны выдерживать напряженность ЭП порядка 10^5 В/см. Величина электрического потенциала на мембране чрезвычайно важна. По современной теории трансмембранного транспорта [84] именно ЭП внутри мембраны создает потоки необходимых веществ из наружной среды внутрь клетки и из клетки в наружную среду через специальные гидрофильные каналы, вероятнее всего, липопротеиновой природы. Скорость проникновения ионов через мембрану определяется такими свойствами, как толщина, значение

диэлектрической проницаемости, наличие фиксированных электрических зарядов на мембране, размеры и число пор в мембране, наличие фиксированных зарядов в порах [84]. Очевидно, усиление воздействия КВЧ излучения будет происходить с увеличением размеров клетки или в результате кооперативного взаимодействия нескольких клеток. Механизм кооперативного взаимодействия может быть обусловлен ионами, окружающими мембрану и слабо связанными с ее поверхностью. Действие информационно-энергетических электромагнитных излучений влечет за собой перераспределение электрических сил, участвующих в функционировании мембраны. В результате меняется степень связывания K^+, Ca^{2+} и других ионов в мембране (в том числе и ионных каналах), а также возникают локальные изменения физико-химических свойств поверхности мембраны (микровязкость, pH, поверхностное натяжение, эффективный заряд) [85, 86]. Можно предположить, что процесс, протекающий во внеклеточной среде, включает в себя механизмы, способные интегрировать слабые поля на некотором расстоянии и развивается скорее по поверхности мембраны, чем по ее поперечной оси. Из приведенных выше данных можно сделать вывод, что пока не существует универсальных моделей при воздействии низкоэнергетического ЭМП на микроорганизмы. Важная особенность практически всех моделей состоит в том, что поверхность клеточных мембран рассматривается в качестве наиболее вероятного места осуществления рассматриваемых воздействий. Следует предположить, что отклонение мембран от равновесия может произойти под действием низкоэнергетического ЭМП за счет локального сжатия в продольном или поперечном направлении.

Уменьшение толщины мембраны может носить резко выраженный локальный характер, что следует рассматривать как начальный этап формирования локального углубления.

Проведенный анализ показал, что для угнетения репродуктивной способности колорадского жука необходимо проведение исследований по установлению первичных, физически обоснованных механизмов воздействия информационно-энергетических импульсных ЭМП на мембраны клеток колорадского жука и его личинок.

1.7. Анализ технических и энергетических особенностей систем электромагнитного излучения для угнетения колорадского жука

Проведенный анализ показал, что радиоимпульсное электромагнитное поле является наиболее эффективным средством для борьбы с колорадским жуком и его личинками [61…63]. Основными критериями при выборе того или иного источника мощности радиоимпульсных колебаний являются: энергопотребление, надежность, габаритомассовые характеристики, области применения, а также их стоимость. Требования, предъявляемые к мощности источников импульсных колебаний для борьбы с колорадским жуком, должны

учитывать следующие факторы: период следования импульсов, длительность импульсов, частоту заполнения импульсов. Что касается экспозиции, то с учётом механизированного уничтожения колорадского жука, она должна составлять единицы секунд. Такую экспозицию можно обеспечить за счёт величины импульсной мощности и высокой стабильности частоты. Использование генератора с относительной нестабильностью частоты $10^{-6}..10^{-7}$, позволит обеспечить полную (≈95%) передачу энергии облучения биологической структуре и существенно уменьшит время синхронизации [87, 88].

Применяемые в настоящее время в медицине и промышленности источники ЭМИ работают в диапазоне частот 1…80 ГГц, но обладают высокой относительной нестабильностью выходной частоты $10^{-3}…10^{-4}$, высокой погрешностью установки несущей частоты 30…900 МГц, низкой монохроматичностью сигнала, малой выходной мощностью 2…5 мВт и поэтому не могут быть использованы для уничтожения колорадского жука [89].

Радиомпульсные генераторы в диапазоне частот 1…100 ГГц находят широкое применение в современных радиоэлектронных системах различного назначения: в системах радиолокации, навигации, управления, в аппаратуре научного назначения.

Эти генераторы характеризуются большими уровнями импульсной мощности (десятки кВт), высоким быстродействием, специальной формой выходных сигналов, но обладают высокой относительной нестабильностью выходной частоты $10^{-3}…10^{-4}$ [90…93].

В настоящее время наиболее мощными импульсными полупроводниковыми источниками СВЧ диапазона являются арсенид-галлиевые лавинно-пролетные диоды (ЛПД) [94, 95]. Выбор в качестве активного элемента ЛПД определяется тем, что при его использовании реализуются наибольшие уровни импульсной мощности, порядка 60 Вт в сантиметровом диапазоне при и 0, 2 мкс. Эти уровни мощности выше, чем у диодов Ганна, и примерно на порядок выше, чем у наиболее эффективных транзисторов HEMT, pHEMT.

Получение необходимых уровней мощности в диодных генераторах возможно на основе суммирования мощностей. Коэффициент полезного действия полупроводниковых сумматоров мощности в настоящее время несколько ниже технических КПД магнетрона и ЛБВ. В то же время имеются несомненные преимущества полупроводниковых сумматоров в связи с низкими напряжениями источников питания, высокой работоспособности и надежности при нарушениях параметров отдельных суммируемых активных элементов, упрощенные конструкции и техническое изготовление [92].

Возможности реализации мощных импульсных источников СВЧ диапазона зависят от наличия соответствующих полупроводниковых диодов, которые могут обеспечить необходимую выходную мощность. В настоящее время в диапазоне частот =1…30 ГГц серийно выпускаются корпусированные ЛПД типа 3А762 А выходной мощностью Р = 30…60 Вт на основе которых, при правильном выборе параметров импульсного режима работы , и схемы суммирования, возможно создание мощного радиоимпульсного источника излучения СВЧ диапазона [92].

Приведенные требования к мощным источникам в радиоимпульсном режиме в значительной степени определяют их оптимальную схему построения. Требования к уровню радиоимпульсной мощности (более 1 кВт) при определенных параметрах импульсного тока питания определяют метод суммирования мощностей диодов, при котором реализуются минимальные габариты и стоимость источника. Требования когерентности и стабильности амплитудно-фазовых параметров

может быть реализовано в режиме внешней синхронизации (или пассивного усиления) высокостабильным непрерывным сигналом. В качестве источника высокостабильного сигнала может быть использован диодный генератор, стабилизированный высокодобротным объемным или диэлектрическим резонатором [96].

При выборе геометрических размеров сумматора мощностей диодов необходимо учитывать размеры коаксиальных диодных модулей, расположенных в объеме резонатора. Кроме того, должны удовлетворяться требования оптимального числа суммируемых диодов в общем резонаторе, обеспечиваться максимальный КПД и одновременно решаться задачи работы каждого диода в режиме максимальной мощности и необходимого отвода тепла. В современных сумматорах мощностей применяются в основном следующие методы суммирования: суммирование в мостовых и разветвленных системах, каскадное суммирование мощностей при установке диодов в единой электродинамической системе [97…99]. Анализ этих сумматоров показывает, что сумматоры мощностей могут быть включены в общей разветвленной системе суммирования (типа «дерево»). Реализация данного метода суммирования рассмотрена в работе [97, 98].

Для угнетения репродуктивной способности колорадских жуков и уничтожения его личинок немаловажным значением является также создание системы излучения радиоимпульсов. Существующие сигналы можно разделить на узкополосные (УП), широкополосные (ШП) и сверхширокополосные (СШП). Антенная система, излучающая один из таких сигналов, должна обеспечивать широкую диаграмму направленности (ДН) в плоскости, параллельной поверхности земли, и иметь сравнительно узкую ДН в плоскости, повернутой на 90°. При этом для эффективного воздействия на вредителей, вектор электрического поля в излучаемом сигнале должен быть перпендикулярен поверхности земли. Рассмотрим наиболее часто используемые в радиолокации антенные системы: волноводно-щелевые антенны, антенны поверхностных волн и волноводно-рупорные антенны [100…102]. Первые два типа антенных систем применяются для передачи УП сигналов, тогда как третий тип можно отнести к ШП излучающей системе. Волноводно-щелевые антенны получаются при прорезании щелей в широких или узких стенках прямоугольных волноводов и являются одним из видов линейных многоэлементных антенн [103]. Они обеспечивают сужение диаграммы направленности (ДН) в плоскости, проходящей через ось волновода и ту сторону волновода, на которой выполнены щели. Различают антенны резонансные, нерезонансные и антенны с согласованными щелями. Для антенн первого типа расстояние между соседними щелями равно волноводной длине волны . Для нерезонансных волноводно-щелевых антенн выбирается , либо . В антеннах с согласованными щелями каждая щель отдельно согласовывается с волноводом при помощи реактивного вибратора или диафрагмы. В общем случае длина щелей равна (– длина волны в свободном пространстве). Во всех случаях волноводно-щелевых антенн ширина щелей выбирается из условия . Отсюда становится понятным, что подобного типа антенны наиболее часто используются в сантиметровом и более длинноволновых диапазонах. По мере укорочения длины волны их применение становится нецелесообразным, поскольку возрастают технологические трудности при изготовлении щелей, и уменьшается механическая прочность самой антенной системы. Кроме того, общим недостатком волноводно-щелевых антенн является ограниченность диапазонных свойств [103, 104]. При использовании не стабилизированного по частоте источника СВЧ колебаний в такой антенной системе происходит отклонение в пространстве ДН от заданного направления, сопровождающееся изменением ее ширины и согласования с питающим волноводом. Таким образом, использование волноводно-щелевых антенн для борьбы с колорадским жуком в полевых условиях не совсем оправдано. К классу излучающих систем поверхностных волн относятся антенны с замедленной фазовой скоростью ( ) [105]. Антенны рассматриваемого вида различаются по замедляющей структуре. Отличительным признаком волны с является убывание по экспоненциальному закону амплитуды поля волны при удалении от поверхности замедляющей структуры. При этом скорость убывания тем быстрее, чем больше замедление волны. Поэтому характерной особенностью таких антенн являются их малые поперечные размеры. В качестве плоских замедляющих систем используются структуры в виде тонкого слоя диэлектрика на металлической подложке и гребенчатые структуры. При использовании прямоугольной гребенки в качестве замедляющей структуры должны выполняться следующие условия: период решетки

; глубина канавок . Отсюда становится понятным, что по мере укорочения рабочей длины волны происходит уменьшение геометрических размеров гребенки. Кроме того, поскольку антенная система должна работать в полевых условиях, то необходимо обеспечить защиту излучающей поверхности от пыли и грязи без существенного изменения основных характеристик антенны. С другой стороны, при возбуждении замедляющей структуры не должны появляться высшие типы волн и антенная система должна быть согласована с возбуждающим волноводным трактом. Сказанное выше в совокупности составляет довольно сложную техническую задачу. К недостаткам антенн поверхностных волн следует отнести сравнительно малое реализуемое усиление и относительно высокий уровень боковых лепестков. Таким образом, применение антенн подобного типа для решения поставленной в диссертационной работе задачи не рационально. Волноводно-рупорные антенны, в отличие от рассмотренных выше антенных систем, являются ШП устройствами и обеспечивают примерно полуторное перекрытие по диапазону. В то же время их можно использовать и для передачи УП сигналов. Подобного типа антенные системы просты в изготовлении . В общем случае рупор является трансформатором волны, распространяющейся по подводящему волноводу, в волну другого типа. Происходит преобразование плоской волны в поперечном сечении волновода в приблизительно плоскую волну значительных размеров в раскрыве рупора. В качестве волноводной волны, как правило, рассматриваются: ТЕ10 волна прямоугольного волновода или ТЕ11 волна круглого волновода. Согласование волновода со свободным пространством обеспечивается благодаря плавному изменению волнового сопротивления вдоль рупора. Это приводит к уменьшению отражения от раскрыва. Различают конические, пирамидальные и секториальные излучатели. Конические рупорные антенны строятся на базе круглого волновода. Они имеют ряд недостатков: у таких антенн плоскость поляризации поля неустойчива и может легко изменяться при незначительных деформациях стенок; поле в раскрыве такого конического излучателя поляризовано неодинаково в различных точках. ДН таких антенн обладают приблизительно осевой симметрией. А

поскольку нам необходимо обеспечить линейную поляризацию облучающего поля (вектор перпендикулярен поверхности земли) и ширину ДН в плоскости, параллельной земли, значительно шире, чем в перпендикулярном направлении, то подобного типа излучающие системы для решения поставленной задачи неприменимы. Поэтому остановимся на пирамидальных и секториальных рупорных антеннах. Подобного типа излучатели строятся на базе прямоугольных волноведущих систем. Так как антенны первого типа используются, как правило, для получения узкой ДН в двух взаимно перпендикулярных плоскостях за счет увеличения поперечных размеров раскрыва рупора, то наиболее приемлемыми для решения задачи по борьбе с колорадским жуком представляются секториальные рупорные излучатели.

Поэтому использование такого типа антенной системы для наших конкретных целей требует проведения дополнительных исследований.

Выводы по разделу

1. На основании анализа литературных источников, отечественных и зарубежных публикаций установлено, что для уничтожения вредителей-насекомых картофеля (колорадского жука) следует использовать энергоинформационные радиоимпульсные излучения сантиметрового диапазона длин волн, которые позволят из технологического процесса уничтожения колорадского жука исключить ядохимикаты.
2. Для определения биотропных параметров радиоимпульсного излучения (частота заполнения импульсов, период следования импульсов и их длительность, экспозиция), которые уничтожат колорадского жука, необходимы теоретические исследования процесса взаимодействия радиоимпульсных излучений с насекомыми-вредителями картофеля.
3. Для разработки эффективной, экологически безопасной технологии уничтожения колорадского жука и его личинок, необходимы исследования и разработка широкополосной антенны и радиоимпульсных генераторов в сантиметровом диапазоне длин волн.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОЛОРАДСКИМИ ЖУКАМИ В РАСТИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ КАРТОФЕЛЯ

2.1. Постановка электродинамической задачи о взаимодействии радиоимпульсов со слоем растительной среды

Будем предполагать, что слой растительной среды находится на поверхности земли. Обозначим через – среднюю толщину слоя. С электродинамической точки зрения слой растительной среды будем считать изотропной диэлектрической средой с относительной диэлектрической проницаемостью и удельной проводимостью . Введем декартовую систему координат с осью перпендикулярной поверхности земли (см. рис. 2.1) [106]. Плоскость совпадает с поверхностью земли. В плоскости находится источник радиоимпульсов, а в плоскости – металлический отражатель радиоимпульсов.

Рис. 2.1. Электродинамическая модель растительной среды картофеля с колорадскими жуками

На рис. 2.1 принято следующее обозначение: 1 – излучающая апертура источника радиоимпульсов; 2 – отражатель радиоимпульсов; 3 – облучаемый участок.

Предположим, что источник радиоимпульсов создает нестационарное электромагнитное поле с векторами напряженности электрического и магнитного полей, имеющих следующие компоненты относительно декартовой системы координат :

, (2.1)

где , и – единичные вектора.

Задача состоит в нахождении решения нестационарной системы уравнений Максвелла:

удовлетворяющие начальным условиям:

; (2.6)

(2.7)

и краевым условиям:

(2.8)

На границах раздела сред (и) должны выполняться условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей.

Здесь и – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума:

и – относительная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость почвы, на которой находится слой растительной среды.

Функция имеет вид:

(2.9)

где – максимальная амплитуда радиоимпульса, и – длительность и период повторяемости радиоимпульса ( ), , – частота заполнения радиоимпульса.

Далее будем предполагать, что электромагнитное поле, возбуждаемое последовательностью радиоимпульсов (2.9) практически не зависит от координаты (см. рис. 2.1). Такое предположение согласуется с распределением поля на излучающей апертуре источника радиоимпульсов.

Учитывая (2.1) представим уравнения (2.2) …(2.5) в скалярной форме:

; (2.10)

; (2.11)

; (2.12)

(2.13)

Из уравнений (2.10)…(2.13) можно исключить компоненту и получить уравнения только для компонент напряженности ЭП и Действительно, продифференцируем уравнения (2.10) и (2.11) по временной переменной :

; (2.14)

(2.15)

Подставим в (2.14) и (2.15) выражение для из (2.12). Будем иметь:

; (2.16)

(2.17)

Теперь достаточно воспользоваться уравнением (2.13). Тогда окончательно получаем:

; (2.18)

(2.19)

где – оператор Лапласа.

Таким образом, исходная задача (2.2)…(2.8) сведена к интегрированию уравнений (2.18), (2.19) с начальными условиями (2.6), (2.7) и краевыми условиями (2.8).

2.2. Алгоритм решения задачи о взаимодействии радиоимпульсов со слоем растительной среды картофеля

Суть предлагаемого алгоритма решения состоит в следующем. Прежде всего, с помощью преобразования Лапласа по временной переменной исходные нестационарные волновые уравнения (2.18) и (2.19) сводятся к уравнению Гельмгольца. Общее решение уравнения Гельмгольца строится методом разделения переменных [107]. После удовлетворения краевым условиям получаем пре образование Лапласа искомого решения. Следующий шаг состоит в применении преобразования обратного к преобразованию Лапласа и использовании метода вычетов [108]. В результате имеем формулу для расчета напряженность ЭП внутри растительного слоя, которая позволяет определить оптимальные параметры радиоимпульсов для эффективного воздействия ЭМИ на личинки колорадского жука, находящиеся в растительном слое (например, картофеля).

Введем преобразование Лапласа для компонент и вектора напряженности электрического поля согласно [108]:

; (2.20)

. (2.21)

Здесь – параметр преобразования Лапласа, комплексное число.

Применим преобразование Лапласа к уравнениям (2.18) и (2.19). Используя известные формулы [108]:

из (2.18) и (2.19) получаем:

; (2.22)

(2.23)

где

(2.24)

При вводе (2.22), (2.23) учтено, что и удовлетворяют начальным условиям (2.6) и (2.7).

Рассмотрим теперь краевые условия (2.8) и применим к ним преобразование Лапласа. Имеем:

(2.25)

Здесь через обозначено преобразование Лапласа функции из (2.9). Эта функция является периодической с периодом . Поэтому ее преобразование Лапласа можно представить в следующем виде:

(2.26)

Далее, не ограничивая общности, будем предполагать, что выполняется соотношение:

(2.27)

где – целое число.

Кроме того, в (2.26) ограничимся конечным числом членов ряда. Это соответствует случаю излучения в растительную среду конечного числа радиоимпульсов в течении заданного промежутка времени.

Учитывая сделанные предположения из (2.26) получаем формулу для преобразования Лапласа функции :

(2.28)

Таким образом, в терминах изображений преобразования Лапласа искомых функций исходная нестационарная задача сведена к следующей задаче. Требуется найти решение уравнений Гельмгольца (2.22) и (2.23) в трех областях при (воздушная среда):

(2.29)

при (слой растительной среды):

(2.30)

при (почва):

(2.31)

удовлетворяющих условиям сопряжения на границах раздела сред:

; (2.32)

(2.33)

краевым условиям при :

(2.34)

и условию излучения в полупространствах и :

(2.35)

Здесь введены обозначения:

; (2.36)

; (2.37)

(2.38)

Для решения уравнений Гельмгольца в каждой из областей применим метод разделения переменных [107].

Рассмотрим полупространство .

Представляя и в виде произведения функций, зависящих только от одной переменной или . После ряда преобразований можно получить:

; (2.39)

(2.40)

где – произвольные константы, а константы и удовлетворяют уравнению:

(2.41)

Предполагая, что и используя условие излучения (2.35), получим следующее представление для решений уравнений (2.29):

; (2.42)

(2.43)

Аналогично для полупространства будем иметь:

; (2.44)

(2.45)

где константы и сведены соотношениям:

(2.46)

и .

Как следует из (2.13), функции и должны удовлетворять уравнениям:

(2.47)

Подставляя (2.42)…(2.45) в (2.47), после ряда преобразований получаем:

(2.48)

(2.49)

(2.50)

(2.51)

Рассмотрим теперь слой .
Применяя метод разделения переменных к уравнениям (2.20) имеем:

(2.52)

(2.53)

Подставим (2.52) и (2.53) в уравнение:

(2.54)

Тогда в силу линейной независимости функции получаем:

; (2.55)

; (2.56)

; (2.57)

. (2.58)

Из (2.55)…(2.58) имеем:

(2.59)

Подставим (2.59) в (2.53), тогда окончательно получаем следующие выражения для решений уравнений (2.30):

; (2.60)

(2.61)

Итак, формулы (2.48)…(2.51) и (2.60), (2.61) дают общее решение уравнений (2.29)…(2.31).

Для определения величин и воспользуемся краевыми условиями (2.32)…(2.34). Прежде всего, заметим, что согласно [107] постоянные распространения волн вдоль границ раздела сред (в нашем случае это ось) должны совпадать. Этот факт следует из условий непрерывности тангенциальных компонент электромагнитного поля при переходе через плоскую границу раздела сред. Поэтому, далее будем полагать, что постоянные распространения вдоль оси совпадают, т.е. (см. формулы (2.48)…(2.51) и (2.60), (2.61). Рассмотрим граничные условия (2.32) и подставим в них представления (2.48), (2.49) и (2.60), (2.61) для компонент поля. Учитывая линейную независимость функций и на интервале , после ряда преобразований имеем:

; (2.62)

; (2.63)

; (2.64)

. (2.65)

Из (2.62)…(2.65) получаем, что:

; (2.66)

. (2.67)

Далее, из граничных условий (2.33) имеем:

; (2.68)

; (2.69)

; (2.70)

(2.71)

Подставим (2.70) и (2.71) в (2.68), (2.69), тогда получим:

; (2.72)

(2.73)

Рассмотрим уравнения (2.67) и (2.72). Как следует из теории линейных алгебраических уравнений [109], для существования нетривиальных решений необходимо и достаточно, чтобы определитель системы уравнений (2.67) и (2.72) был равен нулю.

Приравнивая этот определитель к нулю, имеем характеристические уравнение для определения постоянной распространения вдоль оси .

(2.74)

Кроме того, из (2.67) получаем:

(2.75)

Подставим (2.75) в (2.60), (2.61) и учтем граничное условие (2.34) при , тогда будем иметь следующее представление для компонент напряженности электрического поля в растительном

слое:

; (2.76)

(2.77)

где (2.78)

Для определения воспользуемся краевым условием (2.34) при , которое представим в виде:

(2.79)

Здесь функция определяется согласно формуле (2.28).
Подставим (2.77) в (2.79). Делая необходимые преобразования, имеем:

(2.80)

Итак, преобразование Лапласа компонент на вектора напряженности электрического поля в растительном слое можно рассчитать по формулам:

; (2.81)

(2.82)

В формулах (2.81) и (2.82) величина определяется из характеристического уравнения (2.74). Представим это уравнение в следующем виде:

(2.83)

где:

.

В общем случае определение из (2.83) можно осуществить только численными методами с помощью компьютера. Учтем, что толщина растительного слоя мала по сравнению с длиной слоя , а величина , определяющая изменение ЭП по толщине слоя (см. (2.81), (2.82)), близка к нулю. Тогда можно приближенно заменить гиперболический тангенс . Как показали численные расчеты, такое приближение приводит к относительной погрешности определения постоянной распространения менее 5%. В этом приближении уравнение (2.84) можно представить в виде:

. (2.84)

Из (2.84) получаем:

; (2.85)

(2.86)

В этих уравнениях согласно (2.36)…(2.38), (2.41), (2.55):

(2.87)

где – относительная ДП и удельная проводимость растительного слоя, – относительная ДП и удельная проводимость почвы, на которой находится растительный слой.

Поскольку ЭМП слабо проникает в почву, то корнями уравнения (2.86) можно пренебречь. Поскольку они в основном определяются параметрами и .

Рассмотрим уравнение (2.85), корни которого зависят от параметров растительного слоя и .

Подставим в (2.85) значения из (2.87). Тогда после ряда преобразований получим:

. (2.88)

Из (2.88) имеем:

(2.89)

Таким образом, формулы (2.81), (2.82) и (2.89) позволяют определить преобразование Лапласа компоненты вектора электрического поля в растительном слое. Следующий шаг в построении решения исходной нестационарной задачи о взаимодействии радиоимпульсов с растительным слоем состоит в применении преобразования обратного к преобразованию Лапласа.

2.3. Расчет усредненного электромагнитного поля в растительном слое картофеля

Обобщенной характеристикой процесса взаимодействия конечного числа радиоимпульсов с растительным слоем является ЭП, усредненное по объему облучаемого участка этого слоя. Облучаемый участок растительного слоя представляет собой прямоугольный параллелепипед с

размерами вдоль осей (см. рис. 2.1). При этом, – расстояние между

апертурой излучаемой антенны и отражателем радиоимпульсов, – высота растительного

слоя, – размер апертуры вдоль оси .

Как установлено в подразделе 2.2, преобразование Лапласа электрического поля можно представить в виде:

(2.90)

где и определяются по формулам (2.81) и (2.82). Проинтегрируем (2.90) по объему облучаемого участка растительного слоя. Тогда после ряда преобразований получим:

(2.91)

Здесь:

(2.92)

(2.93)

В (2.92), (2.93) учтено, что коэффициент в (2.81), (2.82) равен нулю. Это следует из характеристического уравнения (2.85).

Подставим в (2.92), (2.03) значение из (2.28) и значения и из (2.87) и (2.89). Будем иметь:

; (2.94)

(2.95)

где – максимальная амплитуда радиоимпульса;

– частота заполнения радиоимпульса;

– длительность и период повторяемости радиоимпульсов;

– количество радиоимпульсов;

и – относительная ДП, и удельная проводимость растительного слоя.

Применим к (2.94), (2.95) преобразование обратное к преобразованию Лапласа. Тогда, согласно [108], получаем:

; (2.96)

(2.97)

где – произвольное положительное число.

Для вычисления интегралов в (2.96) и (2.97) воспользуемся методом вычетов [108]. С этой целью необходимо исследовать функции и как функции комплексного параметра . Как следует из (2.94) и (2.95), эти функции имеют три точки ветвления корневого типа и . Поэтому для выделения однозначных ветвей функций и проведем разряд в комплексной плоскости, где изменяется параметр , по полупрямой и (– обозначают реальную и мнимую части комплексного число).

Для выделения однозначных ветвей функций и достаточно выделить однозначные ветви функций:

.

Будем считать, что когда изменяется в комплексной плоскости с указанным выше разрезом.

Поскольку функция является аналитической в комплексной плоскости с разрезом и стремится к нулю при (левая полуплоскость), то интеграл в (2.96) сводится к вычислению интеграла по разрезу. С помощью (2.94) из (2.96), после ряда преобразований, имеем:

. (2.98)

Можно показать, что при справедливо неравенство:

,

где – константа независящая от переменной .

Кроме того, из (2.98) следует, что при и компонента поля стремится к нулю.

Следовательно, существует значение частоты заполнения радиоимпульса, при котором усредненная за период следования радиоимпульсов компонента напряженности ЭП принимает максимальное значение. Из (2.98) получаем:

. (2.99)

Формула (2.99) является основой для расчета компоненты усредненной по объему облучаемого участка растительного слоя и усредненной за период повторяемости радиоимпульсов.

Рассмотрим теперь компоненту . Эта функция является аналитической всюду, кроме разреза (,) и счетного множества , элементы которого являются простыми полюсами функции . Величины удовлетворяют следующему уравнению:

, (2.100)

Это уравнение следует из (2.93) и определяет те значения параметра , при которых гиперболический тангенс обращается в бесконечность.

Для нахождения решений уравнения (2.100), представим его в следующем виде:

, (2.101)

где .

Доказано, что уравнение (2.101) имеет три решения: одно вещественное и два комплексно сопряженных. В общем случае эти решения можно представить с помощью формул Кардано [109]. Однако эти формулы очень сложны. Поэтому получим приближенные формулы.

С этой целью введем новую неизвестную величину . Тогда (2.101) примет вид:

. (2.102)

Выбирая , величину можно сделать достаточно малой. Применяя для построения решения уравнения (2.102) метод Ньютона будем иметь:

; (2.103)

(2.104)

Возвращаясь к исходным неизвестным, окончательно получаем:

; (2.105)

(2.106)

Численные расчеты показали, что приближенные формулы (2.105), (2.106) позволяют

рассчитывать полюса функции с относительной погрешностью менее 5%. Причем с увеличением индекса эта погрешность быстро убывает. Как следует из (2.105), (2.106),

функция имеет в комплексной плоскости две серии полюсов: одна серия это вещественные полюса (см. (2.106)) расположенные на полупрямой

и ; другая серия – комплексные полюса (см.(2.105)), находящиеся на прямой

линии .

Все эти полюса располагаются в полуплоскости . В этой полуплоскости функция

стремится к нулю при , если только значение временной переменной

Такие свойства функции позволяют воспользоваться методом вычетов [108]

и свести вычисления интеграла (2.97) к сумме вычетов в полюсах (см. формула (2 .105)). Таким образом, имеем:

(2.107)

Вычеты функции можно вычислить по формуле [108]:

С помощью (2.93) получаем:

. (2.108)

Подставим (2.108) в (2.107) и учтем, то что:

,

где – обозначает операцию комплексного сопряжения.

Тогда после ряда преобразований будем иметь:

(2.109)

где – обозначает реальную часть комплексного числа:

;

Усредним по периоду повторяемости радиоимпульсов. Тогда получим:

;

(2.110)

Формулу (2.110) можно упростить. Учтем, что ряд в (2.110) сходится достаточно быстро. Это позволяет ограничиться членом ряда с индексом Как показали численные расчеты, относительная погрешность в этом случае составляет менее 5%. Из (2.110) имеем:

(2.111)

Таким образом, формулы (2.99) и (2.111) позволяют рассчитать компоненты напряженности ЭП, усредненные по объему облучаемого участка растительной среды и усреднение по периоду повторяемости радиоимпульсов.

С помощью (2.99) и (2.111) введем амплитуду усредненного электрического поля по формуле:

.(2.112)

Как следует из (2.99) и (2.111), величина пропорциональна

– максимальной амплитуде радиоимпульса и сложным образом зависит от и –

длительности периода повторяемости и частоты заполнения радиоимпульса. Выше было установлено

, что с уменьшением ЭП и стремятся к нулю. Следовательно, этим свойством обладает и

амплитуда . Поэтому зависимость от частоты заполнения радиоимпульса должна иметь резонансный характер.

Зависимость нормированного значения усредненного ЭП от частоты заполнения радиоимпульса для различных значений скважности приведены на рис. 2.2:

Рис. 2.2. Зависимость нормированного значения усредненного электрического поля от частоты заполнения радиоимпульса:
1 – Q = 160;
2 – Q = 140;
3 – Q = 180.

В результате расчётов установлено, что для растительного слоя, содержащего колорадского жука, с относительной ДП и удельной

проводимостью 1/Ом, при частоте заполнения радиоимпульсов ГГц величина

амплитуды усредненного ЭП приминает максимальное значение. Величина этого

максимального значения зависит от скважности последовательности радиоимпульсов . При

скважности достигается оптимальное значение (– максимальная амплитуда радиоимпульса).

Таким образом, проведенные расчеты показали, что для уничтожения колорадского жука и его личинок необходимо использовать радиоимпульсное излучение с параметрами: частота

заполнения импульсов 20 ГГц; длительность импульсов с; скважность импульсов Q = 160.

При этих величинах среднее значение напряженности ЭП принимает максимальное значение (0,036) в области нахождения колорадских жуков и его личинок.

Разработка метода уничтожения насекомых-вредителей картофеля радиоимпульсным ЭМП связана с разрушением клеточных мембран насекомых за счет наведенного потенциала на мембранах, величина которого приводить не только к разрушению мембраны, но и повышению температуры в клетках до °C [82, 84].

Наиболее признанным в настоящее время является механизм разрушения мембран, обусловленный дефектами типа сквозной поры [84]. Обычно процесс разрушения мембран связывают с достижением параметрами системы некоторых критических значений, после чего процесс отклонения становится необратимым и наступает разрушение мембран. Отклонение мембран от равновесия можно связать с возникновением дефектов в структуре мембран за счёт локального сжатия в продольном или поперечном направлении. Уменьшение толщины мембраны носит резко выраженный локальный характер, что следует рассматривать как начальный этап формирования локального углубления [84].

Величина потенциала для разрушения мембран клеток насекомых может быть определена из выражения [84]:

, (2.112)

где – модуль упругости мембраны;

d – толщина мембраны;

– диэлектрическая проницаемость мембраны.

Время облучения и напряжённость ЭМП для уничтожения насекомых-вредителей картофеля определим из выражения для наведенного потенциала на мембране клеток насекомых [82]:

Уравнение связывает потенциал на мембране клетки с ее физико-химическими параметрами, напряженностью падающего на нее ЭМП и частотой этого поля. В рассматриваемом нами случае данное уравнение имеет следующий вид:

EMBED Equation.3 ,
2.113)

где – потенциал на мембране в начальный момент времени;
P – проницаемость мембраны;
t – время экспозиции;
C0, CS – концентрации ионов внутри и вне клетки;
V0 – объем клетки в начальный момент времени;
g – заряд иона;
F – число Фарадея;
R – газовая постоянная;
T – абсолютная температура в Кельвинах;
– заряд электрона;
Eср – электрическая напряженность поля;
NA – постоянная Авогадро;
– круговая частота заполнения импульсов.

Для расчетов были использованы данные, взятые из литературных источников [84, 110…112].

d -8 м; ; Ф/м; NA = 6,022·1023 моль-1;

нав = 200 мВ; EMBED Equation.3 = 60 мВ; P=2·10^{-3} с/м^3; C_0 = 0,5 ;

CS = 8,0 мк моль/м3; V0 = 5·10-19 м3; 2·10-18 Кл; F ;

R ; T 3200K; f 0 ГГц.

При проведении численных расчетов (2.53) было получено, что критический потенциал на мембране составляет 110 мВ.

Для выполнения условия (2.53) было принято, что величина наведённого потенциала на мембране клеток насекомых лежит в пределах более 110 мВ. В результате расчетов было установлено , что для наведенного потенциала в пределах 120 мВ время облучения насекомых лежит в пределах 2 с, средняя величина напряжённости электрической составляющей ЭМП равна 24 В/м, а величина напряжённости электрической составляющей источника Е0 равна 666,6 В/м. Для облучаемой поверхности длинной 1,4 м и высотой 0,35 м величина источника ЭМИ в импульсе составит 600 Вт или 115 мВт/см2. С учётом того, что для уничтожения колорадского жука радиоимпульсным излучением следует применять установку смонтированную на тракторе типа «Беларусь», то он должен работать на второй передаче со скоростью 2,3 км/час.

Выводы по разделу

1. Для определения диапазона изменений биотропных параметров радиоимпульсного излучения, вызывающих уничтожение насекомых-вредителей картофеля следует использовать разработанную модель и полученные математические выражения при ее анализе.

2. В процессе теоретического анализа разработанной модели было установлено, что для уничтожения колорадских жуков их следует облучать радиоимпульсным излучением с параметрами: длительность радиоимпульсов 10-6 с; скважность радиоимпульсов 160; мощность источника излучения не менее 600 Вт; частота заполнения радиоимпульсов 20 ГГц; время экспозиции 1,5…2 с.

РАЗДЕЛ 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА СВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ БОРЬБЫ С НАСЕКОМЫМИ-ВРЕДИТЕЛЯМИ КАРТОФЕЛЯ

3.1. Обоснование гибридно-каскадной схемы суммирования мощностей в генераторах на лавинно-пролётных диодах

Проведенный анализ показал, что для уничтожения колорадского жука необходимы импульсные генераторы с параметрами [113]:

- частота 20 ГГц;
- импульсная выходная мощность Рвых 600 Вт;
- длительность импульса с;
- скважность импульса Q =160;
- относительная нестабильность частоты 10-6…10-7.

Как показано в п.1.7 для выполнения требований по выходной мощности, в генераторах следует применять разветвлённую систему суммирования мощностей рис. 3.1.

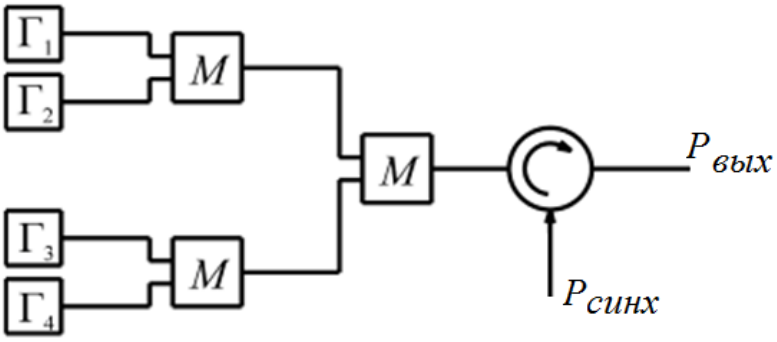

Рис. 3.1. Разветвленная схема каскадного суммирования мощностей генераторов в мостах (М) в режиме синхронизации внешним сигналом

Выходная мощность определяется основными параметрами, определяющими эффективность каскадного суммирования мощности диодов, являются: тип и количество диодов; КПД суммирования мощностей; число каскадов разветвленного сумматора [94].

Число диодов сумматора определяется из выражения:

, (3.1)

где необходимая импульсная мощность на выходе сумматора;

N – число диодов;

номинальная импульсная мощность диода;

– коэффициент полезного действия сумматора.

Число каскадов разветвлённого сумматора мощности находим из уравнения:

, (3.2)

где k – число каскадов разветвлённого сумматора;
L – потери на одном сумматоре.
Число диодов в одном каскаде будет определяться выражением:

. (3.3)

Экспериментальные разработки разветвлённых сумматоров мощности выявили их основные особенности [114, 115]:
- наиболее эффективно данные сумматоры используются в режиме внешней синхронизации;
- КПД суммирования уменьшается при увеличении числа суммируемых каскадов.

В связи с этим для достижения высоких уровней мощности и КПД источников СВЧ излучений большой смысл приобретает совмещение методов каскадного суммирования диодов в единой электродинамической системе с методами суммирования в разветвленных системах. Такие сумматоры эффективны в режиме внешней синхронизации при максимальной плотности монтажа диодов, минимальных габаритах, допустимом тепловом режиме [116].

Основное назначение синхронизированных генераторов – получение высокостабильных колебаний в рабочем диапазоне, мало зависящих от влияния дестабилизирующих факторов. Стабильность частоты генераторов определяется совокупностью факторов: шумовыми процессами за счёт флуктуаций носителей заряда, изменением питающих напряжений и температуры окружающей среды, влиянием внешних цепей, в частности нагрузки, процессами старения пассивных элементов схемы генератора.

В синхронизированных генераторах высокая стабильность частоты колебаний достигается путём синхронизации колебаний автогенератора внешним сигналом с малой нестабильностью

частоты и пониженным уровнем шумов. В режиме синхронизации полоса синхронизации синх (полоса захвата частоты автоколебаний частотой колебаний внешнего сигнала) ограничена и зависит от мощности синхронизирующего сигнала.

Рвх синх, которая определяется из выражения следующим образом:

, (3.4)

где – максимальное значение мощности на выходе синхронизируемого каскада;
Рсинх – синхронизирующая мощность.

Обычно мощность синхронизирующего сигнала во много раз меньше мощности автогенератора. Собственная частота колебаний автогенератора (f) и частота внешнего сигнала fсинх могут иметь близкие значения (f = fсинх) или находиться в кратном соотношении f = nfсинх, где n =1, 2,3,…

Возможности создания мощных источников импульсного излучения зависят от наличия соответствующих полупроводниковых приборов и схемы суммирования [117, 118]. Таким образом, при совмещении методов каскадного суммирования диодов в единой резонаторной системе с методами суммирования в разветвленных системах решается актуальная задача повышения уровня мощностей, надежности и устойчивости импульсных полупроводниковых генераторов СВЧ диапазона.

Возможности создания мощных источников импульсного излучения зависят от выбора соответствующих полупроводниковых приборов и схемы суммирования. Выбираем

корпусированные ЛПД типа 3А762А с параметрами: диапазон частот 20 ГГц; импульсная

мощность 60 Вт; импульсный ток 25 А; импульсное напряжение 50 В; ,

КПД = 4%; параметры корпуса: пФ, нГн, пФ,

0,5 Ом.

Мощность, потребляемая ЛПД, EMBED Equation.DSMT4

Вт; электронный КПД диода 60/1250 = 0,048; полный электронный КПД однодиодного генератора .

Определим число диодов, необходимое для получения на выходе сумматора мощности

Вт, принимая = 0,8 и на основании (3.1) получаем =12,5. Выбираем N = 12.

Результаты численного анализа показали, что обеспечить требования, предъявляемые к импульсным источникам сантиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью 300 Вт, возможно на основе однокаскадного суммирования мощностей (N = 6) ЛПД в цилиндрическом резонаторе. Для получения на выходе многодиодного (N = 12) импульсного ГЛПД суммарной мощности Рвых = 600 Вт используем двухкаскадную схему суммирования в общей разветвленной схеме. Число каскадов, полученное из выражения (3.2), равно 2, для величины потерь L = 0,2 дБ [95].

Структурная разветвленная система суммирования мощностей каскадных сумматоров ГЛПД в режиме синхронизации внешним сигналом представлена на рис. 3.2.

Анализ [95] показал, что основной причиной, приводящей к существенным изменениям синхронного режима генераторов, являются эффекты взаимной синхронизации непрерывного синхронизирующего и импульсного синхронизируемого генераторов при слабой развязке между ними. Поэтому уровень необходимой развязки между каскадами должен быть не менее 40 дБ.

При разработке сумматора мощностей использованы стандартные волноводные элементы: ферритовые вентили, циркуляторы, аттенюаторы, фазовращатели, тройники.

Для выполнения требования когерентности и стабильности амплитудно-фазовых параметров в импульсном режиме используем внешнюю синхронизацию радиоимпульсных генераторов высокостабильным непрерывным сигналом. В качестве источника входного сигнала используем генератор на ЛПД, со стабилизирующим высокодобротным объемным резонатором «проходного» типа (рис. 3.2). Максимальная величина мощности синхронизирующего генератора, определяемая из выражения 3.4, составляет 760 мВт. В качестве активного элемента выбран ЛПД с барьером Шоттки типа 3А730А со следующими паспортными параметрами: уровень непрерывной выходной мощности Вт, рабочая частота f = 20 ГГц, U = 60…80 В, мА, ёмкость p-n перехода .

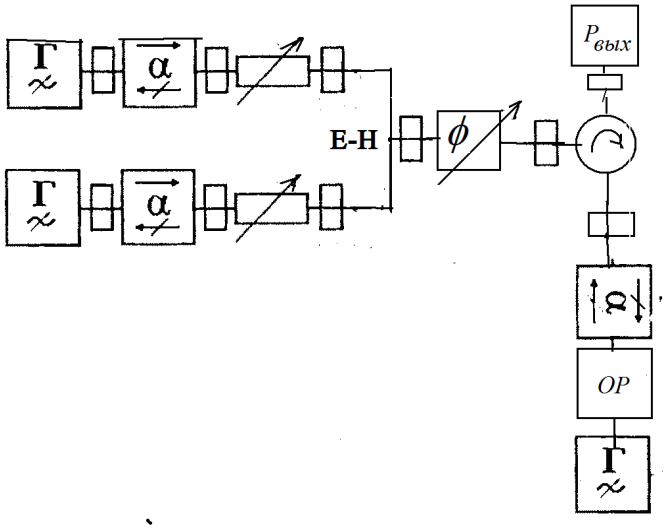

Рис. 3.2. Структурная разветвленная система суммирования мощностей каскадных сумматоров ГЛПД в режиме синхронизации внешним сигналом

3.2. Анализ геометрических и энергетических параметров синхронизирующего генератора на лавинно-пролетных диодах, стабилизируемого по частоте резонатором проходного типа

Для выполнения требования когерентности и стабильности амплитудно-фазовых параметров в импульсном режиме используем внешнюю синхронизацию импульсных генераторов высокостабильным непрерывным сигналом. В качестве источника входного сигнала используем генератор на ЛПД, со стабилизирующим высокодобротным объемным резонатором проходного типа [119] (рис. 3. 3).

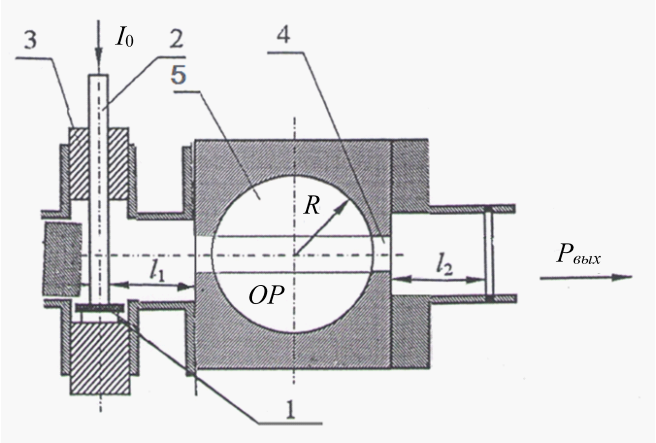

Рис. 3.3. Эскиз конструкции генератора со стабилизирующим объемным резонатором

Стабилизируемый генератор выполнен в виде волноводно-штыревой конструкции сечением 11х4 мм2. Диод ЛПД крепиться в волноводе с использованием металлического круглого стержня 2, ось которого параллельна вектору ЭП (в прямоугольном волноводе распространяется волна Н10). Для предотвращения возможных паразитных колебаний вне диапазона перестройки в цепь питания диода включена поглощающая нагрузка 3. В качестве внешнего стабилизирующего резонатора используется цилиндрический резонатор 5, работающий на ТЕ011 типе колебаний и включенной по схеме «на проход». Связь резонатора с волноводной конструкцией осуществляется через отверстия связи 4.

Перестройка частоты резонатора осуществляется бесконтактным поршнем. На рис. 3.4 приведена эквивалентная схема синхронизирующего ГЛПД.

В эквивалентной схеме (рис. 3.4) металлический стержень для крепления диода заменён Т–образной эквивалентной схемой. Эквивалентные параметры стержня представлены реактивностями jXa, и -jXc, которые определяются размерами стержня и размерами волновода. ЛПД

генератора представлен элементами и , величина которых определяется расчётным путём. Внешний стабилизирующий резонатор 1 характеризуется элементами Lp, Cp, Gp. Расстояние от оси токопроводящего штыря до плоскости отверстия связи учтено отрезком длинной линии l1. Перестройка частоты стабилизирующего резонатора осуществляется бесконтактным поршнем.

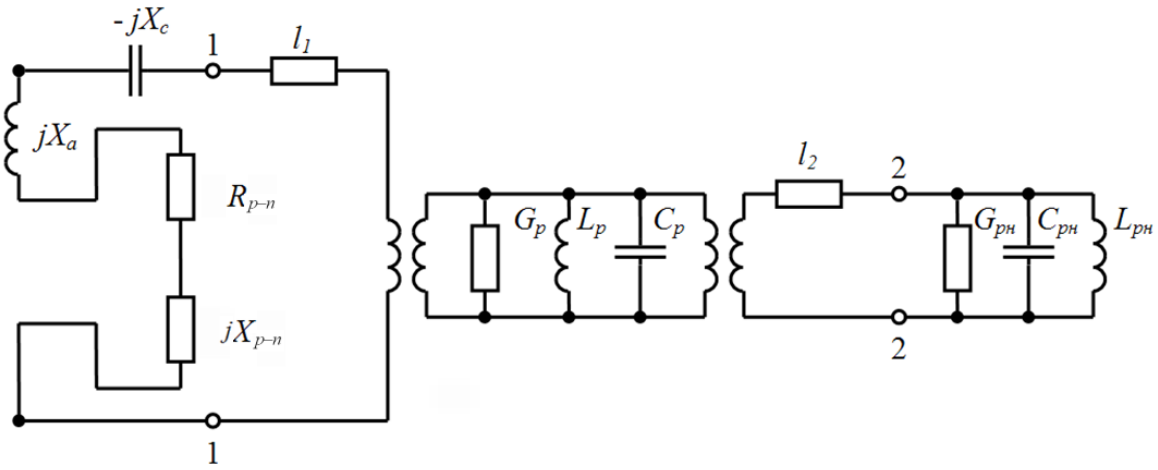

Рис. 3.4. Эквивалентная схема генератора с внешним стабилизирующим резонатором

Нагрузкой генератора является резонансная многодиодная электродинамическая система, характеризующая элементами Lрн, Cрн, Gрн. В случае, когда все диоды включены в пучность ЭП суммирующего резонатора, то коэффициент трансформации можно считать равным единице. Расстояние от отверстия связи резонатора до плоскости нагрузки учтено отрезком длинной линии l2. Эквивалентные параметры стержня были определены из выражений [119]:

; (3.5)

; (3.6)

(3.7)

(3.8)

– характеристическое сопротивление волновода;

– длина волны в волноводе; – длина волны в свободном пространстве ; λкр a; a11 мм; b мм; d = 0,5 мм; 15 мм; Ом; мм; Xa=68,4 Ом; Xc=1,85 Ом.

Для определения параметров диода синхронизирующего генератора воспользуемся методикой приведённой в работах [116, 117] для режима слабого сигнала.

Упрощенная эквивалентная схема ЛПД с учетом потерь в базе транзистора приведена на рис. 3.5.

Элементы в эквивалентной схеме (рис. 3.5) имеют следующее назначение: – ёмкость p-n перехода; – сопротивление потерь в базе и контурах диода.

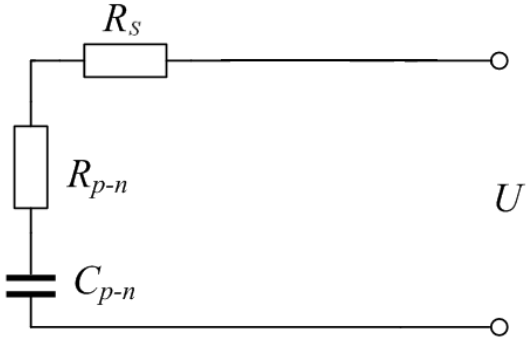

Рис. 3.5. Эквивалентная схема диода

В режиме слабого сигнала активная Rp-n и реактивная Xp-n составляющие сопротивления p-n перехода диода определяются выражениями [117, 118].

Rp-n = (3.9)

Xp-n = , (3.10)

где:

;

– время пролёта носителями слоя умножения;
скорость дрейфа носителей;

;

;

;

= – угол пролёта носителей заряда;

– время пролёта носителей заряда дрейфовой области.

Расчётные зависимости сопротивлений диода 3А760 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Расчётные зависимости параметров ЛПД 3А730А
для различных рабочих токов и частоты 20 ГГц

I0, мА	160	170	180
$\beta_л^2$	0,63	0,67	0,71
$R_{p\text{-}n}$, R_{p-n}, Ом	-2,94	-2,56	-2,0
$X_{p\text{-}n}$, Ом	-70,4	-76,16	-83,2

Расчёт импеданса проводили для ЛПД типа 3А760 с параметрами

[115…117]: ёмкость *p-n* перехода ; ; ;

мкм; = 0,3 мкм; = 0,4; с; ; м-3; Кл;

; мкм; =0,3 мкм; = 0,4; с; ; м-3.

Параметры, характеризующие качество объёмного резонатора, были определены заменой объёмного резонатора эквивалентным контуром с сосредоточенными параметрами [120]:

, (3.11)

где добротность резонатора; R – радиус цилиндрического резонатора;

; – удельная проводимость латуни;

высота резонатора.

, (3.12)

где ;

– корень функции Бесселя для волны Н011;

, (3.13)

где ;

, (3.14)

где сосредоточенная активная проводимость резонатора [121].

Проведенные расчёты показали, что для резонатора с размерами R = 32 мм, h = 7,5 мм,

величина параметров резонатора равна: пФ, , Qp = 5400, G = 0,235 10-5 См.

Так как резонатор предназначен для стабилизации частоты генератора, то в рассматриваемом

случае связь между резонатором и волноводной линией l1 осуществляется щелью диаметром (рис. 3.3) в бесконечно тонкой стенке. Элемент связи представляет собой шунтирующую индуктивность для волноводной системы генератора, относительная проводимость которой определяется выражением [122]:

, (3.15)

где ;

a – ширина волноводной системы;

– диаметр элемента связи.

Величину активной проводимости резонатора на конце волноводной линии определим из уравнения[121]:

, (3.16)

где Qвн – внешняя добротность резонатора.

Численный анализ определил, что для и мм2, = 1,24 См,

См, а сопротивление нагрузки на конце линии будет равно:

Ом. (3.17)

Для определения сопротивления нагрузки волновода слева и справа от проходного резонатора воспользуемся следующим выражением [120]:

, (3.18)

где .

На основании эквивалентной схемы (рис.3.4) сопротивление в плоскости диода будет определяться из уравнения:

. (3.19)

Справа со стороны резонатора нагрузка волновода определяется выражением:

, (3.20)

где .

Поскольку нагрузкой волноводной линии справа от резонатора является электродинамическая система с шестью диодами, то нагрузка, создаваемая системой, будет определяться выражением:

, (3.21)

где активное сопротивление корпускулярного диода 3А762.

Приравнивая действительные и мнимые части (3.18…3.21), получаем систему двух уравнений относительно неизвестных и :

; (3.22)

; (3.23)

; (3.24)

. (3.25)

В результате решений системы уравнений (3.22…3.25) были получены величины длин волноводных отрезков (рис. 3.13) и .

Относительная нестабильность частоты генератора определялась из соотношения [123]:

, (3.26)

где – частота генерации;

– частота резонатора.

Частота генерации определялась из уравнения (3.26), приравнивая нулю реактивную составляющую генератора. Численный анализ определил величину частоты генератора в пределах

рад. Учитывая, что круговая резонансная частота резонатора равна 125,664·109 рад, относительная нестабильность частоты генератора составила 1,6·10-6.

Электронная СВЧ мощность генерации ЛПД, определяется в основном технологическими параметрами: напряжением пробоя , площадью перехода S, плотностью рабочего тока , сопротивлением потерь диода , сопротивлением потерь резонатора и емкостью диода .

Электронная мощность однодиодного ГЛПД определяется соотношением [95]:

(3.27)

где = – плотность рабочего тока на единицу емкости, ;

– постоянная потерь ЛПД при пробивном напряжении;

– угол пролёта (оптимальное значение угла равно);

– сопротивление омических потерь резонатора;

– частота.

Функция численно определена в [95] и приближённо равна:

.

Параметр z равен отношению:

,

где пусковой ток генератора при сопротивлении потерь .
Расчёты показали, что от однодиодного генератора можно получить мощность до 750 мВт.

В расчёте были использованы следующие параметры ЛПД: Ом; Ом;

4; .
Мощность на выходе резонатора находится из выражений [121]:

$$P_{вых} = P_{вх} \quad , \qquad (3.28)$$

где = , Qн = 4360 – нагруженная добротность стабилизирующего резонатора;
Qвх = Qвых = 2800 – входная и выходная добротности резонатора.
Из расчётов следует, что выходная мощность на выходе резонатора составляет 728 мВт.

3.3. Теоретический анализ антенной системы с определением её параметров

Из обзорного раздела следует, что для решения задачи по борьбе с колорадским жуком следует использовать секториальные рупорные излучатели. Различают Н-секториальный рупор с расширением в плоскости вектора основной волноводной волны ТЕ10, и Е-секториальный рупор с расширением в плоскости вектора . Е-секториальный рупор наиболее подходит для решения поставленной в диссертационной работе задачи, так как обеспечивает более широкую ДН в плоскости, параллельной поверхности земли, а вектор в излучающем раскрыве будет перпендикулярен поверхности земли. Таким образом, для того, чтобы определиться с конструкцией антенной системы, необходимо вычислить ширину полосы частот, занимаемую облучающим импульсом. Как показано в работе [124], сигнал является УП, если размер излучающей апертуры

(м/с – скорость света,

– длительность импульса), при сигнал будет широкополосным, а в том случае, когда

сигнал будет сверхширокополосным. В нашем случае с (именно микросекундные импульсы в итоге приведут к необратимым процессам в клетках вредителей) при частоте заполнения 20 ГГц и тогда

м. А поскольку размер в нашем конкретном случае будет значительно меньше 300 м, то можно говорить, что облучающий сигнал будет широкополосным. Поэтому на основании всего сказано, можно сделать вывод о том, что наиболее подходящей антенной системой для борьбы с колорадским жуком является Е-секториальный волноводный рупор. Исследование секториального рупора будем проводить методом разделения основной задачи на внутреннюю и внешнюю. Внутреннюю задачу будем решать независимо от внешней. Полученные в результате этого решения значения поля в плоскости раскрыва Е-секториального рупора используем для решения внешней задачи. ДН рассматриваемого излучателя по известному распределению поля в раскрыве рассчитывается методом волновой оптики на основе принципа Гюйгенса и формулы Кирхгофа.

3.3.1. Анализ внутренней задачи для Е-секториального рупора.

Амплитудное распределение поля в раскрыве рассматриваемого рупорного излучателя будем считать таким же, как и в питающем волноводе.
Е-секториальный рупор возбуждается прямоугольным волноводом, по которому распространяется основная волна ТЕ10, поэтому вдоль оси , проходящей в плоскости вектора , распределение амплитуды поля косинусоидальное, а вдоль оси , проходящей в плоскости вектора , амплитудное распределение равномерное.

Поскольку фронт волны в рупоре трансформируется в цилиндрический, то при проведении анализа целесообразно перейти к цилиндрической системе координат (см. рис. 3.6). Рупор считаем бесконечно длинным, а его стенки – идеально проводящими.

Также считаем, что внутри рупора плотности поверхностных электрических и магнитных токов и равны нулю. Эти условия означают, что источники возбуждения электромагнитного поля находятся вне рупора.

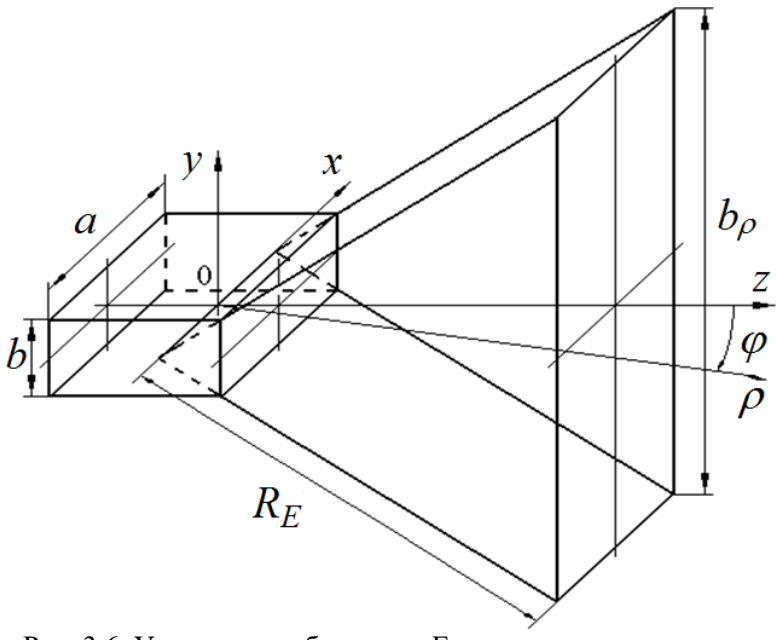

Рис. 3.6. Условное изображение Е-секториального рупора.

Внутри рупора уравнения Максвелла при (среда – воздух) имеют вид:

, (3.29)

Из (3.29) составляющие полей и
в цилиндрической системе координат имеют вид:

(3.30)

(3.31)

Поскольку в рассматриваемом Е-секториальном рупоре, как и в прямоугольном волноводе, возбуждается основная волноводная волна ТЕ10, то ей и ограничим проводимые исследования. Для волн типа ТЕmn равна нулю радиальная составляющая электрического поля ( ) [121]. Для рассматриваемой волноводной волны , что соответствует равенству нулю еще одной

составляющей электрического поля (см. рис. 3.6). Таким образом, для Е-секториального рупора с учетом (3.33) . Тогда из двух систем уравнений (3.30) и (3.31) получим:

(3.32)

(3.33)

Системы уравнений (3.32) и (3.33) будем решать относительно . Из системы уравнений (3.33) выделим и :

, . (3.34)

Подставив теперь полученные значения и из (3.33) в выражение (3.34), мы получим дифференциальное уравнение относительно . А если мы определим , то тогда сможем найти и остальные компоненты электромагнитного поля.

. (3.35)

Если теперь умножим обе части выражения (3.35) на и обозначим

, то соотношение (3.35) примет вид:

. (3.36)

Уравнение (3.36) будем решать методом разделения переменных. Для этого переменную представим в виде произведения двух функций, каждая из которых будет зависеть только от одной переменной, т.е.

. (3.37)

После подстановки значения из (3.37) в уравнение (3.41) получим:

. (3.38)

Разделим обе части (3.38) на произведение :

. (3.39)

Как нетрудно заметить, обе части соотношения (3.39) будут равны друг другу только в том случае, если они будут равны постоянной величине, которую обозначим через . Тогда:

(3.40)

Перепишем систему уравнений (3.40) в виде:

(3.41)

Таким образом, решение дифференциального уравнения (3.36) в частных производных свелось к решению двух обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение первого уравнения системы (3.41) представим в виде тригонометрической функции:

. (3.42)

Второе выражение в системе уравнений (3.42) называется уравнением Бесселя [125]. Его решением является линейная комбинация функций Ханкеля первого и второго рода -го порядка:

. (3.43)

Используя приведенные уравнения (3.42) и (3.43) запишем выражение (3.37) в следующем виде:

. (3.44)

Постоянные интегрирования , , и в (3.43) определяются из граничных и начальных условий. Граничным условием для рассматриваемой задачи является равенство нулю

касательной составляющей вектора электрического поля на стенках секториального рупора (см. рис. 3.6), т.е.

. (3.45)

Тогда из уравнения (3.45) можем записать:

(3.46)

Уравнения (3.46) будут выполняться при:

(3.47)

Здесь и – любые целые числа. Отсюда, сначала складывая первое и второе уравнения, а потом из первого вычитая второе, получим:

. (3.48)

Здесь необходимо отметить, что вычитание из целого числа, кратного , не изменит результат, поэтому можем написать:

,

тогда соотношения (3.48) примут вид:

, (3.49)

где фактически определяет число полуволн, укладывающихся, между стенками рупора, параллельными (см. рис. 3.6). А поскольку мы рассматриваем только основную волноводную волну ТЕ10, то для этого конкретного случая ( ):

. (3.50)

Теперь необходимо определить постоянные и , которые входят в уравнение (3.44). Перепишем с учетом (3.50) соотношение, входящее в систему уравнений (3.41), в следующем виде:

(3.51)

Здесь – фазовая постоянная волны ТЕ10. При больших значениях ( ) для функций Ханкеля и справедливы асимптотические выражения [126]:

(3.52)

(3.53)

Если для данного конкретного случая мы примем зависимость от времени в виде ,

то тогда функция Ханкеля первого рода на больших расстояниях от вершины рупора будет характеризовать волну, которая распространяется в сторону вершины. А функция Ханкеля второго рода будет соответствовать волне, распространяющейся от вершины рупора в сторону увеличивающихся значений , т.е. к раскрыву. Поскольку решение задачи проводится в предположении бесконечной длины
Е-секторального рупора, то отраженных от раскрыва волн, которые будут распространяться в

сторону вершины, не должно быть. Поэтому в уравнении (3.48) необходимо положить . Тогда

множитель будет характеризовать интенсивность поля.

На основании сказанного выше и с учетом выражений (3.34), (3.44) и (3.53) запишем в окончательном виде составляющие электромагнитного поля в Е-секториальном рупоре, в котором, как и в прямоугольном волноводе, распространяется преимущественно ТЕ10 волна:

; (3.54)

; (3.55)

(3.56)

Здесь мы исходили из того, что – скорость света в вакууме,

– волновое сопротивление поперечной электромагнитной волны при воздушном

заполнении ( ) [127], – круговая частота.

Полученные соотношения позволяют сделать ряд важных замечаний. Удельное волновое сопротивление Е-секториального рупора:

, (3.58)

всюду в рупоре больше , поскольку . Фазовая скорость в Е-секториальном рупоре такая же, как и в волноводе, и не меняется с удалением от вершины рупора, оставаясь равной:

. (3.59)

В соответствии с (3.56) и (3.58) волны в Е-секториальном рупоре характеризуются

критической длиной волны и вообще говоря, не становятся чисто поперечными так же, как и аналогичные волны в прямоугольном волноводе. Поперечные волны в Е-секториальном рупоре будут иметь место на больших расстояниях от вершины рупора и при выполнении условия

. В этом случае (см. (3.54), (3.56)) и компонентой электромагнитного поля можно пренебречь.

Основным отличием поля в секториальном рупоре от поля в волноводе является

цилиндрическая форма волны. При этом амплитуда поля убывает пропорционально (см. выражения 3.53, 3.54), а фронтом волны является поверхность цилиндра. Поэтому в раскрыве Е-секториального рупора будут фазовые искажения.

Для определения фазовых искажений в раскрыве

E-секториального рупора рассмотрим его сечение в плоскости . Для
E-секториальных рупоров, применяемых на практике, поле в раскрыве остается невозмущенным при относительно больших размерах поперечного сечения, т.е. оно фактически равно полю набегающей волны [127]. На рис. 3.7 поперечное сечение рупора представлено в виде треугольника. А поскольку фазовый фронт волны, распространяющейся по рассматриваемому рупору, образует цилиндрическую поверхность, то в разных точках раскрыва фазы поля будут различны. Линия 0O′ является линией постоянных фаз поля в этом сечении.

Фазовое распределение в выражении (3.54) определяется как:

, (3.60)

и если в точке O′ (середина раскрыва) примем фазу поля равной нулю, то тогда (3.60) примет вид:

. (3.61)

В произвольной точке F, расположенной на оси раскрыва, на расстоянии от точки O′ фаза поля отстает от фазы в середине раскрыва на фазовый угол (см. рис. 3.7):

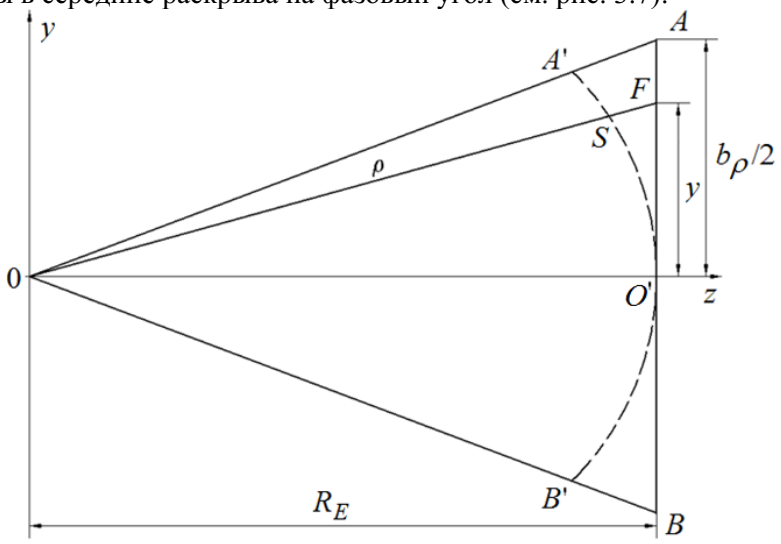

Рис. 3.7. Определение фазовых искажений в раскрыве E-секториального рупора

Фазовое распределение в выражении (3.54) определяется как:

. (3.62)

Поскольку обычно у рупоров ширина раскрыва значительно меньше длины , то к (3.
62) можно применить условие . Используя разложение корня по степеням и отбрасывая члены выше второго порядка, выражение (3.62) можем переписать в виде:

. (3.63)

Согласно рис. 3.7 , тогда с учетом (3.61) и (3.63) запишем выражения (3.33) и (3.35) в следующем виде:

, (3.64)

, (3.65)

где .

В случае принятого выше условия при расчете поля излучения можно сделать

следующее допущение [125] . Тогда, с учетом сказанного выше, получим в окончательном виде соотношения, определяющие компоненты электромагнитного поля в раскрыве Е -секториального рупора:

; (3.66)

. (3.67)

, . (3.68)

3.3.2. Анализ внешней задачи для Е-секториального рупора. Для определения напряженности

электрического поля Е-секториального рупора в дальней зоне используем правило Бонч-

Бруевича [128]. Сначала рассмотрим плоскость (см. рис. 3.8). Предполагаем, что значение напряженности электрического поля одиночного излучателя Гюйгенса в дальней зоне нам известно [129]. Поэтому для расчета поля раскрыва в этой зоне представим его заполненным непрерывно расположенными излучателями Гюйгенса, амплитуда, фаза и направление токов которых одинаковы.

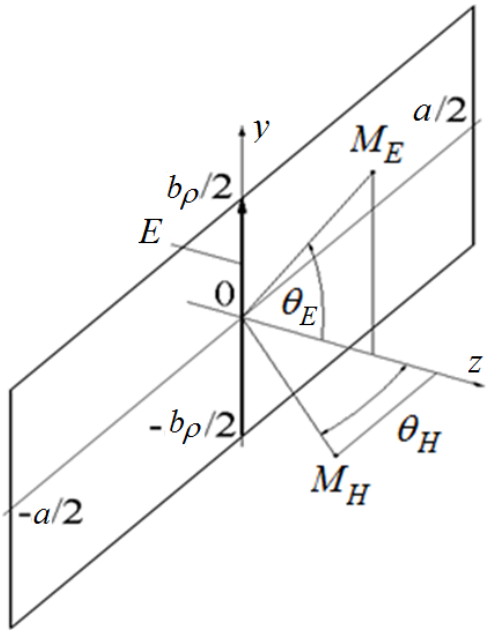

Рис. 3.8. Излучающий раскрыв Е-секториального рупора.

Таким образом, для расчета функции направленности системы идентичных и одинаково ориентированных излучателей необходимо функцию направленности одного излучателя умножить на функцию направленности системы излучателей , рассматриваемых как ненаправленные. Напряженность поля раскрыва в плоскости вектора найдем из выражения [130, 131]:

. (3.69)

Величину найдем, используя выражение (3.66) и обратное преобразование Фурье от амплитудно-фазового распределения в раскрыве рассматриваемого рупора. Тогда соотношение (3. 69) примет вид:

. (3.70)

Рассмотрим первый интеграл в (3.70). Опуская промежуточные выкладки и учитывая, что , [125], запишем выражение (3.70) в виде:

, (3.71)

где . Этот интеграл в случае рассматриваемого нами сечения (

) равен . В направлении, перпендикулярном к раскрыву рупорного излучателя

, . После нормировки ( ) запишем

в окончательном виде выражение, определяющее ДН Е-секториального рупора в плоскости (см. рис. 3.8).

, (3.72)

где – нормированная ДН одиночного излучателя Гюйгенса в дальней зоне [129].

Из соотношения (3.74) следует, что ДН Е-секториального рупора в плоскости вектора основной волны в прямоугольном волноводе ТЕ10 совпадает с ДН открытого конца прямоугольного волновода в этой же плоскости при отсутствии в нем отражения ( ) [129].

В качестве следующего шага проанализируем ДН Е-секториального рупора в плоскости (см. рис. 3.8). В этом случае, по аналогии с тем, как мы делали выше, запишем выражение, определяющее напряженность электрического поля раскрыва в дальней зоне в плоскости вектора :

. (3.73)

Рассмотрим второй интеграл в выражении (3.73) отдельно:

. (3.74)

Преобразуем показатель степени экспоненты в выражении (3.74):

. (3.75)

И после введения новой переменной выражение (3.75) примет вид:

, (3.76)

где , ,

.

Как известно [125]:

, (3.77)

тогда выражение (3.76) примет вид:

. (3.78)

Рассмотрим первый интеграл в выражении (3.78), который с учетом формулы Эйлера [125] примет вид:

. (3.79)

Аналогичным образом запишем второй интеграл, входящий в выражение (3.78):

. (3.80)

Интегралы, входящие в соотношения (3.79) и (3.80), называются интегралами Френеля, которые определяются как [132]:

. (3.81)

Теперь запишем в окончательном виде выражение (3.74) с учетом соотношений (3.79)…(3.81) :

. (3.82)

Теперь рассмотрим первый интеграл, входящий в выражение (3.73).

. (3.83)

На основании полученных выражений (3.82) и (3.83), определяющих интегралы, входящие в выражение (3.73), запишем последнее в виде:

. (3.84)

Соотношение, определяющее ДН Е-секториального рупора в плоскости , имеет вид:

. (3.85)

В направлении, перпендикулярном к раскрыву рупорного излучателя:

. (3.86)

После введения новой переменной выражение (3.86) примет вид:

, (3.87)

где , .

Интеграл в выражении (3.58) с учетом формулы Эйлера [125] примет вид:

. (3.88)

Интегралы, входящие в соотношение (3.88), как было показано выше, называются интегралами Френеля. Они определяются соотношением (3.81). Теперь запишем в окончательном виде выражение (3.86):

. (3.89)

При , а – нормированная ДН одиночного излучателя Гюйгенса в дальней зоне. Теперь с учетом (3.84) и (3.89) запишем выражение (3.85), определяющее ДН

Е-секториального рупора в плоскости (см. рис. 3.7).

. (3.90)

Прежде, чем приступить к анализу уравнений (3.72) и (3.90), необходимо учесть ряд важных

моментов. Во-первых, дальняя зона излучателя определяется соотношением [129]. Во-вторых, согласно выражению (3.66) фаза поля в раскрыве Е-секториального рупора определяется по

формуле . Максимальное отставание фазы будет иметь место на краях раскрыва рупора при (см. рис. 3.8). В этих точках [103]. Отсюда получим необходимое соотношение для определения длины секториального рупора в плоскости вектора . В плоскости вектора раскрыв рассматриваемого секториального рупора равен поперечному сечению стандартного прямоугольного волновода сантиметрового диапазона (11 мм), поэтому длина рупора и расстояние , на котором он должен быть расположен от кустов картофеля, однозначно будет определяться раскрывом рупора в плоскости вектора .

Перед тем, как проводить численное моделирование, необходимо рассмотреть поведение параметра , который определяет пределы интегрирования в выражении (3.84) в зависимости от высоты куста картофеля . Это связано с тем, что при различных значениях , , и параметр может изменять знак с положительного на отрицательный, что в итоге приведет к искажению и неверному трактованию ДН Е-секториального рупора. Параметр мы не рассматриваем, поскольку он будет положительным при изменении , , и в указанных ниже пределах. Предварительные исследования показали, что необходимо выбирать (см. рис. 3 .9) в плоскости вектора на частоте 20 ГГц (15 мм): 20 мм (длина рупора выбирается с учетом приведенного выше неравенства, 10 мм, красная кривая); 30 мм (25 мм, синяя кривая); 40 мм (40 мм, зеленая кривая). При построении этих графиков мы перешли от угла к изменению по высоте куста картофеля , используя выражение . В этом случае EMBED Equation.3 . Как видно из приведенного графика, в указанных пределах изменения параметра параметр имеет положительные значения при всех рассмотренных размерах раскрыва секториального рупора и его длины .

Рис. 3.9. Зависимости параметра от высоты кустов картофеля для трех значений раскрыва Е-секториального рупора

На рис. 3.10 представлена ДН Е-секториального рупора, построенная в плоскости на расстоянии 1200 мм с использованием выражения (3.74), для стандартного размера прямоугольного волновода, равного 11 мм (синяя кривая). При построении ДН мы перешли от угла к изменению по ширине , используя выражение . В этом случае, как было показано выше,

,

a .

На этом же рисунке показана ДН открытого конца прямоугольного волновода в плоскости (см. рис. 3.6), построенная на том же самом расстоянии (красная кривая) по формуле [133]:

, (3.91)

где – волноводная длина волны TE10.

Рис. 3.10. ДН *E*-секториального рупора в плоскости , построенная на расстоянии 1200 мм от излучающего раскрыва

Как видно из рис. 3.10 обе кривые по уровню –15 дБ отличаются не более, чем на 1 дБ. Это говорит о правильности выполненных нами расчетов ДН

E-секториального рупора в плоскости . По уровню – 8 дБ ширина ДН (синяя кривая) составляет 800 мм. Это соответствует одновременному облучению трех кустов картофеля, поскольку расстояние между соседними кустами в ряду порядка 400 мм. Поэтому для увеличения скорости движения трактора и уменьшения времени облучения целесообразно использовать две рядом расположенные апертуры. Если выбрать расстояние между центрами двух секториальных рупоров равным 800 мм, то по уровню –7 дБ ширина суммарной ДН составит 1600 мм ,т.е. одновременно можно облучать четыре куста картофеля.

Далее проанализируем ДН E-секториального рупора в плоскости , которая определяется

выражением (3.92). Расчеты проведены для тех же самых трех значений и , для которых строились графики на рис. 3.9. Вычисленные ДН E-секториального рупора показаны на рис. 3.11.

Рис. 3.11. ДН *E*-секториального рупора в плоскости при различных размерах раскрыва и длине .

Здесь красная кривая соответствует 20 мм, 10 мм; синяя кривая: 30 мм, 25 мм; зеленая кривая: 40 мм, 40 мм. Все кривые построены для 15 мм при

Из приведенных на рис. 3.11 ДН видно, что в случае раскрыва, равного 40 мм (зеленая кривая), по уровню –13 дБ порядка 95 % излучаемой мощности (см. рис. 3.11) сосредоточены примерно в 400 мм по высоте, считая от поверхности земли. А это примерно соответствует высоте кустов картофеля. Таким образом, для проведения дальнейших исследований выбираем

E-секториальный рупор, раскрыв которого и длина равны 40 мм.

Мы рассмотрели одиночный Е-секториальный рупор. Однако, как было отмечено выше, на практике целесообразно использовать два синфазных облучателя, которые будут работать в сложных природных условиях. Это связано с тем, что в раскрыв облучателей могут попадать элементы зеленой массы растений и земли. Поэтому сами раскрывы секториальных рупоров необходимо закрывать. Для этих целей обычно используются диэлектрические линзы (см. 3.12).

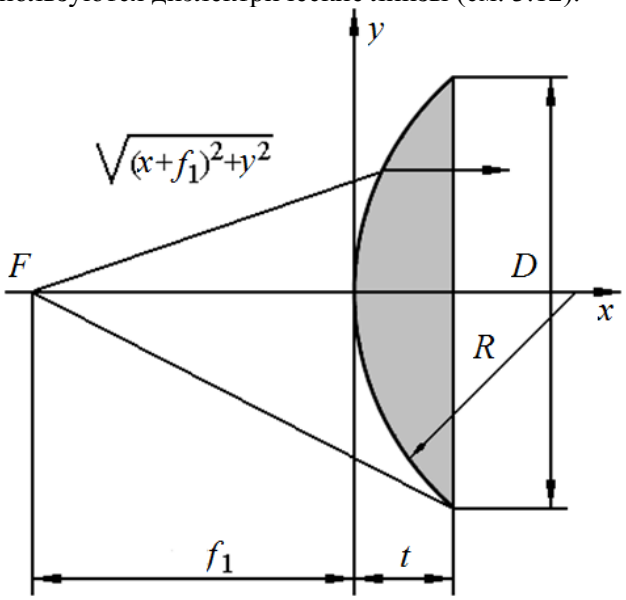

Рис. 3.12. Диэлектрическая линза в раскрыве Е-секториального рупора

При этом материал, из которого изготовлены линзы, должен обладать малыми диэлектрическими потерями и высокой механической прочностью. Исходя из этого, выбираем в

качестве материала линз полистирол ([134]). Порядок расчета геометрических размеров линз определяется следующей последовательностью:

1. Выбираем фокусное расстояние линзы. Чаще всего фокусное расстояние принимают

равным большему размеру раскрыва рупора, поэтому принимаем: 40 мм.

2. Выражение, связывающее толщину диэлектрической линзы , фокусное расстояние и

диаметр , который в данном случае равен , для случая имеет вид [110, 135]:

, (3.92)

где 1,612;

40 мм;

10 мм.

Для того, чтобы определить фокусное расстояние диэлектрической линзы , уравнение (3.92) будем решать графически. Результаты решения представлены на рис. 3.13.

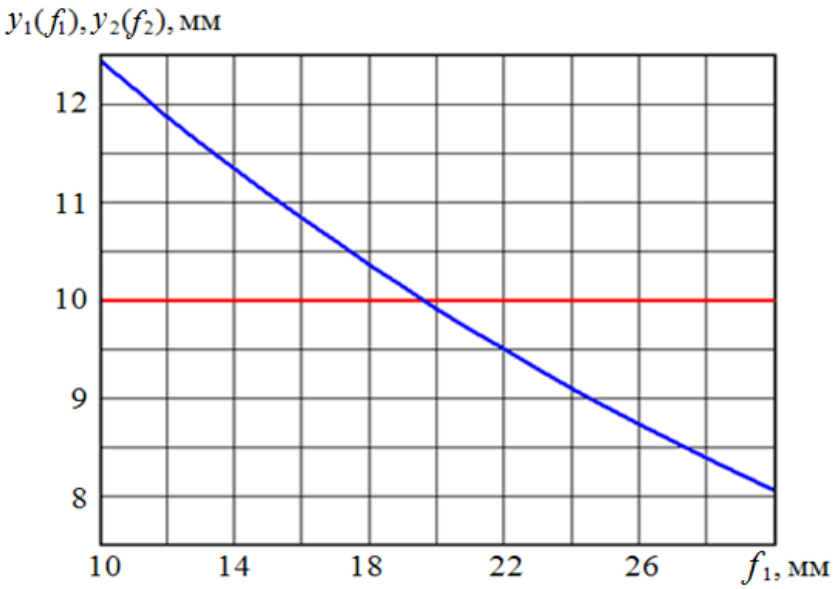

Рис. 3.13. Графическое решение уравнения (3.94)

На рис. 3.13 приведены две зависимости: (красная прямая), и

(синяя кривая).

Как видно из рисунка, уравнение (3.92) имеет решение при f1= 19,5 мм.

– коэффициент преломления материала линзы.

3. Вычислим амплитудное распределение напряженности поля в плоскости раскрыва Е-секториального рупора при наличии диэлектрической линзы в его раскрыве. Для этого используем выражение:

. (3.93)

Соотношение, определяющее ДН Е-секториального рупора с линзой в плоскости , имеет вид:

. (3.94)

Как несложно заметить из выражения (3.93) при . Тогда соотношение (3.94) примет окончательный вид:

. (3.95)

Результаты расчета по формуле (3.95) представлены на рис. 3.14 (зеленая кривая).

Рис. 3.14. Рассчитанная ДН *E*-секториального рупора в плоскости на расстоянии 1200 мм

Как видно из рисунка, наличие диэлектрической линзы в раскрыве

Е-секториального рупора не искажает ДН в плоскости , а приводит лишь к незначительному ее сужению. При этом в данном случае по уровню –13 дБ порядка 95% излучаемой мощности будут сосредоточены в 360 мм по высоте, считая от поверхности земли. А это значение лишь незначительно отличается от полученного выше результата.

Поскольку диэлектрическая линза представляет собой часть поверхности цилиндра, то в плоскости во всех сечениях она будет иметь плоскую границу. Учитывая это, а также то, что материал линзы обладает малыми потерями, можем сказать, что в рассматриваемой плоскости ДН не претерпит существенных изменений.

Выводы по разделу

1. Создание радиоимпульсного источника электромагнитной энергии с параметрами: мощность 540 Вт, длительность радиоимпульса 10-6 с, скважность 160, частота заполнения радиоимпульсов 20 ГГц, возможно с применением двухкаскадного сумматора мощности с 6 диодами типа 3А762А в каждом каскаде

2. Низкая относительная нестабильность частоты генератора в пределах 10-6…10-7 степени возможно с синхронизацией частоты сумматора мощности сигналом внешнего высокостабильного синхронизирующего генератора, у которого для стабильности частоты используется цилиндрический резонатор «проходного» типа с параметрами: R = 32 мм; h = 7,5 мм; Q =5400; G = 0,23510-5 См.

3. Для угнетения репродуктивной способности колорадского жука необходимо применять секториальную рупорную антенну с параметрами: поперечные размеры 40х11 мм; длина рупора 40 мм; ширина диаграммы направленности по уровню –8 дБ в плоскости x0z 800 мм.

4. Для защиты антенны от посторонних веществ (пыль, влага) в её раскрыв необходимо помещать диэлектрическую линзу с параметрами: диэлектрическая проницаемость ; диаметр 40 мм; толщина 10 мм; фокусное расстояние 19,5 мм.

РАЗДЕЛ 4
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УНИЧТОЖЕНИЮ КОЛОРАДСКИХ ЖУКОВ И ЕГО ЛИЧИНОК

4.1. Цель и задачи экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований являлось проверка достоверности теоретических подходов и моделей, описывающих процесс воздействия радиоимпульсных ЭМИ сантиметрового диапазона на колорадского жука, его личинок и электронных систем для их уничтожения. В соответствии с целью экспериментальных исследований были определены задачи эксперимента и пути их решения:

- разработка и исследование основных характеристик синхронизирующего генератора;
- разработка, макетирование и отладка электронных систем 12-и диодного генератора для уничтожения насекомых-вредителей картофеля;
- разработка и исследование основных характеристик широкополосного антенного устройства ;
- проведение производственных испытаний разработанных электронных устройств по уничтожению биологических насекомых-вредителей картофеля.

4.2. Разработка и анализ технических параметров синхронизирующего генератора

На основании теоретических исследований был изготовлен опытный образец генератора на ЛПД стабилизированного по частоте внешним резонатором. В качестве внешнего резонатора был использован цилиндрический резонатор, включённый по схеме на «проход» (рис. 3.3).

Цилиндрический резонатор изготовлен из латуни и имеет следующие геометрические размеры: радиус R = 32 мм; длина равна 20 мм. Резонатор возбуждается с помощью отверстия связи диаметром 2 мм. Перестройка частоты резонатора осуществляется бесконтактным подстроечным поршнем.

Стабилизируемый генератор выполнен в виде волноводно-штыревой конструкции сечением 11х4 мм2. Диод ЛПД крепиться в волноводе с использованием металлического круглого стержня , ось которого параллельна вектору ЭП (в прямоугольном волноводе распространяется волна Н10).

Общий вид синхронизирующего генератора приведен на рис. 4.1.

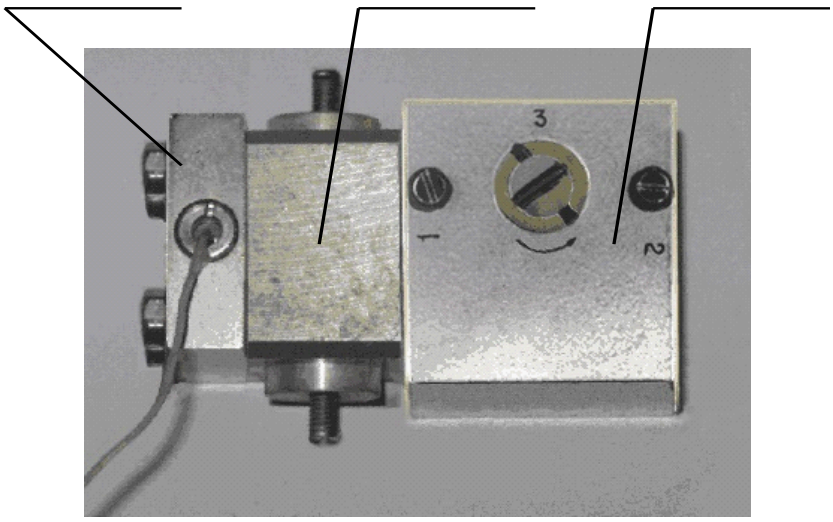

Рис. 4.1. Внешний вид конструкции генератора со стабилизирующим объемным резонатором на волне

На рис. 4.2 приведена функциональная схема экспериментальной установки для определения добротности резонансной системы синхронизирующего генератора и коэффициента связи со стабилизирующим резонатором (СР), полосы частотной перестройки и качества спектра.

Рис. 4.2. Функциональная схема установки для определения добротности и коэффициента связи со стабилизирующим резонатором

Источником колебаний служит клистронный генератор К43-А, согласованный с СВЧ трактом при помощи вентилей и аттенюатора. Сигнал с генератора пилообразного напряжения одновременно поступает на отражатель клистрона и электронный осциллограф С1-54. Этим достигается синхронность запуска клистрона и развертки осциллографа. Модулированные по частоте радиоимпульсы через ферритовые вентили, аттенюатор, циркулятор, измерительную линию поступают в *СР*. Отраженный от *СР* сигнал через измерительную линию, циркулятор проходить 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

. Измеренная добротность стабилизирующего резонатора составила величину Q = 5450 для цилиндрического резонатора с параметрами: R = 32 мм. h =7,5 мм. Абсолютная погрешность измерения добротности не превышает 10%. Коэффициент связи определяется по измеренной величине КСВ и по виду резонансной кривой на осциллографе.

На рис. 4.3 приведена зависимость диапазона устойчивого затягивания частоты от коэффициента связи между резонаторами.

Из зависимости (рис. 4.3) видно, что с увеличением коэффициента связи между резонаторами расширяется диапазон затягивания. В данном эксперименте при затягивании частоты генератора стабилизирующим резонатором коэффициент стабилизации частоты составил более 100 единиц.

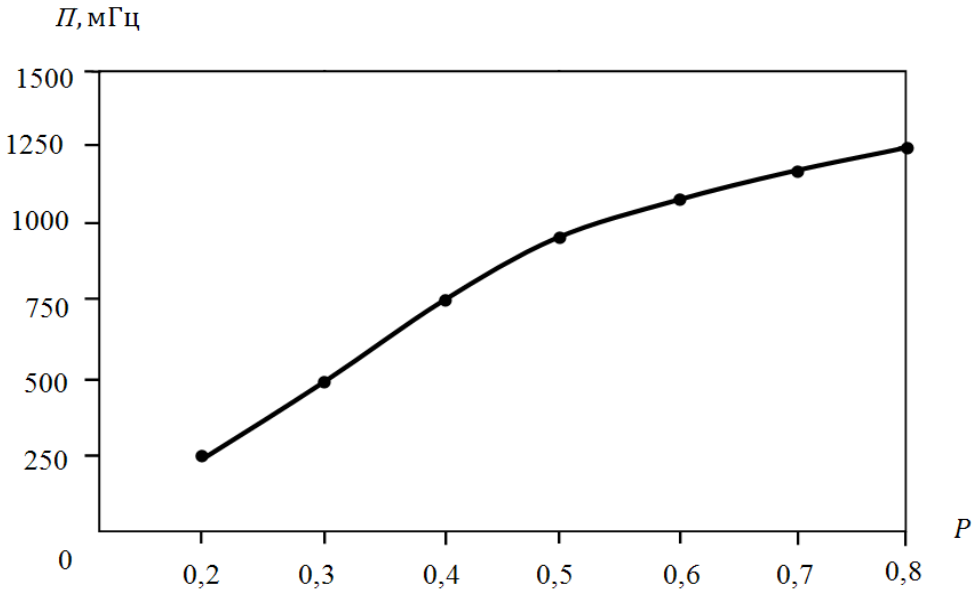

Рис. 4.3. Зависимость полосы затягивания частоты от коэффициента связи между резонаторами

Измеренная относительная нестабильность частоты синхронизирующего генератора составила 0,8·10-6 единиц для коэффициента связи 0,6.

4.3. Экспериментальные исследования энергетических и спектральных характеристик многодиодного генератора сантиметрового диапазона

Проведенные теоретические исследования показали, что для уничтожения насекомых-вредителей картофеля необходимы источники электромагнитной энергии с параметрами: мощность 600 Вт; длительность радиоимпульса 1·10-6 с; скважность 160; частота заполнения радиоимпульсов 20 ГГц. Получение такой мощности возможно на основе 2-х каскадного сумматора мощности с 6 диодами типа 3А762А в каждом каскаде и выходной мощностью в импульсе 300 Вт. На рис. 4.4 приведена конструкция шестидиодного генератора на ЛПД в цилиндрическом резонаторе, а общий вид на рис. 4.5.

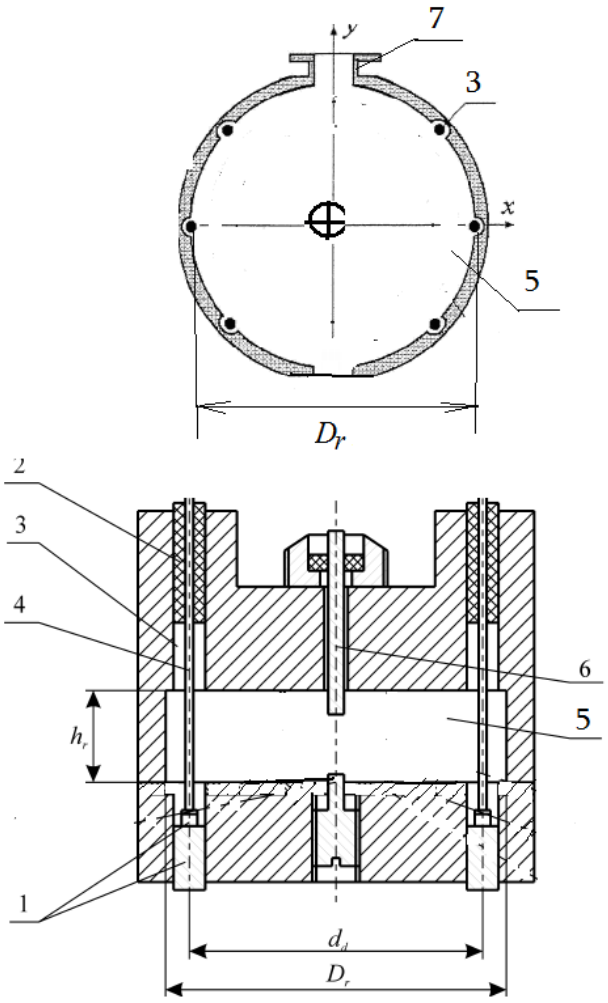

Рис. 4.4. Эскиз сумматора мощностей N = 6 ЛПД в см диапазоне волн, выполненном в цилиндрическом резонаторе с волной

Диоды 1 на теплоотводящих основаниях, совместно с антипаразитными нагрузками 2 установлены в коаксиальных линиях 3; внутренние линии проводники этих линий 4 обеспечивают подведение электрического питания к диодам. Механическая подстройка частоты производится штырем 6. Коаксиальные диодные линии 3 расположены на боковой поверхности резонатора 5 в пучностях электрического поля. Оси диодных линий параллельны оси резонатора 5 и расположены на равных расстояниях .

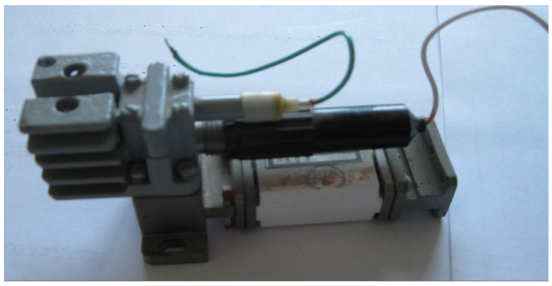

Рис. 4.5. Общий вид шестидиодного генератора

Цилиндрический резонатор 5 (рис. 4.7) изготовлен из латуни с параметрами: высота резонатора 15 мм, диаметр 64 мм.

Диоды 1 (3А762А) на теплоотводящих медных основаниях, совместно с антипаразитными нагрузками 2 установлены в коаксиальных линиях 3. Коаксиальная линия 3 с внешним диаметром 7, 5 мм, диаметром внутреннего проводника 3 мм и диодом 1 нагружена на антипаразитное сопротивление 2 из ферроэпоксида величиной 0,5 Ом. Внутренние проводники 4 обеспечивают подведение напряжения источника питания к диодам. Связь с нагрузкой осуществляется волноводом 7 сечением 11 5 мм. Механическая подстройка частоты генератора производится металлическим штырём 6. Разработанная конструкция многодиодного (N = 12) сумматора мощностей импульсных ГЛПД в режиме внешней синхронизации представлена на рис. 4.6. При разработке сумматора мощностей использованы стандартные волноводные элементы
сечением 11 5 мм: ферритовые вентили ФВВН2-4, циркуляторы 3ЦВ-100В, аттенюаторы Д3-33, фазовращатели ФВВ-3Н, Е-Н тройники.

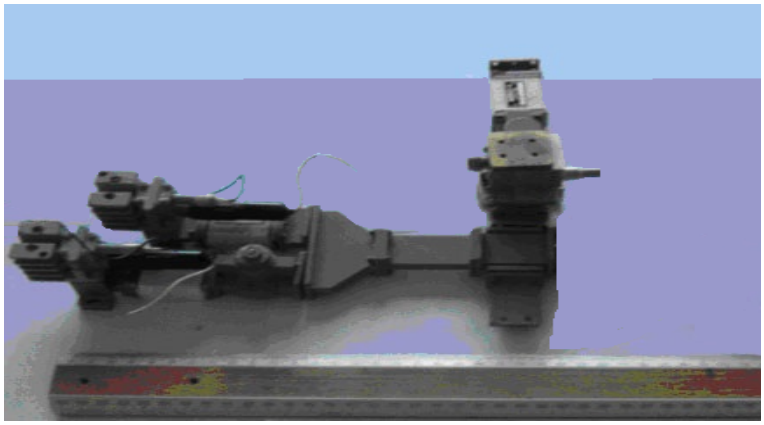

Рис. 4.6. Внешний вид сумматора мощностей ГЛПД

На рис. 4.7 приведены экспериментальные зависимости импульсной мощности многодиодного сумматора с N = 12 от скважности для длительности импульса мкс и мкс.

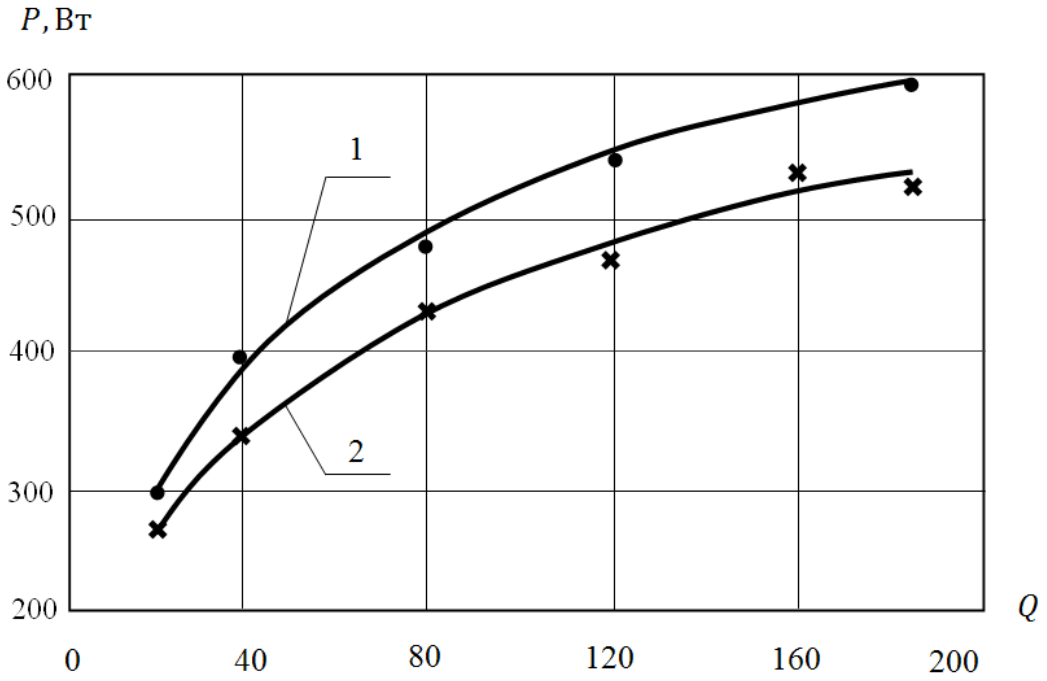

Рис. 4.7. Зависимость импульсной мощности двенадцатидиодного генератора от скважности импульсов: 1) мкс; 2) мкс.

4.4. Экспериментальное исследование характеристик широкополосной антенны

В качестве первого этапа экспериментального исследования рассчитанного рупорного излучателя проанализируем коэффициент отражения от нашей антенны, нагруженной на свободное пространство. Для проведения этих измерений используем измеритель КСВН панорамный Р2-66 (сечение волноводного тракта 11×5,5 мм; диапазон частот 17,44…25,86 ГГц; пределы измерения КСВН 1,06…5) и стандартную схему измерений. Результаты измерений в полосе частот 19,5…20,

5 ГГц представлены на рис. 4.8. Как видно из приведенного графика, на частоте 20,0 ГГц КСВН рассматриваемого
Е-секториального рупора, нагруженного на свободное пространство, равен 1,9. Это соответствует

модулю коэффициента отражения по полю 0,310.

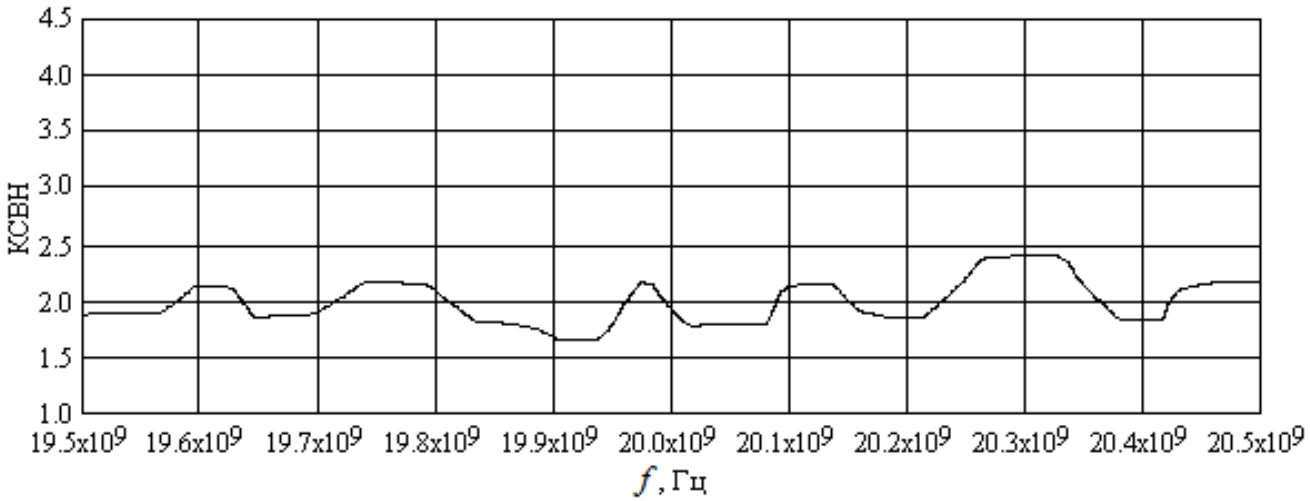

Рис. 4.8. КСВН Е-секториального рупора, нагруженного на свободное пространство

Теперь можем определить уровень мощности, излучаемой из раскрыва Е-секториального рупора из уравнения

. При единичном уровне мощности , подводимой к раскрыву рупора, несложно определить, что излученная мощность составляет 0,9 от подводимой. Таким образом, проведенные исследования показали, что потери на излучение в Е-секториальном рупоре указанных выше геометрических размеров на длине волны 15 мм (20 ГГц) не превышают 10%. Кроме того, можно сказать, что Е-секториальный рупор действительно хуже согласуется со свободным пространством, чем Н-секториальный рупор. На определенных частотах КСВН достигает величины 2,5, тогда как в случае Н-секториального рупора в диапазоне перестройки 1 ГГц максимальное значение КСВН не превышает 2,0. В результате следующего анализа измерим суммарную ДН двух секториальных рупоров на расстоянии 1200 мм от плоскости раскрыва. На основании выполненных исследований нами были изготовлены два Е-секториальных рупора, имеющих следующие геометрические размеры: 40 мм, 40 мм, 11 мм. Расстояние между центрами рупоров равно 800 мм. Общий вид конструкции приведен на рис. 4.9.

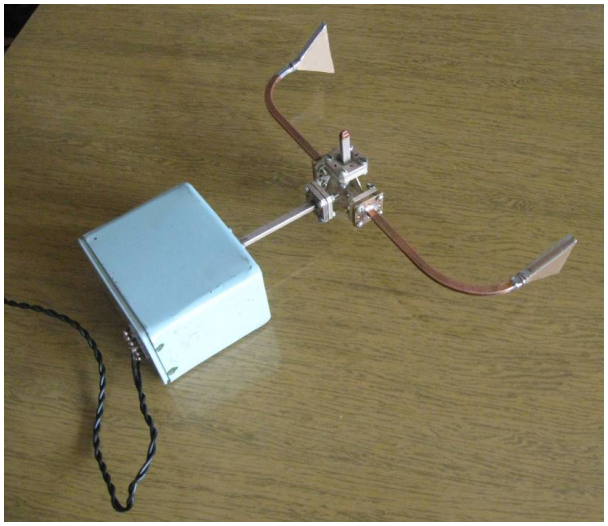

Рис. 4.9. Конструкция с двумя Е-секториальными рупорными излучателями

Исследования проведены на частоте 20,0 ГГц. Для того, чтобы определить диаметр цилиндра , из которого изготавливается диэлектрическая линза, будем исходить из следующих соображений. Поскольку 40 мм, то (см. рис. 3.12). При 10 мм получим 25 мм, т.е. диаметр цилиндра равен 50 мм. Блок-схема измерительного стенда приведена на рис. 4.10:

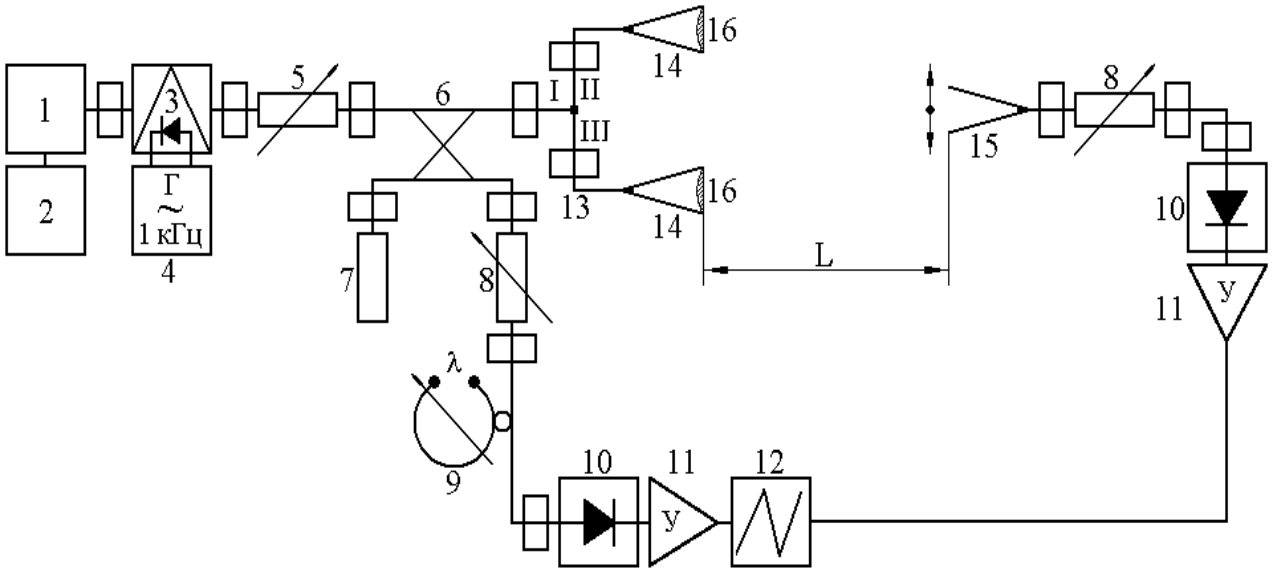

Рис. 4.10. Блок-схема экспериментального стенда для измерения ДН Е-секториального рупора

Как видно, схема состоит из передающего и приемного трактов. В состав передающего тракта входят: полупроводниковый генератор 1 с блоком питания 2; p-i-n модулятор 3, на который подается синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц от низкочастотного генератора 4 (Г3-106); установочный аттенюатор 5, волноводный тройник 13 в плоскости вектора основной волны в прямоугольном волноводе и две Е-секториальных рупорных антенны 14. В раскрывах обоих излучателей расположены диэлектрические линзы из полистирола 16. Плечи волноводного тройника обозначены цифрами I, II и III. При такой запитке волноводного тройника волны в плечах II и III будут синфазны. В этом случае мы получим суммарную ДН.

Генератор представляет собой волноводную секцию с диодом Ганна 3А719А. Модулятор включен в тракт для расширения динамического диапазона измеряемых сигналов. В схеме предусмотрен дополнительный канал для контроля амплитуды и частоты сигнала полупроводникового генератора. Поэтому в экспериментальную установку включены: направленный ответвитель 6; поляризационный аттенюатор 8; резонансный волномер 9; детекторная секция 10; селективный усилитель 11 (У2-6); двулучевой осциллограф 12 (С1-83). Для устранения возможных переотражений в тракте во второе плечо направленного ответвителя 6 включена согласованная нагрузка 7. В состав приемного тракта входят: измерительный зонд 15; поляризационный аттенюатор 8; детекторная секция 10; селективный усилитель 11, выходной сигнал с которого подается на второй входной канал осциллографа 12. Мы проводим исследования на большом расстоянии от излучателей (1200 мм), поэтому для расширения динамического диапазона принимаемых сигналов в качестве измерительного зонда используем не открытый конец прямоугольного волновода сечением 11×5,5 мм , а пирамидальный рупор 15 с размерами раскрыва 40×40 мм. Такая приемная апертура будет обладать интегрирующей характеристикой. Весь приемный тракт собран на подвижной платформе, которая может перемещаться с шагом 2 мм в направлении, перпендикулярном осям излучающих апертур. Результаты экспериментального измерения ДН в плоскости , которая соответствует плоскости вектора основной волны в волноводном тракте, представлена на рис. 4.11 (синие кружки).

Рис. 4.11. Суммарная ДН двух *E*-секториальных рупоров, расположенных на расстоянии 800 мм друг от друга

Расстояние между центрами двух *E*-секториальных рупоров составило 800 мм. При этом ширина суммарной ДН по уровню –5 дБ составила 1400 мм (см. рис. 4.11). Этот результат находится в хорошем соответствии с полученным выше результатом (1600 мм по уровню –7дБ).

Как видно из рисунка, максимальное отличие измеренной и рассчитанной ДН Н-секториального рупора указанных выше геометрических размеров не превышает 9%. Это говорит о том, что и на практике ширина сдвоенной ДН исследуемых излучателей в плоскости по уровню –5 дБ будет равна примерно 1400 мм. Кроме того, проведенные экспериментальные исследования подтвердили тот факт, что в этой плоскости диэлектрическая линза не оказывает существенного влияния на распределение электрического поля в дальней зоне.

Теперь измерим ширину ДН в плоскости . Для этого в схеме, приведенной на рис. 4.10, необходимо произвести ряд изменений. Во-первых, из нее исключается волноводный тройник, вместо которого ставится волноводная скрутка, к выходному фланцу которой подключается одна излучающая апертура указанных выше размеров с диэлектрической линзой в раскрыве. Расчетная ДН Е-секториального рупора в плоскости с указанными выше размерами приведена на рис. 4.12. Здесь же в виде синих кружков показана измеренная ДН на расстоянии 1200 мм.

Из рисунка видно, что по уровню –12 дБ максимальное отличие расчета и эксперимента не превышает 12 %. Это говорит о правильности выполненных теоретических расчетов и о применимости Е-секториального рупора указанных геометрических размеров для облучения кустов картофеля. С другой стороны, экспериментальные исследования показали, что наличие диэлектрической линзы в раскрыве Е-секториального рупора приводит к незначительному сужению ДН в дальней зоне.

Рис. 4.12. Рассчитанная и экспериментально измеренная ДН *E*-секториального рупора в плоскости на расстоянии 1200 мм

В заключении необходимо отметить, что при движении трактора автоматически захватываются три ряда картофельных кустов. Если с противоположной стороны облучателей поместить отражающий экран, то мы увеличим эффективность обработки кустов картофеля за счет концентрации излученной и отраженной СВЧ мощности в ограниченном пространстве. При этом в окружающее пространство будет рассеиваться минимальная мощность.

4.5. Лабораторные и полевые исследования с колорадским жуком

Целью эксперимента являлось уточнение оптимальных биотропных параметров импульсного ЭМП, которые обеспечивали бы угнетение репродуктивную способность колорадских жуков. Опыты по влиянию импульсного излучения на репродуктивную способность колорадских жуков проводили в 2013, 2014 и 2015 гг. В лабораторных условиях были использованы группы из 20 самок и 7 самцов, которые облучались на установке рис. 4.13.

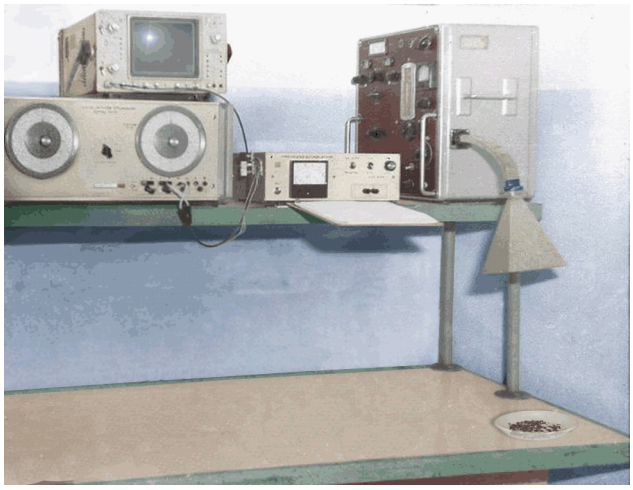

Рис. 4.13. Установка для облучения колорадского жука в лабораторных условиях

После облучения самки и самцы колорадского жука помещались в поле на растения картофеля, которые изолировались от внешних особей рис. 4.14.

Рис. 4.14. Изолированные кусты картофеля с облучёнными особями колорадского жука

Для определения оптимальных параметров ЭМП (частота, плотность потока мощности, экспозиция) был проведен многофакторный эксперимент, в котором в качестве отклика на ЭМ воздействие было взято количество отложенных яйцекладок самками колорадского жука.

Для получения зависимости, связывающей количество яйцекладок с параметрами радиоимпульсного ЭМИ при наличии аддитивной помехи случайного характера, применимо полнофакторное планирование второго порядка при постоянных значениях: скважность радиоимпульсов Q = 160; длительность радиоимпульсов . Значение факторов и их интервалы варьирования приведены в табл. 4.1.

Для построения плана второго порядка используются данные, приведенные в табл. 4.2 [136].

Таблица 4.1

Значение факторов в эксперименте

Интервал варьирования и уровень факторов	Частота заполнения радиоимпульсов, ГГц	Экспозиция, С	Плотность поток мощности, мВт/см2
	X1	X2	X3
Нулевой уровень,	21	2	120
Интервал варьирования,	1	0,5	10
Верхний уровень,	22	2,5	130
Нижний уровень,	20	1,5	110

Таблица 4.2

Данные для построения плана второго порядка

Число факторов, К	Число точек ядра	Число звёздных точек,	Число нулевых точек ,	Звёздные точки, а	Число опытов, N
3	8	6	6	1,682	20

При использовании стандартной методики построения плана второго порядка составлены матрицы: планирование эксперимента; расчета коэффициентов регрессии; определения дисперсии адекватности и результатов обработки данных, которые приведены в приложении А. После проведения измерений и расчетов получено уравнение регрессии, связанное с воздействием радиоимпульсного ЭМИ на колорадских жуков:

$$Y=5 +2X1 –1X2 + 2X3 + 2X1X2 + 2X1X3 + 1X2X3 ++ 2X12 + 1X22 + 1X32, \quad (4.1)$$

где Y – выходной параметр (количество яйцекладок);

X1 – частота заполнения радиоимпульсов;

X2 – плотность потока мощности;

X3 – время облучения.

На основании проверки данного уравнения на адекватность по критерию Фишера [136] сделан вывод (Приложение А), что уравнение адекватно описывает реальный процесс, и, следовательно, позволяет оценить характер влияния каждого из трех факторов на функции отклика. Проверка значимости коэффициентов регрессии проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по критерию Стьюдента [136]. Для нахождения оптимальных параметров процесса решена система уравнений, полученных приравниванием к нулю значений градиентов компонентов, вычисленных по выражению:

EMBED Equation.3 , (4.2)

где – кодированные значения факторов, по которым берется производная и взаимодействующая с ними, соответственно:

– коэффициенты уравнения регрессии.

Для выражения (4.2) получена следующая система уравнений:

$$2 + 2X2 + 2X3 + 4X1;$$

$$-1 + 2X1 + 1X3 + 2X2; \qquad (4.3)$$

$$2 + 2X1 + 1X2 + 2X3.$$

Решение системы уравнений (4.3) дает следующие значения факторов в оптимальной точке:

что соответствует таким значениям натуральных параметров: частота заполнения радиоимпульсов 20 ± 0,1 ГГц; экспозиция ; плотность потока мощности 110 мВт/см2.

В 2013…2015 г. были проведены опыты с 30 самками и 10 самцами, которые обучались радиоимпульсным излучением с оптимальными биотропными параметрами. В контроле использовали 30 самок и 10 самцов, но без облучения. Опытные и контрольные особи помещались раздельно на кустах картофеля с изоляцией от внешней среды. В результате опыта было установлено: количество отложенных яйцекладок в контроле 26, а в опыте 0; количество живых особей в контроле 100%, а в опыте 3%, которые в дальнейшем оказались нежизнеспособными.

Опыт с личинками 1 – 4 стадий развития показал, что облучение личинок радиоимпульсным излучением приводить их к 100 % гибели.

Производственные испытания по уничтожению колорадских жуков и их личинок проводили в хозяйстве Сахновщинского района Харьковской области.

В эксперименте были использованы два гектара картофеля, которые обрабатывались два раза за сезон. Один гектар обрабатывался радиоимпульсным излучением, а другой химическими препаратами. Производственный эксперимент показал, что картофель, обработанный радиоимпульсным радиоимпульсным излучением, зацвёл на 7 дней раньше, а урожай увеличился на 17% больше, чем на участке с химическим способом обработки. Обработку радиоимпульсным излучением проводили установкой, смонтированной на тракторе «Беларусь», которая двигалась со скоростью 2,3 км/час.

Источник радиоимпульсного излучения на установке отвечал следующим техническим требованиям:

1. Частота заполнения радиоимпульсов 20 ± 0,1 ГГц;
2. Импульсная выходная мощность генератора 600 0,5 Вт;
3. Диапазон перестройки частоты генератора 2%;
4. Кратковременная относительная нестабильность частоты .
5. Скважность импульсов 160;
6. Длительность радиоимпульса .

Выводы по разделу

1. Для уничтожения колорадских жуков и их личинок следует использовать 12-и диодный радиоимпульсный источник излучения сантиметрового диапазона, собранного по двухкаскадной схеме, с параметрами:

- выходная мощность генератора 600 Вт;
- длительность радиоимпульсов 10-6 с;
- скважность радиоимпульсов 160;
- частота заполнения радиоимпульсов 20 ГГц;
- кратковременная относительная нестабильность

частоты заполнения радиоимпульсов .

2. Для обеспечения низкой относительной нестабильности частоты импульсного источника в

пределах необходимо использовать синхронизирующий генератор, у которого для стабильности частоты используется цилиндрический резонатор «проходного» типа с параметрами: R = 32 мм; h = 20 мм; Q = 5450. Диаметр связи резонатора с волноводной системой составляет 2 мм.

3. Для угнетения репродуктивной способности колорадского жука необходимо применять секториальную рупорную антенну с параметрами: поперечные размеры 40x11 мм; длина рупора 40 мм; ширина диаграммы направленности по уровню –8 дБ в плоскости x0z 800 мм; коэффициент отражения от раскрыва антенны не должен превышать величины 3·10-1.

4. Для защиты антенны от посторонних веществ (пыль, влага) в её раскрыв необходимо

помещать диэлектрическую линзу с параметрами: диэлектрическая проницаемость ; диаметр 40 мм; толщина 10 мм; фокусное расстояние 19,5 мм.

5. Для уменьшения времени обработки растений картофеля с колорадскими жуками радиоимпульсным излучением целесообразно применять не отдельный излучатель, а два рупора, разнесенных в пространстве на 800 мм.

В этом случае по уровню –5 дБ ширина суммарной ДН составляет 1400 мм.

6. Применение радиоимпульсной биотехнологии для борьбы с колорадским жуком позволит исключить химические препараты и повысить урожайность картофеля на 15…17% по сравнению с контролем.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований в сантиметровом диапазоне длин волн разработана энергоинформационная радиоимпульсная технология и электронная система для уничтожения колорадских жуков. Внедрение полученных результатов для уничтожения жуков и их личинок без ядохимикатов позволить повысить урожайность картофеля и исключить загрязнение окружающей среды ядохимикатами.

1. На основании анализа литературных источников, отечественных и зарубежных публикаций установлено, что для уничтожения колорадского жука и его личинок следует использовать энергоинформационные радиоимпульсные излучение сантиметрового диапазона длин волн, которые позволят из технологического процесса повышения урожайности картофеля исключить ядохимикаты.

2. В процессе теоретического анализа разработанной модели было установлено, что для уничтожения колорадских жуков их следует облучать радиоимпульсным излучением с параметрами:

длительность импульсов ; скважность радиоимпульсов 160; мощность источника излучения не менее 600 Вт; частота заполнения радиоимпульсов 20 ГГц; время экспозиции 1…2 с.

3. Для угнетения репродуктивной способности колорадского жука необходимо применять секториальную рупорную антенну с параметрами: поперечные размеры 40х11 мм; длина рупора 40 мм; ширина диаграммы направленности по уровню –8 дБ в плоскости х0z 800 мм; коэффициент отражения от раскрыва антенны не должен превышать величины 3·10-1.

4. Для защиты антенны от посторонних веществ (пыль, влага) в её раскрыв необходимо помещать диэлектрическую линзу с параметрами: диэлектрическая проницаемость ; диаметр 40 мм; толщина 10 мм; фокусное расстояние 19,5 мм.

5. Для уничтожения колорадских жуков и их личинок следует использовать 12-и диодный радиоимпульсный источник ЭМИ сантиметрового диапазона, собранного по двухкаскадной схеме, с параметрами:

- выходная мощность генератора 580 Вт;
- длительность радиоимпульсов 10-6 с;
- скважность радиоимпульсов 160;
- частота заполнения радиоимпульсов 20 ГГц;
- кратковременная относительная нестабильность частоты заполнения радиоимпульсов .

6. Для уменьшения времени обработки растений картофеля с колорадскими жуками радиоимпульсным излучением целесообразно применять не отдельный излучатель, а два рупора, разнесенных в пространстве на 800 мм.

В этом случае по уровню -5 дБ ширина суммарной ДН составляет 1400 мм.

7. Применение радиоимпульсной биотехнологии для борьбы с колорадским жуком позволит исключить химические препараты и повысить урожайность картофеля на 15…17% по сравнению с контролем.

8. Экономический эффект от внедрения энегоинформационной радиоимпульсной технологии по уничтожению колорадских жуков может составить 25 тыс. грн. на гектар.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Картофель: [Сб. научн. работ / Ред. Н. С. Бацанова]. – М: ВНИИТЭСХ МСХ, 1970. – 108 с.

2. Материалы по истории земледелия СССР. – М: Издательство АН СССР,1956. – 400 с.

3. Биологический энциклопедический словарь: [Гл. ред. М.С. Гиляров]. –М.:Сов.Энциклопедия,1989. – 619 с.

4. Chiarappa L. Chiang H. C., Smith R. F. Plant pests and diseases assessmtnt of crop losses / Chiarappa L., Chiang H. C., Smith R. F. // Science. – 1972. – V. 176. – P. 769 – 773.

5. Cramer H. N. Pflanzenschutz und Welternte / Cramer H. N. // Pflanzenschutz Nachrichten «Bayer». – 1967. – Bd. 20, № 1. – S. 513 – 523.

6. Поляков И. Я. Энтомологические основы защиты растений от вредителей / И. Я. Поляков // Энтомологическое обозрение. – 1968. – Т. 47. –Вып. 2. – С. 165 – 180.

7. Guitard A. A., Nenman I. A., Hog P. B. The influencia of seedind rate on the yield and the yield components of wheat,oats fnd barley / A. A.Guitard, I. A. Nenman , P. B. Hog // – Can. J. Plant. Sci., 1961. – V. 41. – P. 751 – 758.

8. Танский В. И. Вредность насекомых и методы ее изучения. Обзорная информация / В. И. Танский. – ВНИИТЭСХ МСХ, Москва, 1975. – 70 с.

9. Справочник болезней и вредителей плодовых, ягодных и овощных культур. http://www.sadurad.ru/bolezny_spravochnik_alfavit.htm.

10. Абеленцева Г. М. Колорадский жук и химические меры борьбы с ним / Г. М. Абеленцева, В.А. Каспаров,Т.И., Креминская // Агрохимия. – 1985. – № 11. – С. 128 – 135.

11. Арапова Л. И. Температура и развитие колорадского жука / Л. И. Арапова // Защита растений. – 1987. – № 5. – С. 45 – 47.

12. Арапова Л. И. Биология колорадского жука в условиях юго-запада Белорусской ССР / Л. И. Арапова // Труды ВИЗР. – 1967. – Вып. 27. – С. 33 – 46 .

13. Бирман А. Л. О вредоносности колорадского жука / А. Л. Бирман // Защита растений. – 1966. – № 1. – С. 50 – 41.

14. Будин К. З. Зоны возможной акклиматизации колорадского жука / К. З . Будин, В. А. Власова // Защита растений. – 1986. – № 2. – С. 18 – 23.

15. Бур Г. Биология и экология колорадского жука / Г. Бур // Труды международного совещания по изучению колорадского жука и разработка мер борьбы с ним. – М.: – 1969. – С. 13 – 35.

16. Арапова Л. И. О факторах, влияющих на выживание колорадского жука в период зимовки / Л. И. Арапова // Труды 13-го международного конгресса. – Л.: – 1971. – Т. 1. – С. 357 – 358.

17. Вилкова Н. А. Биоэкологические факторы экспансии колорадского жука / Н. А. Вилкова, Г. И. Сухорученко, А. Г. Ковель // Защита и карантин растений. – 2001. № 1. – С. 19 – 23.

18. Вольвач В. В. Использование метеорологической информации для прогноза развития колорадского жука / В. В. Вольвач // Защита растений. –1983 . – № 3. – С. 22 – 24.

19. Гусев Г. А. Влияние климатических условий на развитие колорадского жука / Г. А. Гусев, Б. В. Яковлев // Сборник работ по вопросам

карантина растений. – 1962. – Вып. 12. – С. 90 – 97.

20. Йирковский Г. Г. Физиологические особенности зимнего покоя и реактивации колорадского жука в зависимости от сроков наступления диапаузы / Г. Г. Йирковский // Наука. – 1969. – С. 168 – 181.

21. Ковтун И. Особенности развития колорадского жука / И. Ковтун // Защита растений. – 1966. – № 2. – С. 51 – 54.

22. Ларченко К. И. Питание и диапауза колорадского жука (Leptinotarsa-decemlineata Say) / К. И. Ларченко // Колорадский жук и меры борьбы с ним.-М. :АН СССР. – 1958. – С. 43 – 59.

23. Миндер И. Ф. Условия зимовки и выживаемость колорадского жука в почвах разного типа / И. Ф. Миндер // Экология и физиология диа-паузы колорадского жука. – М.: Наука. – 1966. – С. 23 – 44.

24. Миндер И. Ф. Летний покой колорадского жука / И. Ф. Миндер, Г. Г. Йирковский // Защита растений. – 1974. – № 11. – С. 52 – 54.

25. Арапова Л. И. Прогноз пика численности яйцекладок колорадского жука как основа для прогнозирования периодов эффективной борьбы с вредителем / Л. И. Арапова // Защита растений в республиках Прибалтики и Беларуси. – Вильнюс. – 1981. – С. 3 – 5.

26. Бирман А. Л. Вредоносность личинок колорадского жука / А. Л. Бирман // Защита растений. – 1969. – № 9. – С. 51 – 53.

27. Григорьев И. В. Опыт борьбы с особо опасными вредителями / И. В. Григорьев // Защита и карантин растений. – 2004. – № 1. – С. 12 – 14.

28. Громова А. А. О плодовитости колорадского жука / А. А. Громова // Защита растений. – 1973. – № 2. – С. 52 – 54.

29. Горышин Н. И. Чередование активных и покоящихся стадий - основа годичного цикла насекомых / Н. И. Горышин // Защита растений. – 1971. – № 10 . – С. 36 – 38.

30. Яцына Л. Г. Динамика выхода колорадского жука из почвы после зимовки и сроки борьбы с ним в зоне сплошного заражения / Л. Г. Яцына // Сборник по вопросам карантина растений. – 1962. – Вып. 12. – С. 71 – 74.

31. Яхимович Л. А. Особенности развития и размножения колорадского жука (Leptinotarsa decemlineata Say) / Л. А. Яхимович // Труды ВИЗР. – 1967. – Вып. 27. – С. 245 – 294.

32. Hare J. D. Ecology and management of the Colorado potato beetle/ J. D. Hare // Ann. Rev. Entomol. – Palo. 35. – 1990. – P. 81 – 100.

33. Hurst G. W. Meteorology and the Colorado potato beetl / G. W. Hurst // WMO Techn. – Note. – 1975. – №137. – P. 51 – 53.

34. Logan P. H. Temperature-dependent and feeding of immature Colorado potato deetles (L.d.S) / P. H. Logan, R. A. Casagrande, H. A.Fauber // Environ Etomol. – 1985. – № 3. – P. 275 – 283.

35. Воловик А. С. Технология производства картофеля / А. С. Воловик, В. Н. Зейрук, В. М. Глез // Защита растений. – 1987. – № 6. – С. 43 – 48.

36. Григорьев В. Н. Опыт борьбы с особо опасными вредителями / В. Н. Григорьв // Защита и карантин растений. – 2004. – № 1. – С. 12 – 14.

37. Журавлёв В. Н. Как решить проблему ненужных химических обработок / В. Н. Журавлёв // Защита растений. – 1991. – № 5. – С. 22 – 24.

38. Ижевский С. С. Комплекс мероприятий против колорадского жука/ С. С. Ижевский, Л. А. Зискинд, В. Л. Рыбак // Защита растений. – 1988. – № 10. – С. 45 – 47.

39. Лобжанидзе Т. Д. Борьба с колорадским жуком на картофеле / Т. Д. Лобжанидзе, Э. П. Лоладзе // Защита и карантин растений. – 2005. – № 11. – С. 29 – 32.

40. Слободянюк В. М. Определение целесообразности проведения работ по защите растений / В. М. Слободянук // Защита и карантин растений. – 2000. – № 3. – С. 49 – 52.

41. Юревич И. А. Влияние агротехнических мероприятий на численность колорадского жука / И. Д. Юревич, Н. Р. Гончаров, А. А. Жемчужина // Бюл. ВИЗР. – 1975. – № 32. – С. 33. – 36.

42. Павловский Е. Н. Ручное анатомирование колорадского жука Е. Н. Павловский, И. К. Теравский // Энтомологическое обозрение. – 1958. – Т. 37. –С. 653 – 658.

43. Воловик А. С. Система защиты картофеля / А. С. Воловик, Л. Н., Трофимец, Ю. И. Шнейдер // Защита растений. – 1984. – № 6. – С. 42 – 44.

44. Герасимова А. В. Интегрированная защита картофеля / А. В. Герасимова, С. В. Зенкевич, А. К. Лысов, Г. И. Сухорученко // Защита и карантин растений. – 2007. – № 7. – С. 44 – 47.

45. Глез В. М. Колорадский жук и меры борьбы с ним / В. М. Глез // Защита и карантин растений. – 2003. – № 6. – С. 41 – 42.

46. Коваленков В. Г. Распространение, вредоносность и методы подавления колорадского жука на пасленовых культурах / В. Г. Коваленков, Н. М. Тюрина // АгроХХ1. – 2000. – № 3. – С. 8 – 10.

47. Воловик А. С. Эффективность некоторых современных средств против колорадского жука на картофеле / А. С. Воловик, В. М. Глез // Защита растений. – 2000. – № 1. – С.72 – 74.

48. Гусев Г. В. Местные и интродуцированные энтомофаги колорадского жука / Г. В. Гусев // Новейшие достижения сельскохозяйственной энтомологии. – Вильнюс: 1981. – С. 58 – 63.

49. Гусев Г. В. Энтомофаги колорадского жука / Г. В. Гусев. – М.: Агропромиздат, 1991. – 170 с.

50. Ижевский С. С. Эдовум-новый энтомофаг колорадского жука / С. С. Ижевский, Л. А. Зискинд // Защита растений. – 1990. – № 10. – С. 29 – 31.

51. Коваль Ю. В. Хищники колорадского жука / Ю. В. Коваль / Защита растений. – 1968. – № 4. – С. 52 – 56.

52. Хохлов А. Н. Колорадский жук в питании птиц / А. Н. Хохлов, А. П. Бычеров // Защита растений. – 1983. – № 11. – С. 38 – 40.

53. Берим Н. Г. Химическая защита растений / Берим Н. Г. – Л.: Колос, 1972. – 328 с.

54. Березина Н. В. Эффективный препарат против колорадского жука/ Н. В. Березина, Ю. И. Мешков // Агро.ХХ1. – 2000. – № 3. – С. 10 – 11.

55. Белан С. Р. Новые пестициды / С. Р. Белан, А. Ф. Грапов, Г. М. Мельников. – М.: Наука, 2001. – 195 с.

56. Васильева Т. И. Совершенствование ассортимента инсектицидов в борьбе с колорадским жуком / Т. И. Васильева, Г. П. Ивнова, Л. А. Буркова // Химический метод защиты растений. – 2004. – С. 40 – 43.

57. Довженко В. И. Принципы совершенствования и оптимизация ассортимента химических средств защиты растений / В. И. Довженко // Химический метод защиты растений. – С-Пб.: – 2004. – С. 86 – 88.

58. Мельников Н. Н. Химические средства защиты растений / Н. Н. Мельников, К. В. Новожилов, Т. Н. Пылова. – М.: Химия, 1980. – 288 с.

59. Шестопалов И. А. Защита растений в США / И. А. Шестопалов // Защита растений. – 1985. – № 9. – С. 52 – 54.

60. Richard L., Jacques Jr. Colorado potato beetle. Leptinotarsa decemlineata(Say)(http://entomoloqy.ifas.ufl.edu/creatures/veg/leaf/potato_beetlts. htm). – University of Florida,2012.

61. Рахматулин Р. А. Электрофизические методы борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур / Рахматулин Р.А., Нугманов С.С. // Сборник научных трудов. Современные технологии, средства механизации и техническое обслуживание в АПК. – Самара: 2003. – С. 81 – 83.

62. Сугоняев С. Г. Защита растений от вредных членистоногих на рубеже 21 века / С. Г.Сугоняев // Агро.ХХ1. – 1998. – № 2. – С. 18 – 20.

63. Дубик В. Н. Защита плодовых культур от насекомых-вредителей / В. Н. Дубик // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2011. – № 12. – С. 121 – 129.

64. Сили И. И. Применение информационно-энергетических излучений для угнетения репрдуктивной способности колорадского жука: тезисы за материалами научно-практической студенческой конференции [«Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»] (Харків, 2 квітня 2015 р.) / Сили И. И. // М-во освіти і науки України, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка. – Х.: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2015. – Вип. 7. – С. 12.

65. Shwan H. P. Microwave radiation: biophysical considerations and standards criteria / Shwan H. P. // «IEEE Trans. Biomed End», 1972. – Vol. 19. – N 4 . – P. 304 – 312.

66. Sher L. D. In the possibility of nonthermal biological effects of pulsed electromagnetic radiation / Sher L. D., Kresch E.T., Schwan H. P. // «Biophys S.», 1970. – Vol. 10. – P. 970 – 979.

67. Козак А. В. Применение ЭМП для уничтожения в почве биологических вредителей корневой системы растений / А. В. Казак // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – № 14. – С. 13 – 15.

68. Мансур М. Использование электромагнитного излучения для уничтожения личинок вредных насекомых в животноводстве / М. Мансур // Вестник Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харьков: ХНТУСХ. – 2002. – № 7. – С. 114 – 117.

69. Черенков А. Д. Исследование комплексного влияния СВЧ-поля и биологически активных химических соединений на вредителей сельского хозяйства / Черенков А. Д., Черепнев А. С, Кучин Л. Ф. // Труды науч.-практ. конф. – Ташкент: Ин-т инж. Ирригации и механиз. сельского хозяйства, 1990. – С. 12 – 14.

70. Шевченко Є. А. Прогресивні напрямки боротьби із шкідниками хлібних запасів / Є. А. Левченко / Сб. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. – Одесса: ОКФА, 2000. – С. 18 – 23.

71. Микроволновые технологи в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: [Сб.научн.работ / Ред. Акад. МАИ Калинин Л. Г.]. – Одесса: ОКФА, 1966. – 108 с.

72. Заявка №2553873 Франция, Кл. F26B 3/47. Способ сушки, стерилизации, обеззараживания и дезинфекции лекарственных растений или растений для приправ с помощью микроволновой печи. Заявлено 19.10.83.

73. Mayers C. P. Depression of phagocytosis: a nonthermal effect of microwave radiation as a potential hazard to health / C. P. Mayers, L. A. Habeshav // Iuterat. J. Radiat. Biol. – 1973. – Vol 24. – № 5. – P.449 – 461.

74. Яшин А. А. Информационно-полевая самоорганизация биосистем / Яшин А. А. // Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. VII, № 1. – С. 30 – 38.

75. Сілі І. І. Аналіз біофізичного впливу інформаційно-хвильових випромінювань на репродуктивну здатність колорадського жука(Lepinotarsa decemlineata) / І. І. Сілі // Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2015. – 209, Ч. 1. – С. 269 – 273. (ISSN2222-8594)

76. Сілі І. І. Аналіз біофізичного впливу інформаційно-хвильових випромінювань на репродуктивну здатність колорадського жука: тези за матеріалами 6 міжнародної науково-технічної конференції пам`яті І. І. Мартиненко[«Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України»] (Мелітополь, 10 – 14 червня 2015 р.) // Сілі І. І. // Міністерство освіти і науки України, Таврійський державний агротехнологічний університет, – М.:ТДАТУ, 2015. – С. 53 – 54.

77. Рахматулин Р. А. Электрофизические методы борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур / Р.А. Рахматулин, С. С. Нугманов //Сборник научных трудов. Современные технологии, средства механизации и техническое обслуживание в АПК. – Самара, 2003. – С. 81 – 83.

78. Кисилев Р. И. Влияние электромагнитных волн миллиметрового диапазона на инфекционную активность вирусных нуклеиновых кислот / Р. И. Кисилев, Н. П. Залюбовская // Биоэнергетика. – 1973. – С. 215 – 216.

79.Панасенко В. И. Некоторые данные по вопросу влияния электромагнитных полей на живые клетки / В. И. Панасенко., В. В. Игнатов, С. В. Богородицкая // Труды ин-та курортологии и физиотерапии – М., 1971. – № 17. – С. 114 – 116.

80. Mayers C. P. Depression of phagocytosis: a nonthermal effect of microwave radiation as a potential hazard to health / C. P. Mayers, L. A. Habeshav // Iuterat. J. Radiat. Biol. – 1973. – Vol 24. – № 5. – P. 449 – 461.

81. Эйди У. Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань / Эйди У. Р. // ТИИЭР, 1980. – Т. 68 – № 1. – С. 128 – 147.

82. Черенков А. Д. Воздействие низкоэнергетических электромагнитных измерений на мембранный потенциал и объем клеток биологических объектов / А. Д. Черенков // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение . Проблемы. Перспективы. – К.: ТЕС, 2000. – С. 152 – 155.

83. Взаимодействие физических полей с живым существом / Е. Н. Нефедов, А. А. Протопопов, А. Н. Семенцов, А. А. Яшин. – Тула: Изд-во Тул ГУ, 1995. – 231 с.

84. Рубин А. Б. Биофизика: В 2-х кн.: Учебник для биол. спец. вузов. Кн.2 . Биофизика клеточных процессов / А. Б. Рубин. – М.: высшая школа, 1987. – 303 с.

85. Макри Д. И. Исследования нетепловых резонансных эффектов мм-излучения как начало новой биофизики / Макри Д. И. // ТИИЭР, 1980. – Т. 68, № 1. – С. 40 – 48.

86. Микроволновые технологи в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: [Сб. научн. работ / Ред. Акад. МАИ Калинин Л. Г.]. – Одесса: ОКФА, 1966. – 108 с.

87.Старостенко В.В. Воздействие мощных импульсных полей на биологические объекты и среды // Радиофизика и электроника. – 2002. – Т. 7, № 1. – С. 158 – 161.

88. Пат. 59777А Україна, МКІ А01М1/22. Засіб знищення комах-шкідників / Старостенко В. В., Ткачов А. И. – № 20021210174; Заявлено 17.12. 2002; Опубл. 15.09.2003; – Бюл. № 9. – 3 с.

89. Звершховский И. В. Миллиметровые волны тепловой интенсивности в медицине / И. В. Звершховский // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. (Промышленность, АПК, медицина, фармация). – Одесса: ОКФА, 2000. – С. 159 – 164.

90. Chernin D. Threedeminsionel multy-freguency large signal model for nolix travoling wavetubes. / D. Chernin, T.M. Antonsen, B. Levust // IEEE Trans. on Electron Devices, 2002. – Vol. ED-48, № 1. – PP. 3 – 11.

91. Petillo J. The Michelle threc-deminsionel electron gun and collecton mode lingtool: theoty and desing / J.Petillo, K. Eppley, D. Panagas // IEEE Trans. on Plasmer Science, 2002. – Vol. 30, № 6. – PP. 1238 – 1261.

92. Корнеенков В. К. Генераторы дифракционного излучения непрерывного и имппульсного 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.

93 Коцержинский Б. А. Импульсные генераторы миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролетных диодах / Б. А. Коцержинский, В. П. Тараненко, В. А. Трапезон // Известия вузов СССР, 1982. – Т. ХХ, № 10. – С. 56

– 64.

94. Горбачев А. В. Каскадное суммирование мощностей ЛПД в режиме внешней синхронизации/ Горбачев А. В., Касаткин Л. В. // Электронная техника. – 1982. – Вып. 10. – С. 22 – 27.

95. Касаткин Л. В. Стабилизация СВЧ-параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД / Касаткин Л. В // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2001. – Том 44, № 3. – С. 18 – 25.

96. Коцержинский Б. А. Импульсные генераторы миллиметрового диапазона на лавинно-пролетных диодах / Б. А. Коцержинский, В. П. Тараненко, В. А. Трапезон // Известия вузов СССР. – 1982. – Т. XX, № 10. – С. 56 – 64.

97.Chang K. Millimeter-wave combining techniques / Chang K., Sun S // IEEE Trans. On. – Vol. 59, no. 1. – PP. 102 – 103.

98. Theodorou E. A. Broadband pulse-optimized antenna / Theodorou E. A., Gorman M.R., Rigg P.R., and Kong F.N. // IEE Proceedings – H: Microwaves, optics and antennas. – 1981. – V. 128. Pt. H, № 3. – P. 124 – 130.

99. Губанов В. П. Генерация мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения / Губанов В. П., Коровин С. Д., Пегель И. В. // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 20, № 14. – С. 89 – 93.

100. Farr E. G. Impulse radiating antennas / Farr E. G., Baum C. E. // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics / Ed. by H.L. Bertoni, L. Karin, and L.B. Felsen. – New York: Plenum Press, 1993. – P. 139 – 147.

101. Giri D. V. Desigh, Fabrication, and Testing of a Paraboloidal Reflector Antenna and Pulser System for Impulse-Like Waveforms / Giri D.V., Lackner H., Smith I. D., Morton D. W., Baum C. E., Marek J. R. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1997. – V. 25, № 2. – P. 318 – 326.

102. Хала А. В. Алгоритм расчета сверхширокополосной антенны / Хала А. В., Корольков А. В. // Математическая морфология. Электрон. Математатический и медико-биологический журнал. – Т. 9. – Вып. 1. – 2010. – URL: http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/TITL.HTM.

103. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов / [под ред. Д. И. Воскресенского]. – М.: Сов. радио, 1972. – 318 с.

104. Фрадкин А. З. Антенны сверхвысоких частот / А. З. Фрадин. – М.: Советское радио, 1957. – 648 с.

105. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны / Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.

106. Сили И. И. Теоретический анализ процесса взаимодействия радиоимпульсов с колорадскими жуками в растительном слое картофеля / И. И. Сили // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №4/2 (24). – С. 55 – 59. (ISSN2226-3780).

107. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / Никольский В.В. – М.: Наука, 1978. – 544 с.

108. Лаврентьев М. А. Методы теории дифракций комплексного переменного / Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 692 с.

109. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Корн Г., Корн Т. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

110. Аккерман Ю. Биофизика / Ю. Аккерман (пер. с англ.). – М.: Мир, 1964. – 684 с.

111. Plonsey R. Bioelectricity a Quantative Approach / R. Plonsey, E. Barr. – New Vork: Plenum Press, 1988. – 366 p.

112. Тарусов Б. И. Биофизика / Тарусов Б. И. – М.: Высшая школа, 1968. – – 210 с.

113. Сили И. И. Обоснование требований к электронным системам для уничтожения колорадских жуков: тезисы за материалами научно-практической студенческой конференции [«Проблеми енергозабезпечення»] (Белгород, 26 – 27 мая 2014 г.), Белгородская государственная сельскохозяйственная академия им. Б. Я. Горина (Россия). – Белгород, БелГСХА, 2014. – Т.2. – С. 20 – 21.

114. Зарицкая Е. А. Многодиодные сумматоры мощности миллиметрового диапазона / Е. Л. Зарицкая, Б. А. Коцержинский, В. П. Тараненко, В. П. Ткаченко // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1984. – Т. 27 , № 12. – С. 4 – 19.

115. Царапкин Д. П. Применение диэлектрических резонаторов с волнами типа «шепчущей галереи» для стабилизации частоты автогенератора СВЧ / Д. П. Царапкин // Радиотехника. – 2002. – № 2. – С. 28 – 35.

116. Касаткин Л. В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.

117. Тагер А. С. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ / А. С. Тагер, В. М. Вальд-Перлов. – М.: Сов. радио, 1968. – 480 с.

118. Haddad G. I. Miro wave solid-state active devices / G.I. Haddad, R.J. Trew // IEEE Trans on MTT. – 2002. – Vol.50, № 3. – P. 760 – 779.

119. Сили И. И. Параметры и стабилизация частоты генератора с резонатором проходного типа / И. И. Сили / /Енергозбереження, енергетика, енергоаудит. Загальнодержавний науково-виробничий журнал. – 2015. – № 9 (140). – С. 53 – 59(ISSN2313-8890).

120. Крылов Н. Н. Теоретические основы радиотехники / Н. Н. Крылов. – М.: «Морской транспорт»,1961. – 416 с.

121. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М.: «Высш. школа»,1970. – 440 с.

122. Теория линий передачи сверхвысокой частоты:[перевод с английского под редакцией Шпунтова]. – М.: Сов. радио, 1951. – 263 с.

123. Зырин С. С. Стабильность частоты и выходная мощность пролётного автогенератора с колебательной системой произвольного типа / С. С. Зырин / Электронная техника, серия «Электроника СВЧ». – 1970. – Вып.10. – С. 30 – 42.

124. Иммореев И. Я. Излучение сверхширокополосных сигналов / И. Я. Иммореев, А. Н. Синявин // Антенны. – 2001. – Выпуск 1 (47). – С. 7 – 15.

125. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с .

126.Олвер Ф. Глава 9. Функции Бесселя целого порядка. Справочник по специальным функциям: пер. с англ. под ред. В. А. Диткина и Л. Н. Кармазиной / Ф. Олвер. – М.: Наука, 1979. – С. 177 – 253.

127. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.

128. Есютин Л. С. Элементы антенно-волноводных устройств / Л.С. Есютин. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – 104 с.

129. Шубарин Ю. В. Антенны сверхвысоких частот / Ю. В. Шубарин. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1960. – 284 с.

130. Сілі І. І. Теоретичний аналіз системи імпульсних інформаційно-хвильових випромінювань для впливу на репродуктивну здатність колорадського жука / І. І. Сілі, Ю. М. Федюшко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2015. – Вип.15, Т.2. – С. 104 – 109. (ISSN2078-0877)

131. Сили И. И. Теоретическое исследование для определения параметров *E*-секториального рупора / І. І. Сілі // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 22(1131). – С.68 – 72. (ISSN2411-2798).

132. Янке Е. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы): пер. с нем. под ред. Л. И. Седова / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: Наука, 1964. – 344 с.

133. Вайнштейн Л. А. Строгое решение задачи о плоском волноводе с открытым концом / Л.А. Вайнштейн // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1948. – Т. 12, № 2. – С. 144 – 165.

134. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны: пер. с англ. под ред. Н. Г. Дроздова / А. Р. Хиппель. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1960. – 438 с.

135. Справочник по радиолокации. В 4-х т. / Ред. М. Скольник. Пер. с англ. под ред. К. Н. Трофимова / Т. 2. Радиолокационные антенные устройства. – М.: Сов. радио, 1977. – 408 с

136. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

Приложение А

Результаты статистической обработки экспериментов.

Полином, используемый для описания процесса в данном плане, имеет следующий вид:

где Y – выходной параметр; Xi – факторы, определяющие протекания процесса (входные параметры); b0,bi,bij,bii – эмпирические определяемые коэффициенты уравнения регрессии.

Таблица А1

Матрица планирования эксперимента

Уровни опытных точек	Номер опыта	Факторы		
		X1	X2	X3
Ядро плана	1	-	-	-
	2	+	-	-
	3	-	+	-
	4	+	+	-
	5	-	-	+
	6	+	-	+
	7	-	+	+
	8	+	+	+
Звездные точки	9	-	0	0
	10	+	0	0
	11	0	-	0
	12	0	+	0
	13	0	0	-
	14	0	0	+
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

Расчетная матрица для K = 3 приведена в таблице А2. В таблице А3 приведены данные, характеризующие процесс эксперимента. Расчет коэффициентов регрессии и расчетная матрица для определения остаточной суммы квадратов и дисперсии адекватности приведены в таблице А4 и А5.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1 X3	X2X3				У1	У2	
1	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	12	10	11
2	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	5	7	11 6
3	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	4	4	4
4	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	6	8	7
5	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	10	10	10
6	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	13	13	13
7	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	5	5	1 5

8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	18	14	16
9	+	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	6	6	6
10	+	1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	13	15	14
11	+	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	9	7	8
12	+	0	1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	6 6	6	6
13	+	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	5,0	7,0	6
14	+	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,829	12	10	11
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,0	7,0	6
16	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,0	5	5
17	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0	4,0	4
18	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,0	5,0	5
19	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,0	7,0	6
20	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0	4,0	4

Таблица А3

Матрица для расчета коэффициентов регрессии

№											
1	-11	-11	-11	11	11	11	11	11	11	11	2
2	6	-6	-6	-6	-6	6	6	6	6	6	2
3	-4	4	-4	-4	4	-4	4	4	4	4	0
4	7	7	-7	7	-7	-7	7	7	7	7	2
5	-10	-10	10	10	-10	-10	10	10	10	10	0
6	13	-13	13	-13	13	-13	13	13	13	13	0
7	-5	5	5	-5	-5	5	5	5	5	5	0
8	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	4
9	-10,1	0	0	0	0	0	17 ,0	0	0	6	0
10	23,5	0	0	0	0	0	39,0	0	0	14	2
11	0	-13,4	0	0	0	0	0	22,6	0	8	2
12	0	10,1	0	0	0	0	0	17,0	0	6	0
13	0	0	-10,1	0	0	0	0	0	17,0	6	2
14	0	0	18,5	0	0	0	0	0	31,0	11	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,0	2
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
	25,4	-11,3	24,4	16	16	14	128	111,6	120	142	22

Таблица А4

Расчет коэффициентов регрессии и проверки их значимости

№	Наименование величины	Расчетная формула	Расчетное значение
1	2	3	4
1	Сумма квадратов построчных дисперсий [136]		См. табл. 3
2	Сумма квадратов ошибок		22
3	Повторность опытов		2
4	Количество опытов		20
5	Уровень значимости		0,05
6	Расчетное значение критерия Кохрена		0,182
7	Табличное значение критерия Кохрена		0,47
8	Проверка воспроизводимости опытов		0,182<0,47
	Коэффициенты		b0
9	Уравнение регрессии		b11=2 b22 b33
			b1 b2=-1 b3
			b12 b13=2 b23=1
10	Дисперсия воспроизводимости		1.1

1	2	3	4
11	Дисперсия коэффициентов [136]		0,176
			0,068
			0,137
			0,08
12	Табличное значение критерия Стьюдента		2,09

13	Условия значимости коэффициентов уравнения регрессии		0,87
			0,6
			0,54
			0,41
14	Остаточная сумма квадратов		12
15	Частота		5
16	Остаточная сумма квадратов в центре плана		4
17	Ошибка опыта при рототабельном планировании		0,8
18	Разность дисперсий		8
19	Дисперсия адекватности		1,8
20	Расчетное значение критерия Фишера		2
21	Табличное значение критерия Фишера		2,71
22	Условие проверки адекватности модели		2<2,71

Таблица А5

№	b0	b1X1	b2X2	b3X3	b12X1 X2	b13X1 X3	b23X23					
1	5	-2	1	-2	2	2	1	2	1	1	11	0
2	5	2	1	-2	-2	-2	1	2	1	1	7	1
3	5	-2	-1	-2	-2	2	-1	2	1	1	3	1
4	5	2	-1	-2	2	-2	-1	2	1	1	7	0
5	5	-2	1	2	2	-2	-1	2	1	1	9	1
6	5	2	1	2	-2	2	-1	2	1	1	13	0
7	5	-2	-1	2	-2	-2	1	2	1	1	5	0
8	5	2	-1	2	2	2	1	2	1	1	17	1
9	5	-3,364	0	0	0	0	0	5,658	0	0	7	1
10	5	3,364	0	0	0	0	0	5,658	0	0	14	0
11	5	0	1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	9	1
12	5	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	6	1
13	5	0	0	-3,364	0	0	0	0	0	2,829	5	1
14	5	0	0	3,364	0	0	0	0	0	2,829	11	0
15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1
16	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
17	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1
18	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
19	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1
20	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1

Приложение Б