

Таврическая государственная агротехническая академия

На правах рукописи

Орел Александр Николаевич

УДК 632.935.4:621.396.652

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ
УЛУЧШЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ**

Специальность 05.09.16-
электротехнологии и электрооборудование в агропромышленном комплексе

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Яковлев Валерий Федорович
кандидат технических наук, доцент

Мелитополь – 2004

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1	
АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ ЖИВОТНЫХ И ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ	14
1.1. Характеристика и способы регенерации тканей у животных с костной паталогией	14
1.2. Применение электромагнитных излучений для интенсификации вос- становительного процесса	24
1.3. Анализ биофизического действия электромагнитных излучений СВЧ диапазона	32
1.4. Обоснование требований к источникам СВЧ излучения для информационного влияния на биологические объекты	36
.....	40
1.5. Анализ технических средств для восстановления тканей сельскохозяйственных животных. Постановка задач исследований	46
1.6. Выводы.....	47
РАЗДЕЛ 2	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ СВЧ ДИАПАЗОНА В КОНЕЧНОСТЯХ ЖИВОТНЫХ	47
2.1. Модель травмированной конечности животных, находящейся под воздействием СВЧ излучения	51
2.2. Определение внутренних полей в однородном биологическом объекте, имеющем цилиндрическую форму	62
.....	
2.3. Рассеяние электромагнитного поля на конечностях сельскохозяйственных животных, имеющих слоистую структуру	70
.....	78
2.4. Численные расчеты электромагнитных полей внутри травмированных конечностей животных на основе предложенной теоретической модели	79
.....	79
2.5. Выводы.....	80
РАЗДЕЛ 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОС- ТНУЮ ТКАНЬ ЖИВОТНЫХ	89
3.1. Программа исследований	107

3.2. Анализ методов построения высокостабильных источников СВЧ колебаний	110 118
3.3. Разработка и исследование кварцевых СВЧ генераторов	
3.4. Особенности в разработке управляемых по частоте кварцевых генераторов.....	119 119
3.5. Анализ расчета спектральных характеристик выходного сигнала в умножителях частоты.....	120
3.6. Выводы.....	126
РАЗДЕЛ 4	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ ДИАПАЗОНА НА КОСТНУЮ ТКАНЬ ЖИВОТНЫХ	128 139
4.1. Цель и программа экспериментальных исследований	
4.2. Исследование экспериментальной установки СВЧ излучения	143
4.3. Исследование электрофоретической подвижности клеток поврежденной костной ткани после воздействия ЭМИ СВЧ диапазона	146 151 154
4.3.1. Определение параметров электромагнитного излучения по электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани	164
4.4. Исследование воздействия электромагнитных полей на клетки поврежденной костной ткани	
4.5. Применение электромагнитного излучения СВЧ диапазона при восстановлении костной ткани сельскохозяйственных животных.....	172
4.6. Выводы	174
ВЫВОДЫ.....	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	
Приложение А	175
Результаты статистической обработки экспериментов.....	
Приложение Б	
Протокол о совместной научно-исследовательской работе института экспериментальной и клинической ветеринарной медицины УААН, ХГТУСХ, ТГАТА	177
Приложение В	
Акт о внедрении	
Приложение Д	
Расчет экономической эффективности	
Приложение Е	
Акт метрологической аттестации прибора	

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АМ	- амплитудная модуляция.
АПЧ	- автоматическая подстройка частоты.
ИК	- инфракрасный.
КВЧ	- крайне высокая частота.
КГ	- кварцевый генератор.
КСВН	- коэффициент стоячей волны напряжения.
СВЧ	- сверхвысокая частота.
УВЧ	- ультравысокая частота.
УФ	- ультрафиолетовый.
ФАП	- фазовая автоподстройка.
ФМ	- фазовая модуляция.
ФСС	- фильтр сосредоточенной селекции.
ЭМИ	- электромагнитное излучение.
ЭМП	- электромагнитное поле.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з найбільш актуальних задач, що стоїть перед аграрним комплексом України на сучасному етапі, є підвищення продуктивності у тваринництві зі збереженням і збільшенням поголів'я сільськогосподарських тварин, що залежить від своєчасного лікування їхнього травматизму.

Травматизм тварин - найбільш розповсюджена група захворювань з усіх незаразних хвороб, на його частку приходить до 50 % від загальної захворюваності тварин.

У більшості випадків причинами травматизму тварин є порушення правил їх годівлі, утримання й використання.

У результаті травм і їх ускладнень хворі тварини знижують продуктивність, передчасно выбраковуюються, нерідко гинуть. Усе це наносить господарствам великий економічний збиток. Тому зниження втрат від травматизму є однією з найважливіших задач ветеринарних фахівців і всіх працівників тваринництва.

В даний час для відновлення кісткової тканини травмованих кінцівок тварин, в основному, використовують медикаментозні способи лікування. Застосування антибіотиків та інших медикаментів для відновлення кісткових тканин тварин у більшості випадків є малоефективним і небезпечним, блокує симптоми захворювань. Вирішення поставленої задачі можливо на основі застосування низькоенергетичних (інформаційних) електромагнітних випромінювань НВЧ діапазону довжин хвиль.

Існуючі інші методи відновлення кісткової тканини тварин і розроблені на їх основі пристрої не відповідають високим вимогам, специфічним для апаратури електромагнітного випромінювання, по стабільності частоти, подавленню поточкових складових в спектрі вихідного сигналу, споживанню потужності, металоємкості, необхідній надійності і ряду ін.

Тому розробка ефективних не медикаментозних способів відновлення кісткової тканини при загоєнні травм тварин є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з планом НДР ТДАТА на 1996-2000 р. р., програмою № 9 "Розробка ультразвукової та НВЧ технологій, а також обладнання експрес-контролю якості сільськогосподарської продукції", згідно НДР ТДАТА на 2001-2005 роки за науково-технічною програмою № 1 "Розробка наукових засад технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України" (державний реєстраційний номер 0102V000678). Тема дисертаційної роботи пов'язана з загальноукраїнськими науковими програмами: постановою Кабінету Міністрів України від 22.06.1994р. № 429 "Про реалізації пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки"; науково-технічною програмою Міністерства агропромислового комплексу України від 30.02.1998 р. № 339 "Науково-дослідні і дослідницько-конструкторські розробки". За планами НДР і ДКР, проведеними у Таврійській державній агротехнічній академії, було виконано наступні науково-дослідні роботи, що мають безпосередній зв'язок з темою дисертаційної роботи: "Використання полів НВЧ енергії та ультразвуку при аналізі якості біологічних матеріалів сільськогосподарського рослинництва та тваринництва"; "Дослідження впливу електромагнітних полів на біологічні об'єкти на базі створених спеціалізованих стендів"; "Вивчення особливостей роздільного і одночасного впливу постійного магнітного поля, лазерного випромінювання й електромагнітного поля дециметрового діапазону хвиль на загоєння ушкодженої кісткової тканини".

Мета і задачі дослідження. Поліпшення відновлення кісткової тканини сільськогосподарських тварин шляхом низькоенергетичного електромагнітного впливу на основі дослідження і обґрунтування параметрів електромагнітного поля, конструктивних схем, параметрів і режимів роботи джерел випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз стану використання не медикаментозних методів і вживаних технічних засобів для поліпшення відновлення кісткової тканини тварин;
- теоретично дослідити процес взаємодії низькоенергетичного ЕМП НВЧ діапазону з тканинами кінцівок тварин на основі розробки математичної моделі і встановити

залежності між параметрами електромагнітного випромінювання і біофізичними характеристиками тканин;

- провести аналіз структурних схем формування коливань в НВЧ діапазоні, обґрунтувати параметри і конструктивні рішення експериментального джерела електромагнітного випромінювання для поліпшення відновлення кісткової тканини кінцівок тварин;
- розробити і провести експериментальні дослідження джерела НВЧ випромінювання для поліпшення відновлення кісткової тканини кінцівок тварин, обґрунтувати його режимні параметри;
- розробити методику і провести експериментальні дослідження що до встановлення залежності між показником електрофоретичної рухливості ядер кліток кісткової тканини і параметрами ЕМП НВЧ діапазону;
- провести виробничу перевірку результатів теоретичних і експериментальних досліджень, дати техніко-економічне обґрунтування і визначити перспективу застосування отриманих результатів.

Об'єкт дослідження. Процес взаємодії низкоенергетичних ЕМП НВЧ діапазону з тканинами кінцівок тварин з кістковою патологією.

Предмет дослідження. Залежність між параметрами електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону і біофізичними характеристиками тканин.

Методи дослідження. Теоретичне обґрунтування взаємодії електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону з тканинами кінцівок тварин проведено з використанням методу математичного моделювання, методу розділення змінних при рішенні хвильового рівняння, теоретичних положень електродинаміки, теорії хвиль.

Експериментальні дослідження проводилися як за загальноприйнятим, так і розробленим методикам і передбачали використання математичного методу планування повнофакторного експерименту. Обробка даних здійснювалася математико-статистичними методами на ЕОМ з використанням регресійного і дисперсійного методів аналізу, та F- критерію Фішера при перевірці гіпотези про адекватність.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в даній роботі:

- вдосконалено математичну модель, що описує взаємодію електромагнітного випромінювання з тканинами кінцівки тварини, в якій кінцівка тварини розглядається як багатошаровий циліндр з різними біофізичними характеристиками шарів;
- отримано нові закономірності, які встановлюють взаємозв'язок між параметрами низькоенергетичного ЕМП НВЧ діапазону і біофізичними характеристиками тканин кінцівок тварин;
- отримано нові закономірності, які дозволяють визначити пошаровий розподіл енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону усередині кінцівки тварини;
- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджені кількісні значення параметрів електромагнітного поля НВЧ діапазону при взаємодії з тканинами кінцівок тварин, які сприяють поліпшенню відновлення кісткової тканини;
- вперше отримано регресійне рівняння, що встановлює залежність показника електрофоретичної рухливості ядер кліток кісткової тканини від експозиції і параметрів впливаючого електромагнітного поля (частоти, щільності потоку потужності);

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовані передумови для розробки немедикаментозного методу для поліпшення відновлення кісткових тканин і можливість його технічної реалізації на основі застосування низькоенергетичних електромагнітних випромінювань НВЧ діапазону. Отримала подальший розвиток методика аналізу джерел НВЧ коливань за спектрально - флуктуаційним характеристиками.

Результати досліджень апробовані в господарстві ТОВ «Колос» Харківської області. Економічна ефективність від впровадження методу електромагнітної дії НВЧ діапазону для поліпшення відновлення кісткової тканини тварин з кістковою патологією склала 5,6 тис. грн. на рік. Від вибраковування було врятовано 10 високопродуктивних корів. На прикладі корівника на 200 голів показано, що застосування низкоенергетичних ЕМП НВЧ діапазону при лікуванні кісткової патології тварин дозволить одержувати прибуток у розмірі 6700 грн.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що автором безпосередньо:

- проаналізовано методи і технічні засоби застосовані для поліпшення відновлення кісткової тканини тварин;
- вдосконалено математичну модель процесу взаємодії електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону з тканинами кінцівок тварин, що дозволяє визначити розподіли електромагнітних полів всередині кінцівки сільськогосподарських тварин;
- визначено кількісні значення параметрів електромагнітного поля НВЧ діапазону при взаємодії з тканинами кінцівок тварин, що сприяє відновленню кісткової тканини;
- запропоновано методику розрахунку кварцового генератора і порівнянного аналізу підсилююче - помножувальних каскадів джерел НВЧ коливань;
- запропонований варіант технічної реалізації джерела НВЧ коливань;
- розроблено методику і програму проведення експериментальних досліджень впливу ЕМВ на пошкоджену кісткову тканину кінцівок тварин;
- вперше отримано регресійне рівняння, що встановлює вплив параметрів електромагнітного поля і експозиції на показник електрофоретичної рухливості ядер кліток кісткової тканини;

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи заслуховувалися й обговорювалися на X міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, НТУ ХПІ, 2002 р.); міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України" (Харків, ХДТУСГ, 2002 р.); міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми електрифікації та автоматизації сільського господарства" (Київ, НАУ, 2002 р.); міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми електрифікації та автоматизації сільського господарства" (ННЦ "ІМЕСГ" смт. Глеваха, 2003 р.); на науково-технічних конференціях ТДАТА (2000-2004 р.р.)

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 7 друкованих працях, які входять до переліку ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури і додатків. Вона містить у собі 158 стор., 34 рисунки, 7 таблиць, список літературних джерел нараховує 120 найменувань, 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертації, формулюється наукова задача, у якій розкривається сутність і стан цієї задачі, висвітлюється зв'язок роботи з програмами, планами та темами НДР; формулюється мета і наукові задачі дослідження, розв'язання яких забезпечує досягнення поставленої мети; визначається наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, а також особистий внесок здобувача в надрукованих роботах; подано інформацію щодо апробації дисертаційних досліджень; введено перелік робіт, що надрукованих за темою дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз методів та електрофізичних пристроїв для поліпшення відновлення ушкоджених кісткових тканин тварин і обґрунтовані методи їх досліджень.

Кісткова патологія у тварин є однією із складних і актуальних проблем ветеринарної травматології. Вона наносить значний економічний збиток тваринництву, так, наприклад,

періостити, некроз, карієс кісток знижують удої корів на 30 - 50 % і більше, а при переломах кісток тварини часто вибраковуються.

В даний час вигоювання кісткової патології включає хірургічну обробку з наступною антибіотико терапією у сполученні з короткою новокаїновою блокадою, при цьому обов'язково загальне лікування з застосуванням антибіотиків і сульфаніламідних препаратів.

При ускладненій кістковій хворобі застосовують пружні коливання та випромінювання оптичного діапазону, що у багатьох випадках виявляються малоефективними. Крім того, медикаментозні методи відновлення ушкоджених кісткових тканин тварин часто блокують симптоми захворювань і негативно діють на організм людини через продукти тваринництва.

Тому в даний час триває пошук нових не медикаментозних методів вигоювання кісткової патології тваринництва. Завдання немедикаментозного впливу на кісткові травми може бути вирішена на основі застосування низкоенергетичних (інформаційних) ЕМП НВЧ діапазону.

У ветеринарній практиці було проведено досліді на конях і коровах з використанням електромагнітних випромінювань КВЧ діапазону високої енергії для лікування міозитів, артритів, ентероколітів, емфіземи, маститів. У багатьох випадках медикаментозні способи відчутних результатів не давали, у той час як додаткова дія електромагнітним випромінюванням мала наслідком повне видужання або поліпшення стану тварини.

Дані численних досліджень дозволяють припустити, що характер реакції біологічних об'єктів залежить не тільки від величини електромагнітної енергії, але й від модуляційно-часових параметрів ЕМП. Підбираючи параметри ЕМВ для дії на кісткові хвороби тварин, можна домогтися терапевтичного ефекту без застосування медикаментів. Вплив ЕМВ підсилює і прискорює боротьбу з захворюваннями, мобілізуючи для цього власні можливості організму.

Проникаючи в організм тварини, ці випромінювання при певних параметрах (частота, щільність потоку потужності, експозиція, модуляція, стабільність частоти) трансформуються в інформаційні сигнали, що здійснюють керування відбудовними процесами в ньому. Ефективний вплив на хвороби тварин варто очікувати від дії ЕМП дециметрового діапазону, оскільки вони мають більшу проникливу здатність, ніж хвилі інших діапазонів.

Як один з основних механізмів дії НВЧ випромінювання на клітинному рівні є концепція провідної ролі біологічних мембран у реакціях екосистем на це випромінювання. Вибір біологічних мембран як предмету дослідження обумовлено, по-перше, їх повсюдністю і вирішальною роллю в життєдіяльності окремих клітин і організму в цілому; по-друге, їхньою першочерговістю до впливів зовнішніх фізичних факторів. Тому пошуки первинних механізмів впливу низкоенергетичних електромагнітних випромінювань на клітину повинні йти паралельно з вивченням молекулярних принципів будови і функціонування мембран, що залежать від їхньої електричної і магнітної характеристики.

Слід зазначити, що терапевтичний ефект при дії на тварин електромагнітним випромінюванням може бути пов'язаний як із просторовим розподілом електромагнітного поля, так і з резонансними частотами тих або інших білкових молекул або внутрішньоклітинних елементів.

Таким чином, при відновленні кісткової тканини кінцівок тварин необхідне застосування електромагнітного випромінювання, для одержання якого варто використовувати високо стабільні генератори НВЧ діапазону, які дозволяють здійснити точне ($10^3 \dots 10^4$) настроювання на контур біологічного об'єкта, що забезпечує повну (95 %) передачу енергії опромінення біологічній структурі і суттєво змінює загальний час впливу.

Проведений огляд джерел НВЧ випромінювань показав, що для створення не медикаментозних методів вигоювання кісткової патології у тварин, пов'язаних зі застосуванням електромагнітних випромінювань, необхідні дослідження по створенню високо стабільних джерел випромінювань НВЧ діапазону, які відповідають високим вимогам щодо спектру вихідних сигналів, діапазону перебудови частоти і потужності вихідного сигналу.

Зі сказаного вище можна зробити висновок, що для поліпшення процесу вигоювання кісткової патології тварин варто застосовувати низькоенергетичні ЕМП НВЧ діапазону,

застосування яких вимагає теоретичних та експериментальних досліджень для визначення параметрів ЕМВ, а також розробки високостабільних спеціалізованих джерел НВЧ коливань.

У **другому розділі** розроблено теоретичну модель електромагнітних полів НВЧ діапазону усередині ушкодженої кінцівки сільськогосподарської тварини.

Очевидно, що кінцівки сільськогосподарських тварин можна представити у вигляді багатопарових структур, що складаються зі шкірного покриву, м'яких тканин і власне кістки. Однак при визначенні структури електромагнітного поля всередині реального біологічного об'єкта виникають труднощі, пов'язані з точним математичним описом його форми. Тому для опису структури розглянутих полів самі біологічні об'єкти представляють у вигляді простих геометричних фігур. Зокрема, у даній роботі травмована кінцівка сільськогосподарської тварини подана у вигляді багатопарового циліндра.

Розглянуто випадок падіння на циліндр плоскої електромагнітної хвилі, що поширюється в напрямку, перпендикулярному його осі. При цьому розв'язок отримано для випадку, коли вісь циліндра рівнобіжна електричному вектору ($\perp$ -поляризація)

Відповідно до вихідних умов падаюче поле при $\perp$ -поляризації буде мати вигляд:

(1)

де E_{DSMT4} і H_{DSMT4} – комплексні амплітуди електричного і магнітного полів, відповідно;

– хвильове число у середовищі, що оточує циліндр;

– кругова частота падаючого випромінювання;

– частота ЕМП;

часовий множник t_{DSMT4} опущено.

Спочатку було знайдено коефіцієнти відбиття і проходження всередину одношарового біологічного циліндричного об'єкта. Вони мають вигляд:

(2)

де J_0 , J_1 – функції Бесселя першого роду нульового і першого порядку, відповідно;

$H_0^{(2)}$, $H_1^{(2)}$ – Функції Ханкеля другого роду нульового і першого порядку, відповідно.

Потім на підставі отриманих результатів було зроблено перехід безпосередньо до багатошарової кінцівки тварини. Вона розглядалася у вигляді шаруватої структури з п'ятьма шарами, що відповідають кістковому мозку, кістці, м'язовій тканині, шкірі і волосяному покриву. При цьому кожний із шарів має свою діелектричну проникність, де 1, 2, 3, 4, 5, починаючи з кісткового мозку. Що стосується магнітної проникності кожного шару, то вона скрізь дорівнює магнітній проникності вільного простору, тобто μ_0 . DSMT4 Гн/м, тому що і моделюючий кінцівку тварини циліндр і оточуюче його середовище, тобто повітря, є немагнітними.

Було розглянуто два сусідні шари: під номером i і $i+1$. Очевидно, шар під номером i буде внутрішнім стосовно шару $i+1$. Внутрішній шар розташовано між радіусами r_i і r_{i+1} , тобто $r_i < r_{i+1}$, і характеризується електрофізичними параметрами ϵ_i , μ_i , σ_i . Зовнішній шар розташовано між радіусами r_{i+1} і r_{i+2} . DSMT4 ϵ_{i+1} , μ_{i+1} , σ_{i+1} , тобто ϵ_{i+1} , μ_{i+1} , σ_{i+1} , і характеризується ϵ_{i+1} , μ_{i+1} , σ_{i+1} . DSMT4 ϵ_{i+1} , μ_{i+1} , σ_{i+1} .

З огляду на результати, зазначені вище, електромагнітні поля у внутрішньому і зовнішньому шарах були представлені у вигляді суперпозиції двох полів: поля, що прийшло з зовнішньої до даного шару області, і поля, відбитого від внутрішньої до даного шару області.

За умови, що падаюче на циліндр поле є плоским з ϵ_{i+1} DSMT4 -поляризацією, всі перерозсіяні поля також повинні мати три складових: дві тангенціальних E_{θ} , E_{ϕ} DSMT4 і одну радіальну E_r DSMT4.

Таким чином, у шарі під номером i буде існувати електромагнітне поле з компонентами:

$$E = E_r + E_{\theta} + E_{\phi}; \quad (3)$$

$$H = H_r + H_{\theta} + H_{\phi}. \quad (4)$$

Аналогічні вирази будуть описувати поле й у шарі під номером $i+1$.

На межі між шарами i і $i+1$ тангенціальні компоненти полів повинні зшиватися, тобто дорівнювати один одному. Відділяючи одна від одної нульову гармоніку і гармоніку з номерами n DSMT4, отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для нульової гармоніки, що є основною під час впливу ЕМВ на травмовану кінцівку:

$$(5)$$

Дана система з двох лінійних алгебраїчних рівнянь містить чотири невідомих величини a_1, a_2, a_3, a_4 . Системи, подібні (5), повинні бути записані для кожного з п'яти шарів розглянутої кінцівки. Кожна сусідня пара з п'яти систем, що одержана, буде "зчеплена" між собою за допомогою двох невідомих коефіцієнтів, які входять одночасно до обох систем. Інакше кажучи, записавши систему рівнянь для кожного з п'яти шарів, одержано систему з десяти однорідних лінійних алгебраїчних рівнянь, що містять дванадцять невідомих коефіцієнтів. Причому всі коефіцієнти, починаючи від першого шару циліндра і закінчуючи навколишнім середовищем, взаємозалежні.

Однак, оскільки перший шар не має внутрішнього, отже, у ньому коефіцієнт a_1 , пов'язаний з відбиттям від внутрішнього шару, дорівнює нулю, а в оточуючому циліндр середовищі коефіцієнт a_4 , що характеризує хвилю, яка пройшла з зовнішнього шару, буде дорівнювати a_4 , тобто амплітуді падаючої на циліндр хвилі, то з дванадцяти невідомих коефіцієнтів два визначаються з фізичного змісту задачі, що в результаті приводить до системи з десяти алгебраїчних рівнянь з десятьма невідомими, яка має єдине рішення.

Для практичної реалізації запропонованого методу обчислення невідомих коефіцієнтів і систему (5) було представлено в матричному вигляді:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

де a_1, a_2, a_3, a_4 - квадратні матриці другого порядку, елементами яких являються відповідні функції Бесселя і Ханкеля.

Виконуючи аналогічну операцію для кожного із шарів, було одержано матричне рівняння

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

яке пов'язує між собою невідомі коефіцієнти першого шару кінцівки тварини і середовища, що її оточує. Тут a_1, a_2, a_3, a_4 - відомі матриці, задані виразами для a_1, a_2, a_3, a_4 . У результаті, знаходячи з (7) a_1, a_2, a_3, a_4 , за допомогою (6) обчислюють всі інші коефіцієнти.

Підстановка знайдених за допомогою (5), (6), (7) коефіцієнтів у рівняння Максвелла дає можливість обчислити внутрішні поля в кожному шарі травмованої кінцівки, а також у її навколишньому середовищі.

На підставі запропонованої теоретичної моделі було проведено попереднє визначення параметрів електромагнітних полів, що діють на травмовані кінцівки сільськогосподарських тварин з метою поліпшення відновлення ушкоджених тканин. Для цього було виконано чисельні розрахунки величин цих полів у кінцівках різних геометричних розмірів, визначено оптимальну величину частоти впливу, на підставі отриманих результатів дані відповідні рекомендації для технічних

8	3	3	3	f , ГГц	4	3	3	3	f , ГГц	4
	0	4	8	2	0	4	8	2		

характеристик терапевтичної апаратури, що пропонується у роботі.

Електрофізичні характеристики всіх п'яти шарів, що враховуються в розрахунках, бралися згідно з даними довідника. Напруженість електричної складової падаючого поля бралася рівна одиниці, що дозволяє легко переходити в розрахунках до будь-якого конкретного значення, при цьому розглядався випадок -поляризації.

З існуючих публікацій випливає, що основна позитивна дія електромагнітних випромінювань у випадку кісткових патологій пов'язана з їх впливом на клітинні мембрани і на активізацію транспорту крізь них іонів різних мікроелементів. При цьому характерні резонансні частоти цих процесів лежать у діапазоні Гц. Для уточнення даного частотного діапазону було проведено дослідження залежності від частоти виразу (3), що представляє амплітуду електричної складової ЕМП в області кісткового мозку і кісткової тканини кінцівки. Відповідні коефіцієнти розсіювання розраховувалися на підставі виразу (7).

На рис. 1, 2 представлено результати розрахунку для ноги корови та свині, що проводилися в діапазоні частот 3,0...4,2 ГГц. З рисунків видно, що в області кісткового мозку і кісткової тканини максимальне значення електричної складової буде мати місце в діапазоні частот порядку 3,6-3,8 ГГц. При відхиленні вліво і вправо від зазначеної частоти амплітуда поля зменшується

Рис. 1. Залежність квадрата амплітуди

електричної складової ЕМП
від частоти для ноги свині:
1- зона кісткового мозку
2- зона кісткової тканини

Рис. 2. Залежність квадрата амплітуди

електричної складової ЕМП
від частоти для ноги корови:
1- зона кісткового мозку
2- зона кісткової тканини

Було проведено також чисельне дослідження розподілу поля в поперечному перетині травмованої кінцівки. Це необхідно було зробити для з'ясування питання, наскільки ефективно це поле буде діяти саме на хворі ділянки ніг.

На рис. 3 представлено залежність квадрата амплітуди повздовжньої складової електричного поля ЕМВ всередині кінцівок корови та свині від радіуса поперечного перетину ноги. Частота опромінення при цьому бралась рівною середньому значенню вище вказаного діапазону тобто, 3,7 ГГц. З графіка видно, що як в області кісткового мозку, так і в області кісткової тканини електричне поле значно вище, ніж в інших

областях. Звідси витікає висновок, що опромінення з даною частотою буде максимально впливати саме на хвору кісткову тканину, що повинно сприяти її якнайшвидшому відновленню.

Аналогічні результати були отримані і при проведенні розрахунків для кінцівок інших сільськогосподарських тварин (кінь, вівця).

Отже, можна зробити висновок, що найбільш прийнятною частотою електромагнітного поля, яке можна використовувати в терапевтичних цілях при лікуванні травм кінцівок різних сільськогосподарських тварин, є діапазон від 3,6 до 4,0 ГГц.

Даний діапазон прийнятний як з погляду одержання максимальних амплітуд ЕМП усередині об'єктів, що опромінюються, так і з погляду оптимального розподілу внутрішнього поля.

Крім того, із проведених розрахунків встановлено, що для інтенсифікації процесу відновлення кісткової тканини джерело опромінення повинно випромінювати приблизно 100Вт/м².

Третій розділ присвячено дослідженню і розробці джерел НВЧ коливань для поліпшення відновлення кісткових тканин при кістковій патології сільськогосподарських тварин з обґрунтуванням вимог до спектральних і флуктуаційних характеристик. Показано, що традиційно відомі схеми радіоелектронних пристроїв не відповідають високим вимогам, специфічним для апаратури електромагнітної терапії. Розглянуто принципи побудови джерел НВЧ коливань для інформаційного впливу на кісткові тканини сільськогосподарських тварин з виконанням високих вимог до стабільності частоти і ступеня придушення побічних дискретних складових у спектрі вихідного сигналу. При побудові багато каскадних помножувачів частоти з застосуванням транзисторів і варакторів розглянуті основні причини виникнення паразитної фазової модуляції і заходи для її зниження.

Показано, що при одержанні високочастотних коливань у НВЧ діапазоні за допомогою множення частоти високостабільних низькочастотних коливань виникає ускладнення апаратури, зниження надійності, зростання зовнішньо полосних і побічних випромінювань, погіршення якості вихідного сигналу. Зроблено висновок про те, що таких недоліків позбавлені пристрої з гармоніковими кварцовими генераторами, у яких реалізується збудження кварцового резонатора на вищих гармоніках, що дозволяє здійснити безпосередню кварцову стабілізацію частоти у НВЧ діапазоні. При цьому частота використовуваної гармоніки виявляється нижчою частотою спектра вихідного сигналу і насиченість його "паразитними" частотами зменшується.

Рис. 3. Розподіл квадрата амплітуди електричної складової електромагнітного випромінювання всередині кінцівки корови на частоті 3,7 ГГц:

1- свині; 2- корови

Використання гармонікових кварцових автогенераторів дає можливість зменшити габарити пристрою, підвищити його надійність, знизити споживання енергії. Для розрахунку кварцових НВЧ генераторів запропоновано методику, яка справедлива в широкій області частот при значних рівнях вихідної потужності.

На рис. 4 показано залежності перебудови частоти вихідної потужності та коефіцієнта регенерації в межах зміни керуючої напруги від $-0,5$ до 30 В для генератора на частоті 250 МГц. З графіків видно, що потужність генератора і коефіцієнт регенерації в межах перебудови змінюється незначно. Характеристика перебудови частоти складає більше 5 МГц і має майже лінійну залежність від Еупр.

Короткочасна нестабільність частоти генератора складає 10^{-6} за час 10^{-3} с, а довгострокова нестабільність частоти за час виміру 1 с.

З урахуванням останніх досягнень у галузі напівпровідникової техніки розроблений експериментальний пристрій для опромінення ран тварин з кістковою патологією, що задовольняє вимогам монохроматичності вихідного сигналу. Придушення побічних складових у спектрі вихідного сигналу – 30 Дб, номінальна вихідна частота – $3,75$ ГГц, діапазон частотної перебудови – 2% , короткочасна нестабільність – 10^{-7} , вихідна потужність – 45 мВт.

У результаті виконаної роботи отримано практичні результати щодо розробки і дослідження джерел коливальних НВЧ діапазону з високими спектрально-флуктуаційними, енергетичними та експлуатаційними характеристиками.

У четвертому розділі наведено експериментальні дослідження опрацьованих пристроїв та результати дії низькоенергетичного випромінювання НВЧ діапазону на процес відновлення кісткової тканини кінцівок тварин.

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено джерело НВЧ коливальних з параметрами: вихідна частота – $3,75$ ГГц; вихідна потужність $P_{\text{вих}} \geq 10^{-1}$ Вт; придушення побічних гармонік в спектрі вихідного сигналу $Q_{\text{п вих}} \geq 40$ Дб; частота задаючого кварцового генератора – 250 МГц з перетворенням частоти у межах 2% ; коефіцієнт множення ; потужність живлення 30 Вт; при зміні потужності живлення в межах 10% потужність вихідного сигналу змінюється не більше ніж на 5% .

Для уточнення параметрів ЕМП, отриманих теоретичним шляхом, було проведено експериментальні дослідження, які пов'язані з визначенням електрофоретичної рухливості ядер клітин кісткової тканини. При цьому було визначено фактори, які слід вважати основними: частота ЕМП випромінювання f , експозиція t , щільність потоку потужності P .

Для кількісної та якісної оцінки впливу вищезазначених факторів було проведено регресійний та дисперсійний аналізи. За результатами дисперсійного аналізу встановлено якісний вплив факторів на функцію відгуку та ймовірні інтервали зміни факторів, а також перевірено працездатність експериментального джерела НВЧ випромінювання на різних режимах роботи.

На основі дисперсійного аналізу побудовано графічні залежності рухомості ядер клітин кісткової тканини від кожного з визначених параметрів ЕМП (рис. 5-7) при фіксації двох інших факторів. У досліджах частота ЕМП складала $3,75$ ГГц, експозиція 10 хв, щільність потоку потужності 100 Вт/м².

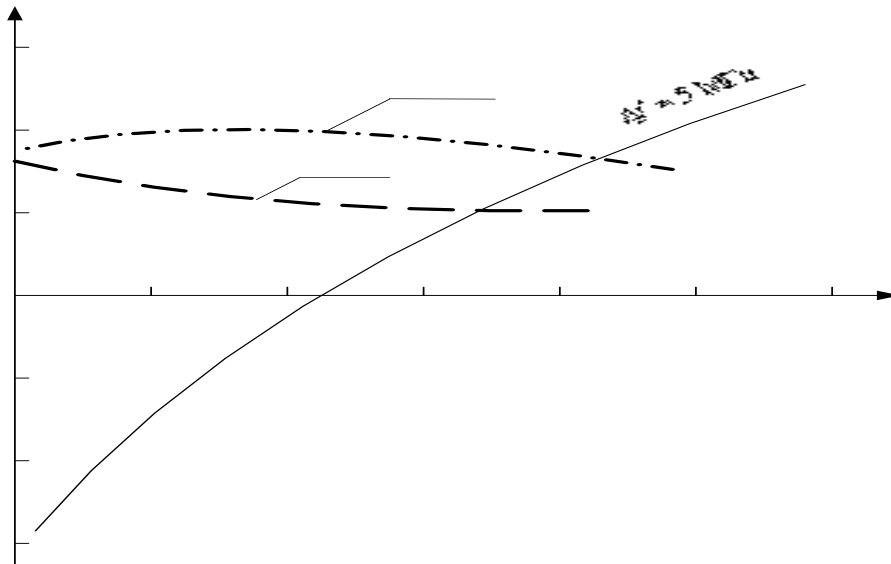


Рис. 4. Залежність перебудови (), вихідної потужності () та коефіцієнта регенерації () від зміни Еупр $\bar{I}_{в.о.}$

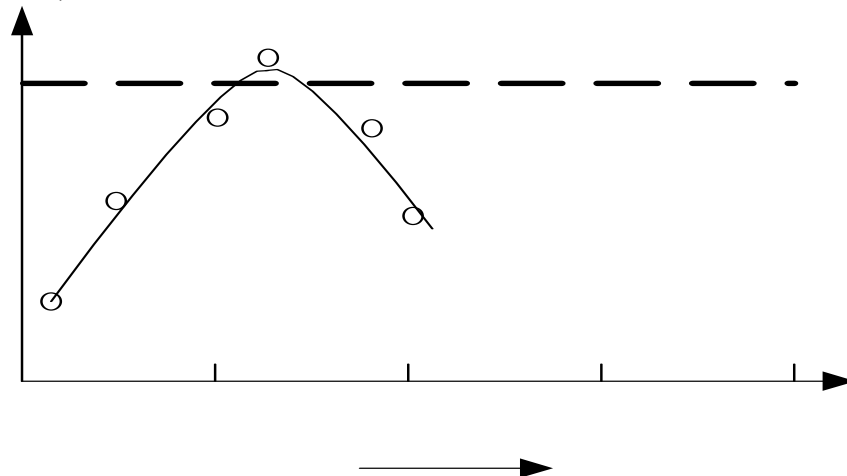
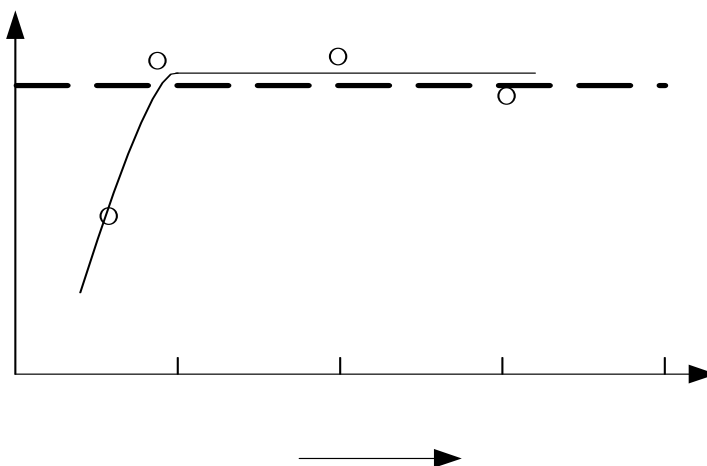


Рис. 5. Залежність рухомості ядер клітин кісткової тканини в діапазоні частот: при $Вт/м^2$; $\chiв.$ $\bar{I}_{в.о.}$



$\chiв.$

.Drawing.6

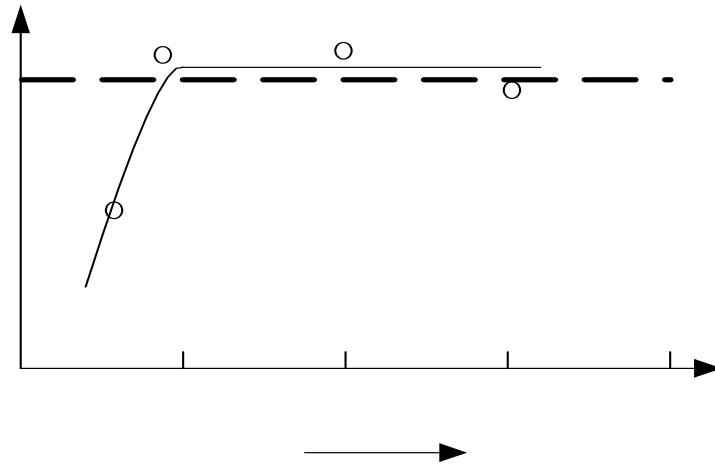
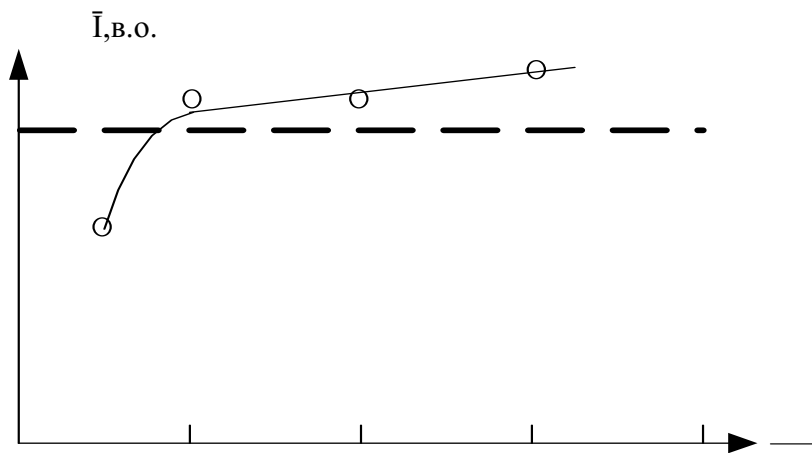


Рис. 6. Залежність рухомості ядер клітин від експозиції:
=3750 МГц

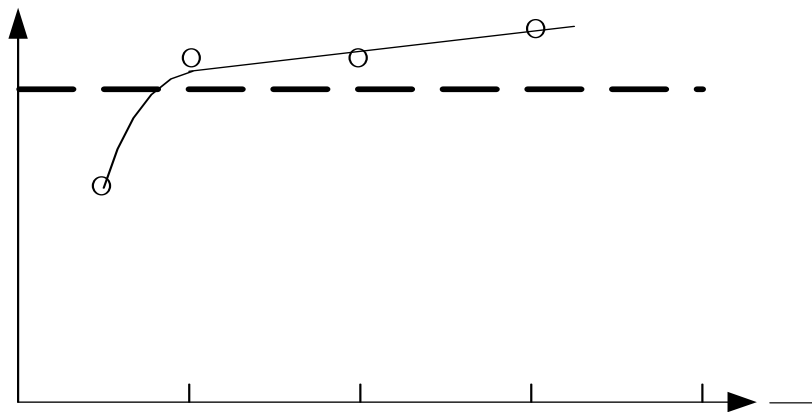
.DSMT4

Вт/м²; f



→

.Drawing.6



→

Рис. 7. Залежність рухомості ядер клітин від потужності: f=3750 МГц; t = 10хв.

Регресійний аналіз проводився на основі багатофакторного експерименту, що дозволило одержати поліноміальну модель, яка описує взаємозв'язок показника електрофоретичної рухливості ядер клітин кісткової тканини з параметрами електромагнітного поля і оцінити ступінь впливу факторів на функцію відгуку. При проведенні експериментальних досліджень прийнято такі рівні та інтервали варіювання факторів: частота ЕМП – X_1 змінюється від 3,6 до 4,0 ГГц з

інтервалом 0,2 ГГц, експозиція $-X_2$ від 5,0 до 20,0 хв з інтервалом 7,5 хв, щільності потоку потужності $-X_3$ від 50 до 150 Вт/м² з інтервалом 50 Вт/м².

Математичну модель, яка описує залежність показника електрофоретичної рухливості ядер клітин, кісткової тканини від параметрів ЕМП, наведено у вигляді рівняння регресії

$$Y = 6,16 - 0,192X_1 - 0,292X_2 - 0,228X_3 - 0,409X_1^2 + 0,331X_2^2 + 0,565X_3^2 - 0,275X_1X_3 + 0,350X_2X_3, \quad (8)$$

де X_1, X_2, X_3 – кодоване позначення факторів, які здійснюють вплив на вихідний параметр Y : частота X_1 , експозиція X_2 , щільність потоку потужності X_3 .

Результати досліджень та перевірка значущості коефіцієнтів регресії показали, що ступенем впливу на електрофоретичну рухливість ядер клітин кісткової тканини розподілилися приблизно однаково.

Перевірка за критерієм Фішера дозволила зробити висновок, що гіпотеза про адекватність моделі при 1% рівні значущості не відкидається.

Встановлено також, що залежність показника електрофоретичної рухливості ядер клітин кісткової тканини від параметрів ЕМП має нелінійний характер.

Для знаходження оптимальних параметрів процесу була вирішено систему рівнянь, які отримано порівнюванням нулю значень компонентів градієнта виразу (8). Це дозволило отримати слідуючи значення факторів в оптимальній точці: $X_{1оп} = -0,238$; $X_{2оп} = 0,436$; $X_{3оп} = 0,009$, що відповідає таким значенням натуральних параметрів: частоті ЕМП $f_{оп} = 3,752$ ГГц; експозиції $t_{оп} = 15,8$ хв; щільності потоку потужності $P_{оп} = 100,5$ Вт/м².

З урахуванням різниці біофізичних характеристик кісткової тканини кінцівки різних тварин в межах відносної діелектричної проникності $\varepsilon_{к.т.}^* = 8,45-7,93$; щільності тканини $\rho_{к.т.} = 1850-1930$ кг/м³; товщини $d_{к.т.} = (5-8) \cdot 10^{-3}$ м, параметри ЕМП можуть змінюватися: частота $f = 3,752 - 0,15$ ГГц; експозиція $t = 0,9$ хв; щільність потоку потужності $P = 100,5 - 4,9$ Вт/м².

Спільно з інститутом експериментальної та клінічної ветеринарної медицини УААН (м. Харків) була проведена науково-дослідну роботу з вивчення особливостей роздільної та спільної дії постійного магнітного поля (ПМП), лазерного випромінювання та низькоенергетичного електромагнітного поля НВЧ діапазону.

В якості джерела ПМП використані кільцеподібні феритові магніти з напруженістю поля внутрішнього кільця (310-330) 10^4 Тл. Джерелом лазерного випромінювання був пристрій типу ЛГ-52-1 з вихідною потужністю порядку $2 \cdot 10^{-3}$ Вт. НВЧ опромінювання здійснювалося генератором дециметрового діапазону хвиль ($f = 3,752$ ГГц) з використанням діелектричної антени малого розміру, що забезпечує локальність дії.

Вивчення впливу фізичних факторів електромагнітної природи на репараційні процеси здійснювалося на основі стандартної моделі дірчастого дефекту (Schumacher G. L., Wischhusen I., 1967). Об'єктом дослідження були пацюки Вістар у кількості 40 тварин. За пріоритетом, найбільш активізуючий вплив на процес відновлення кісткової тканини має низькоенергетичне НВЧ випромінювання, потім йде магнітне поле і, нарешті, лазерний вплив.

У виробничому досвіді при лікуванні тварин з кістковою патологією використовувалося розроблене експериментальне джерело НВЧ випромінювання. Антена випромінювання встановлювалася контактно на уражену область кінцівки тварини. Оцінку ходу лікування і процесу відновлення кісткової тканини проводили фахівці Вовчанської рай-онної державної лікарні ветеринарної медицини.

У результаті впливу було встановлено, що низькоенергетичні випромінювання викликають більш швидку кістковідбудову. При цьому має місце розсмоктування та зміна старого кортикального шару знову утвореним зі збереженням кістково-мозкової рідини. Крім того, запропонований метод та джерело НВЧ випромінювання мають значні переваги перед традиційними технологіями впливу на кісткові тканини: низька потужність випромінювання, зниження терміну відновлення тканини, часу дії, кількості процедур,

відсутності негативної дії (протипоказань).

Було проведено оцінку економічної доцільності використання електромагнітного методу та джерела НВЧ випромінювання для поліпшення відновлення кісткової тканини тварин. На прикладі корівника на 200 голів було показано, що застосування низькоенергетичного ЕМП НВЧ діапазону дозволяє одержати прибуток у розмірі 6700 грн. на рік.

Результати досліджень було апробовано в ТОВ „Колос” Харківської області. Економічний ефект досягає 5,6 тис. грн. на рік.

Проведений розрахунок техніко-економічної ефективності технології низькоенергетичного електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону для поліпшення відновлення кісткової тканини підтверджує прогноз перспективності широкого її застосування у тваринництві.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню завдання отримання нових науково-обґрунтованих теоретичних і експериментальних результатів, які в сукупності є істотними для розвитку низькоенергетичної електромагнітної дії і технічних засобів дециметрового діапазону для відновлення кісткової тканини сільськогосподарських тварин.

Головними підсумками виконаної роботи є наступні результати.

1. Проведеними дослідженнями встановлено, що одним з перспективних методів для поліпшення відновлення кісткової тканини тварин є метод, заснований на використуванні низькоенергетичних електромагнітних полів НВЧ діапазону, який дозволяє створити ефективну, енергозберігаючу та екологічно чисту технологію відновлення кісткової тканини.

2. Удосконалено математичну модель процесу взаємодії ЕМП з тканинами кінцівки тварини, яка розглядається як багат шаровий циліндр з різними біофізичними характеристиками шарів ($\epsilon_{\text{к.т.}}=8.35-7.83$; $\epsilon_{\text{к.м.}}=5.90-4.90$; $\epsilon_{\text{м.т.}}=46.50-47.30$; $\epsilon_{\text{к.п.}}=43.50-45.20$; $\epsilon_{\text{ш.п.}}=4.63-5.36$; $\rho_{\text{к.т.}}=3$; $\rho_{\text{к.м.}}=928 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{м.т.}}=3$; $\rho_{\text{к.п.}}=1250-1270 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{ш.п.}}=1.28-1.33 \text{ кг/м}^3$), що дозволяє визначити параметри впливаючого електромагнітного випромінювання (частоту, щільність потоку потужності, діапазон зміни частоти тощо) і розподілу самого поля по поперечному перетину кінцівки, де виклике необхідний відновний ефект, що зумовлює технічні параметри джерела НВЧ випромінювання.

3. Проведені на підставі математичної моделі розрахунки показали, що найприйнятніший діапазон частот електромагнітного опромінювання кінцівок різних сільськогосподарських тварин є 3,6-4,0 ГГц., у цьому випадку найбільша кількість енергії ЕМП виділяється в шарі кісткової тканини кінцівки тварини ($\epsilon_{\text{к.т.}}=8.35-7.83$).

4. У результаті експериментальних досліджень отримано регресійні рівняння, які встановлюють залежність показника електрофоретичної рухливості ядер кліток кісткової тканини від експозиції і параметрів впливаючого електромагнітного поля (частота, щільність потоку потужності).

5. Підтверджено принципову можливість регенерації кісткової тканини при дії на неї НВЧ випромінюванням з оптимальними параметрами:

- частотою ЕМП $f_{\text{оп}}=3,752 \pm 0,15 \text{ ГГц}$;
- щільністю потоку потужності $P_{\text{оп}}=100.5 \pm 4,9 \text{ Вт/м}^2$;
- експозицією $t_{\text{оп}}=15.8 \pm 0,9 \text{ хв}$.

при $\epsilon_{\text{к.т.}}=8,45-7,93$; $\rho_{\text{к.т.}}=3$; $d_{\text{к.т.}}=3 \text{ м}$.

6. Проведений аналіз варіантів структурних схем формування коливань у НВЧ діапазоні показав, що за простотою роботи і надійністю, та за об'ємно-ваговими показниками слід надати перевагу схемі з прямим множенням частоти кварцового генератора (подавлення побічних складових у спектрі вихідного сигналу не менше 40 дБ), а за спектрально-флюктуаційними характеристиками (подавлення побічних складових в спектрі вихідного сигналу до 100 дБ) – схемам з фазовим підстроюванням частоти.

7. Теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили необхідність і можливість створення джерела НВЧ випромінювання з технічними параметрами:

- вихідна частота – $3,75 \pm 0,15$ ГГц;
- щільність потоку потужності – $100 \pm 5,0$ Вт/м²;
- частота задаючого кварцового генератора – 250 МГц;
- діапазон перебудови частоти кварцового генератора – 2%;
- подавлення побічних гармонік вихідного сигналу – не менше 40 дБ;
- довготривала нестабільність частоти генератора – $2 \cdot 10^{-9}$ за 1 с;
- вихідна потужність генератора – 0,1 Вт;
- споживана потужність $P_{\text{пот.}}$ – 30 Вт;
- коефіцієнт множення підсилювально-розмножувального каскаду N – 15.

8. Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних і експериментальних досліджень створено передумови для розробки і впровадження у виробництво немедикаментозного способу і технічного пристрою НВЧ випромінювання для поліпшення відновлення кісткової тканини тварин, застосування яких в умовах виробництва підтвердило їх високу ефективність, яка була неможлива із застосуванням традиційних способів дії.

9. Результати досліджень апробовано в господарстві ТОВ «Колос» Харківської області. Економічна ефективність від упровадження електромагнітного методу лікування тварин склала 5,6 тис. грн на рік, від вибраковування було врятовано 10 високопродуктивних корів. На прикладі корівника в 200 голів було показано, що застосування низкоенергетичних ЕМП НВЧ діапазону дозволить одержувати прибуток у розмірі 6700 грн на рік.

10. Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, можуть бути використані для розробки нових типів технічних пристроїв для дії на різні органи тварин за допомогою направлених надвисокочастотних низкоенергетичних електромагнітних полів з метою підвищення їх життєдіяльності.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Яковлев В.Ф., Орел О.М. Модель травмованої кісткової тканини тварин, що знаходиться під дією НВЧ опромінення // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - Вип. 12. - 2003. - С. 60 - 67.

Автором запропоновано метод, який дозволяє моделювати розподіл електромагнітних полів усередині травмованої кісткової тканини.

2. Яковлев В.Ф., Орел О.М. До питання про модель травмованої кісткової тканини тварин, що знаходиться під дією НВЧ опромінення // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - Вип. 12. - 2003. - С. 68 - 73.

Запропоновано методику одержання розв'язку для математичної моделі, що дозволяє визначити розподіл електромагнітних полів усередині травмованої кінцівки сільськогосподарської тварини/

3. Орел О.М. Аналіз методів та електрофізичних пристроїв для лікування кісткової хвороби тварин // Праці Таврійської державної агротехнічної академії.-Мелітополь:ТДАТА.-Вип.15.-2003.-С.92-98.

4. Орел А.Н., Яковлев В.Ф. Метод расчета кварцевых генераторов СВЧ // Вісник ХДТУСГ. - Харків.-2003.-Вип.19.-С.191-197.

Автором запропоновано один з можливих варіантів методики розрахунку кварцового генератора.

5. Орел А.Н., Яковлев В.Ф. Лечение костной патологии животных низкоэнергетическим электромагнитным излучением СВЧ диапазона // Вісник ХДТУСГ. - Харків.-2003.-Вип.19.-С.197-201.

В роботі описана запропонована та виконана автором методика проведення експериментів з вивчення впливу електромагнітних випромінювань на ушкоджену кісткову тканину.

6. Яковлев В.Ф., Назаренко И.П., Орел А.Н. Высокостабильный источник СВЧ излучения дециметрового диапазона // Праці Таврійської державної агротехнічної академії.- Мелітополь:ТДАТА.-Вип.19.-2004.-С.101-106.

Автором обґрунтовано варіант технічної реалізації високостабільного пристрою НВЧ коливань.

7. Яковлев В.Ф., Орел О.М. Биотропные параметры электромагнитного випромінювання для регенерації травмованої кісткової тканини тварин. // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. Науково виробничий журнал №3(8).-2004р.-С.64-68.

Автором обґрунтовано біотропні параметри електромагнітного поля НВЧ діапазону при взаємодії з кістковими тканинами тварин.

АНОТАЦІЯ

Орел О. М. Обґрунтування параметрів електромагнітного впливу і технічних засобів для поліпшення відновлення кісткової тканини сільськогосподарських тварин. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.16 - електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі. - Таврійська державна агротехнічна академія, Мелітополь, 2004.

Дисертацію присвячено розв'язанню задачі одержання нових науково-обґрунтованих теоретичних і експериментальних результатів, що в сукупності є істотними для розвитку низькоенергетичної електромагнітної технології та технічних засобів дециметрового діапазону для поліпшення відновлення кісткової тканини при лікуванні кісткової патології у сільськогосподарських тварин. Запропоновано методику одержання величин внутрішнього і зовнішнього полів в ушкодженій кінцівці тварини з кінцевим числом радіальних шарів. Проведені розрахунки показали, що найбільш прийнятним діапазоном частот електромагнітного опромінювання кінцівок різних сільськогосподарських тварин є 3,6...4,0 ГГц. Для розробки помножувачів частоти НВЧ тракту джерел електромагнітного випромінювання, з урахуванням вимог до їх спектральних характеристик, запропоновано методику, що може застосовуватись для широкого класу пристроїв з різними коефіцієнтами множення. Для синтезу кварцових генераторів у діапазоні 200...500 МГц запропоновано методику з розрахунку їх основних параметрів з підстроюванням частоти в межах 2 % від основної частоти. У результаті проведених досліджень показано, що для ефективного впливу на кісткову патологію тварин необхідно застосовувати НВЧ випромінювання з параметрами: частота $\pm 0,15$ ГГц; щільність потоку потужності $P = 100 \pm 4,9$ Вт/м²; експозиція $t = 15,8 \pm 0,9$ хв.

Ключові слова: низькоенергетичне електромагнітне поле, випромінювання НВЧ діапазону, помножувачі частоти, система алгебраїчних рівнянь, травмовані кінцівки тварин, кісткова тканина, електрофоретична рухливість ядер.

АННОТАЦИЯ

Орел А.Н. Обоснование параметров электромагнитного воздействия и технических средств для улучшения восстановления костной ткани сельскохозяйственных животных. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.16 - электротехнологии и электрооборудование в агропромышленном

комплексе. - Таврическая государственная агротехническая академия, Мелитополь, 2004.

Диссертация посвящена решению задачи получения новых научно-обоснованных теоретических и экспериментальных результатов, которые в совокупности являются существенными для развития низкоэнергетической электромагнитной технологии и технических средств дециметрового диапазона для улучшения восстановления поврежденной костной ткани у сельскохозяйственных животных.

Проведенный анализ состояния вопроса показал, что травматизм животных – наиболее распространенная группа заболеваний из всех незаразных болезней. На его долю приходится до 50 % от общей заболеваемости животных. В настоящее время для лечения травм животных в основном используют медикаментозные способы. Применение антибиотиков и других медикаментов при восстановлении костной ткани травм животных в большинстве случаев является малоэффективным и небезопасным, блокирует симптомы заболеваний.

Поэтому разработка эффективных немедикаментозных способов восстановления костной ткани животных является актуальной задачей. Решение поставленной задачи возможно на основе применения низкоэнергетических (информационных) электромагнитных излучений СВЧ диапазона длин волн. В ветеринарной практике СВЧ и КВЧ воздействия является тем методом, который принципиально и выгодно будет отличаться от существующих ранее физиотерапевтических процедур. В ряде случаев он может заменить медикаментозный и хирургический методы лечения.

Для определения биотропных параметров электромагнитного излучения (частота, мощность, нестабильность частоты, экспозиция), вызывающих необходимый терапевтический эффект у больных животных, проведены исследования математической модели с учетом строения и электрофизических свойств костной ткани животных. С целью получения решения рассматриваемой задачи, основываясь на решении задачи о рассеянии электромагнитной волны на однородном биологическом объекте в форме цилиндра, получены величины внутреннего и внешнего поля в поврежденной конечности животного с конечным числом радиальных слоев. Задача решена с помощью сшивания тангенциальных составляющих полей каждого слоя на границах между слоями, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений. Проведенные на основании усовершенствованной теоретической модели расчеты показали, что наиболее приемлемой частотой электромагнитного облучения конечностей различных сельскохозяйственных животных является 3,6...4,0 ГГц. В этом случае, как распределение самого поля по поперечному сечению конечности, так и его амплитуда наиболее оптимальны. Сделан вывод, что облучение должно вестись с мощностью порядка 100 Вт/м², что интенсифицирует обмен веществ на уровне мембран больных клеток и способствует быстрейшему восстановлению поврежденной костной ткани.

Проведенный сравнительный анализ вариантов структурных схем формирования колебаний в СВЧ диапазоне показал, что по простоте работы и надежности, объемно-весовым показателям следует отдать предпочтение схеме с прямым умножением частоты кварцевого генератора (подавление побочных составляющих в спектре выходного сигнала более 50 дБ).

Экспериментальные исследования показали возможность создания источников СВЧ излучений с прямым умножением частоты кварцевого генератора и с параметрами: выходная частота – 3,75 ГГц; выходная мощность Вт; подавление побочных гармоник в спектре выходного сигнала – 40 дБ; частота задающего кварцевого генератора – 250 МГц с перестройкой по частоте 2 %.

Экспериментально подтверждена принципиальная возможность регенерации костной ткани при воздействии на нее СВЧ излучением с параметрами: ± 0 , 15 ГГц; $P=100\pm 4,9$ Вт/м²; $t=15,8\pm 0,9$ мин.

Результаты исследований внедрены в хозяйстве ООО "Колос" Харьковской области. Экономическая эффективность от внедрения электромагнитного метода восстановления костной ткани животных составила 5,6 тыс. грн. в год, от выбраковки были спасены 10 высокопродуктивных коров. На примере коровника в 200 голов было показано, что применение низкоэнергетических ЭМП СВЧ диапазона позволит получать прибыль в размере 6700 грн. в год.

Ключевые слова: низкоэнергетическое электромагнитное поле, излучение СВЧ диапазона, травмированные конечности животных, костная ткань, электрофоретическая подвижность, система алгебраических уравнений, умножители частоты, излучения СВЧ диапазона.

ANNOTATION

Oryol A.N. Electromagnetic Influence parameters substantiation and hardwares for the improvement of renewal of bone fabric of agricultural animals. - Manuscript.

The thesis for a candidate degree on specialty 05.09.16 - Electrical technologies and electrical equipment in agriculture. - The Tavriya state technical academy of agriculture, Melitopol, 2004.

The thesis is dedicated to solution of the problem on deriving of new scientific and experimental results which are essential to progressing of low-energy electromagnetic technologies and means of ultra high frequency for treatment of bone pathology of agricultural animal. The method of magnitude calculation of internal and exterior fields in injured animal extremities with final number of radial strata is proposed. The accounts held have shown, that the most reasonable frequency of electromagnetic beaming of different agricultural animal extremities is 3,7...3,8 GHz. For creation of microwave frequency multipliers of sources of an electromagnetic radiation, with allowance for of requests on spectral reflectance, the method of application is proposed, which is the one that is applicable for the broad class of devices with different coefficients of multiplying. For synthesizing crystal oscillators in range 200 ... 500 MHz the method of calculation on account of their major specifications with tuning of frequency is proposed within the limits of 2 % from a base frequency. As a result the research held studies is revealed, that it is necessary to apply to effective treatment of bone pathology for the cows a microwave radiating with parameters: $2\pm 0,15$ GHz; $P=100\pm 4,9$ W/m²; $t=15,8\pm 0,9$ min.

Keywords: low-energy electromagnetic technologies, injured extremities of animal, bone pathologies, membrane of ill cells, system of algebraic equations, frequency multipliers, microwave radiating.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ ЖИВОТНЫХ И ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Характеристика и способы регенирации тканей у животных

Разработка немедикаментозных способов восстановления костной ткани животных информационными электромагнитными излучениями сверхвысокой частоты (СВЧ) невозможна без анализа основных причин заболеваний костей и методов их лечения. Костная патология у животных является одной из сложных и актуальных проблем в животноводстве.

Костная патология наносит значительный экономический ущерб животноводству. Так, например, некроз, кариес костей снижают удои коров на 30 - 50% и более, а при переломах костей конечностей животные часто выбраковываются [1 - 6].

Причинами болезни костей могут быть закрытые и открытые механические повреждения, острые гнойные воспалительные процессы, локализующиеся вблизи костей.

Переломы костей являются особо выраженной формой патологии костного скелета. Они занимают значительное место среди болезней незаразной этиологии. Переломы костей – тяжелейшая травма для организма. Они сопровождаются сильной ответной реакцией, выражающейся в значительных изменениях в организме [1, 2, 4].

По характеру повреждения переломы подразделяются на открытые и закрытые. В первом случае переломы сопровождаются повреждением кожи и глублежащих мягких тканей, а во втором – целостность костного покрова сохраняется. Под действием механической травмы наружный покров и глублежащие ткани могут повреждаться снаружи, а острыми обломками костей – изнутри. Открытые переломы легко инфицируются, поэтому наиболее опасны [2, 5, 6].

Заживление переломов костей сопровождается как местными, так и общими изменениями в организме. Костная ткань после перелома восстанавливается путем образования костной мозоли. В процессе регенерации участвуют: внутренний камбиальный слой надкостницы, эндост, костный мозг, эндотелий сосудов гаверсовых каналов и молодая соединительная ткань, в последующем метаплазирующая в костную.

В первичной костной мозоли различают [2, 6, 7 - 11]: периостальную, или наружную, костную мозоль, которая развивается из клеток камбиального слоя надкостницы; эндостальную, или внутреннюю, мозоль, источником образования которой служат клетки эндоста и костного мозга обоих обломков; промежуточную мозоль, развивающуюся из гаверсовых каналов кортикального слоя кости и отчасти из клеток эндоста и периоста; парооссальную, или околокостную, мозоль, образующуюся из мягких тканей вблизи перелома.

Степень развития этой мозоли зависит от степени повреждения окружающих тканей.

Первая фаза – подготовительная. Она начинается непосредственно после травмы. Кроме кости при травме повреждаются и окружающие ткани, в число которых входят периост, смежные мышцы и кровеносные сосуды, идущие по линии перелома. В результате происходят кровотечение и образование гематомы в медуллярном канале, между концами отломков кости и под отслоившейся надкостницей. В этой крови быстро идет процесс коагуляции и образуется сгусток. Разрыв гаверсовых систем ведет к гибели остеоцитов и некрозу концов отломков. Поврежденная надкостница, костный мозг и другие окружающие ткани тоже вносят продукты некроза в очаг повреждения. Под влиянием ферментов, освобождающихся при гибели разных видов клеток ретикулоэндотелиальной системы, происходят фагоцитоз и цитолиз разрушенных клеток крови и местной ткани. Одновременно с этим в концах отломков развивается травматический остит. Под влиянием остеокластов и их фермента кислой фосфатазы, а также местного ацидоза (рН достигает 5 - 5,4) происходит деминерализация концов отломков по линии излома. Таким образом, зона перелома подготавливается к регенерации, которая начинается уже через 48 - 72 ч. после перелома [2, 10, 11].

Вторая фаза начинается на третьи сутки процесса. Она характеризуется образованием соединительнотканной мозоли. Первоначальное развитие остеонной ткани происходит в клеточных элементах надкостницы, эндоста и костного мозга на некотором расстоянии от линии излома, где они не пострадали от травмы и сохранили свою жизнеспособность. Это развитие идет от периферии к центру противоположных концов отломков. Вместе с этим остеогенные клетки камбиального слоя надкостницы, костного мозга и эндоста проникают в кровяной сгусток зоны перелома. Постепенно размножаясь, они прорастают густой сетью кровеносных капилляров. В результате вокруг отломков развивается своеобразная грануляционная ткань, которая представляет собой соединительнотканную мозоль. Клеточные элементы превращаются путем дифференциации в остеобласты и костные клетки, а межклеточное вещество и коллагеновые волокна – в основную субстанцию.

Вся васкулярная система каждого отломка вскоре после перелома увеличивается. Репаративные клетки с помощью медиаторных протеинов превращаются в хондробласты, которые синтезируют коллаген. Коллаген третьего типа образуется фибробластами в течение первой недели и присутствует в большом количестве во время воспалительной фазы. В течение репаративной фазы хондробласты образуют коллаген первого типа и коллаген специфического второго типа, который преобладает в поврежденном очаге в конце второй недели после травмы. Коллаген, преобладающий в конце третьей недели, является коллагеном первого типа, синтезирующимся остеобластами.

В костеобразующих элементах (в клетках камбиального слоя надкостницы, эндоста, стенках гаверсовых каналов и внутрикостных сосудов, в костных полостях и канальцах) поврежденной кости и тканях формирующейся мозоли

резко возрастает интенсивность белкового и фосфорно-кальциевого обменов, а также активность ферментов трансаминаз и щелочной фосфатазы, участвующих в биосинтезе белков (мукополисахаридов, коллагена) и минерализации костной мозоли. Количество мукополисахаридов и микроэлементов (меди, кобальта, алюминия, магния, марганца, цинка и др.) достигает максимальных величин.

Накопление микроэлементов в зоне перелома обеспечивает образование клеточных элементов регенерата, так как они входят в состав ферментов и активизируют окислительно-восстановительные процессы. Мукополисахариды участвуют в процессе минерализации формирующейся мозоли, они

избирательно связывают ионы Ca^{2+} и PO_4^{3-} , образуя кристаллы гидроксиапатита. В дальнейшем минеральный компонент взаимодействует с коллагеном.

В сыворотке крови значительно повышаются биосинтез и скорость распада альфа-, бета-, и гамма-глобулинов, возрастают содержание фосфора и кальция, активность щелочной фосфатазы и комплексообразующие свойства белков с фосфорно-кальциевыми солями [1, 2, 10].

Третья фаза начинается на 10 - 12 сутки и характеризуется окостенением мозоли. Процесс превращения хряща в кость подобен эндохондральной оссификации растущей кости. Так как коллаген первого типа созревает, хондроциты выделяют в матрикс пустые везикулы. Аккумуляция кальция и фосфора в везикулах межклеточного вещества ведет к образованию кристаллов гидроксиапатита, которые разрывают везикулярные мембраны и способны в конечном итоге к минерализации кости.

Фиброзная и хрящевая мозоли, образованные в течение первых трех недель, называются мягкими мозолями; минерализированная мозоль носит название твердой. Переход мягкой мозоли в твердую зависит от кровоснабжения и стабилизации отломка перелома. Нестабильные переломы с недостаточным кровоснабжением ведут к образованию фиброзной ткани в щели перелома. Нестабильный перелом с адекватным кровоснабжением прогрессирует в хрящевую мозоль; в конечном итоге может образоваться гипертрофический ложный сустав – псевдоартроз. При стабильном переломе с хорошим кровоснабжением образуется минерализованная мозоль.

Важную роль в процессе оссификации мозоли играют остеобласты, которые вырабатывают ферменты, щелочную фосфатазу и угольную кислоту. Активность щелочной фосфатазы в эту фазу поднимается максимально; она участвует в синтезе внеклеточной матрицы и мукополисахаридов, в образовании белков, способствует отложению минеральных солей и связыванию их альбуминоидами остеонной ткани. Угольная кислота влияет на выделение из крови двойной соли – карбонатфосфаткальция [1, 2, 9].

Четвертая фаза – окончательная перестройка костной мозоли. В эту фазу происходит так называемое обратное развитие мозоли с перегруппировкой костных балок согласно законам статики и динамики. Данный процесс продолжается длительное время. При правильном соотношении отломков он заканчивается быстрее, чем при смещенных отломках. Костные балки мозоли,

не функционирующие в статико-динамической нагрузке, рассасываются, а испытывающие давление укрепляются. Со временем место бывшего перелома по своей архитектонике приближается к нормальной кости. Местные биохимические изменения окончательно нормализуются лишь через 5 - 8 месяцев с момента клинического выздоровления животного.

Клеточный модуль, который контролирует процесс перестройки, является единицей резорбции, состоящей из остеокластов, которые сначала резорбируют кость, и остеобластов, которые потом строят новые гаверсовы системы. Если кость не приобретает свою оригинальную форму после этой перестройки, то значит, она изменилась и адаптировалась для лучшего выполнения своих функций [1, 2, 10].

Сращение отломков наступает у лошадей к 25 - 45-м суткам, а у крупного рогатого скота, овец и свиней – к 25 - 35-м суткам [2, 12]. Скорость восстановления кости при переломах зависит от многих факторов.

Причины задержки заживления переломов можно разделить на общие и местные. Из общих причин следует указать истощение животного, инфекционные заболевания, рахит, остеопороз, авитаминозы, беременность, расстройства функций щитовидной и паращитовидной желез. Из местных причин отрицательно влияют на консолидацию отломков значительное расхождение их, попадание мягких тканей между отломками, обширные разрушения кровеносных сосудов надкостницы и костного мозга, проникновение синовиальной жидкости в щель между отломками (при внутрисуставных переломах), плохая иммобилизация отломков, гнойный остит и остеомиелит.

При замедленном формировании костной мозоли необходимо устранить причины, задерживающие заживление перелома, и назначить средства общего и местного воздействия, активизирующие развитие остеонной ткани и ее обызвествление.

К средствам общего воздействия относятся: рациональное кормление, введение аскорбиновой кислоты, кальциферола, минеральных добавок, функциональная терапия (пассивные движения, проводка и дозированная работа). Кроме того, делают новокаиновую блокаду и тканевую терапию [13, 14]. Из средств местного воздействия показаны физические методы лечения – массаж, ультрафиолетовое облучение, ультразвук малой силы [15 - 17].

Ультразвук малой силы (0,05 - 0,2 Вт/см²) стимулирует процессы консолидации, а сильный (свыше 4 Вт/см²) может привести к их замедлению, вплоть до остановки. Стимулирующее влияние ультразвука на образование костной мозоли объясняется тем, что микромассаж клеток и тканей ультразвуком приводит к смещению в них атомов молекул, вызывает своеобразное встряхивание составных частей цитоплазмы, причем происходит и не свойственный обычным условиям контакт между субстанциями клетки. Это определяет повышение интенсивности ферментативных процессов обмена.

С целью снятия ретракции мышц и болевой реакции, нормализации белково-минерального обмена, стимуляции регенерации костной ткани

заслуживает внимания введение в костномозговой канал спиртоновокаинового раствора (2 %-ный раствор новокаина на 30 %-ном этиловом спирте) в первый день после травмы и через 5 - 6 дней повторно в зону перелома.

Как стимуляторы регенерации костной ткани хорошо действуют гормоны паращитовидной железы, стероидные, а также облучение гелий-неоновым лазером. Паратирогормоны направлены действуют на клеточные элементы костной ткани. Они влияют на трансформацию остеобластов, усиливают синтез специфических белков, РНК и щелочной фосфатазы. Стероидные гормоны нормализуют обменные процессы при травме, уменьшают некробиоз, повышают синтез мукополисахаридов, усиливают минерализацию мозоли. Регенерация костной ткани после облучения гелий-неоновым лазером с длиной волны 6328

и выходной мощностью 12 мВт приводит к более раннему образованию костной мозоли, причем с увеличением экспозиции от 1 до 10 мин. стимулирующий эффект соответственно повышается.

Для ускорения заживления можно применять электростимуляцию, которая создает условия для интенсивного образования костной ткани [2, 14, 15].

К заболеванию костей также относятся периоститы, оститы, некроз, кариес и остеомиелит.

Периоститы (Periostitis) – воспаление надкостницы. Принято различать периоститы: а) по этиологическим признакам – травматические, воспалительные (при переходе воспалительного процесса с мягких тканей, прилегающих к кости) и токсические; б) по клиническому течению – острые и хронические; в) по патологоанатомическим изменениям – серозные, гнойные, фиброзные и оссифицирующие; г) по степени распространения – ограниченные, диффузные и множественные.

Остро протекает серозный и гнойный периостит, а хронически – фиброзный, оссифицирующие периоститы и токсический оссифицирующий остеопериостоз [1, 2, 4].

Серозный периостит (Periostitis serosa) чаще всего встречается на костях, слабо защищенных мягкими тканями (пясть, плюсна, путовая, венечная и др.). Основные причины развития серозных периоститов – однократные закрытые механические повреждения надкостницы (ушибы, надрывы и разрывы связок в местах их прикрепления, повреждения костей и др.).

Гнойный периостит (Periostitis purulenta) возникает при условии развития гноеродной, чаще стафилококковой инфекции, которая может проникнуть в надкостницу при открытых переломах, переходе гнойных воспалительных процессов из окружающих тканей и гематогенным путем.

Лечение гнойного периостита предусматривается комплексным. В начальный период развития гнойного периостита в целях подавления инфекции местно целесообразно сделать короткую новокаиновую блокаду с антибиотиками вплоть до кости в сочетании со спиртовыми высыхающими повязками, внутрикостные и внутриаартериальные инъекции антибиотиков, а также общую

антибиотикотерапию.

Образующиеся гнойники необходимо немедленно вскрывать и дренировать с гипертоническими растворами средних солей и сульфаниламидными препаратами. При наличии секвестров целесообразно по исчезновении острых воспалительных явлений сделать операцию. Полость пораженной кости тщательно обрабатывают чистым спиртом или спиртоэфиром и присыпают тонкими пудрами сложных антисептических порошков, а затем накладывают углегипсовую повязку [1, 2].

Оссифицирующий периостит (*Periostitis ossificans*) характеризуется разрастанием костной ткани со стороны воспалившейся надкостницы. Болезнь сопровождается воспалением как внутреннего, так и наружного слоя надкостницы, поэтому обычно протекает с наличием фиброзного периостита.

Болезнь возникает в результате механических повреждений, вызывающих воспаление не только наружного, но и внутреннего слоя надкостницы (ушибов, переломов и трещин костей), дисторзии суставов, сопровождающейся надрывом связок в местах их прикрепления, и т.п., а также перехода воспалительных процессов на надкостницу с окружающих тканей (абсцессы, флегмоны, язвы и т.д.).

При лечении оссифицирующего периостита местно назначают парафиновые или озокеритовые аппликации, втирание раздражающих мазей из красной двуйодной ртути, инъецируют подкожно в пораженные участки (экзостозы) спиртовой раствор йода или сулемы. Рогатому скоту в начальной стадии оссифицирующего периостита нужно втирать 1 раз в 2 дня мазь из двуххромовокислого калия. При экзостозах применяют проникающие прижигания и указанные выше мази.

В некоторых трудноизлечимых случаях показана невректомия, или периостомия, – рассечение надкостницы над экзостозом. Возможно оперативное удаление поверхностно расположенных диафизарных экзостозов. Хороший лечебный эффект дает облучение ультрафиолетовыми лучами и в некоторых случаях лазером [1, 2, 6, 7].

К болезням кости относится и остит (*Ostitis*). В чистом виде встречается очень редко, обычно в процесс вовлекаются почти все элементы кости – надкостница, кость, эндост и костный мозг.

По клиническому течению различают острые и хронические, по характеру экссудата – асептические и гнойные, а по патоморфологическим изменениям – разрежающие и конденсирующие оститы. Однако два последних не являются самостоятельными процессами. Они представляют только две стадии одного и того же асептического остита, следующие одна за другой: стадию дегенерации (разрежения) и стадию регенерации (конденсирования).

Наиболее частые причины асептического остита – ушибы и удары костей, слабо защищенных мягкими тканями (плюсна, пясть, путовые кости и др.), а также переход воспалительных процессов с соседних тканей.

При лечении остита животному предоставляют покой. Ссадины, царапины в зоне повреждения смазывают раствором йода, а затем в целях

уменьшения экссудативной реакции назначают в течение первых суток сухой холод с давящей повязкой и короткую новокаиновую блокаду с антибиотиками. После исчезновения острых воспалительных явлений для быстрейшего рассасывания экссудата применяют тепловые процедуры в виде согревающих компрессов. При наличии конденсирующего остита рекомендуют парафино и озокерито терапии [1, 2, 5].

Некроз кости (Necrosis ossis) может быть следствием гнойных воспалительных процессов, локализующихся в различных слоях костной ткани (гнойный периостит, остит, остеомиелит), всевозможных механических травм (ушибы, сотрясения, открытые переломы костей), физических (отморожение, ожоги) и химических воздействий (отравление спорыньей и др.), которые приводят к тромбозу или нарушению питающих кость сосудов либо непосредственно воздействуют на костную ткань.

В зависимости от степени поражения различают некроз полный, или общий, когда омертвевает вся кость или обширная ее часть, и неполный, или частичный, если поражается какой-либо участок кости; по локализации – поверхностный, или кортикальный, когда некротизируется наружная поверхность кости, и центральный, или глубокий, если омертвевают глубокие слои кости [2, 8, 9].

Лечение некроза кости и воспалений костного мозга – остеомиелита является довольно трудной задачей. В острых случаях гнойного остеомиелита из общих мероприятий больному животному назначают полный покой, обильную подстилку, богатый витаминами рацион. В целях предупреждения развития сепсиса, ограничения остеомиелитического процесса и поднятия защитных иммунобиологических реакций применяют антибиотики в сочетании с сульфаниламидами, камфорную жидкость Кадыкова, новокаиновую блокаду, переливание крови.

Местно на ранних стадиях остеомиелитического процесса рекомендуют внутрикостное введение антибиотиков на новокаине с целью оборвать дальнейшее его развитие. В запущенных случаях также назначают внутрикостное введение антибиотиков в период предоперационной подготовки, чтобы подавить инфекцию и облегчить послеоперационное лечение. При хроническом остеомиелите лечение должно быть оперативным и сочетаться с антибиотиками и сульфаниламидными препаратами. Из физических методов лечения при подостро и хронически протекающем асептическом остеомиелите назначают ультрафиолетовое облучение в эритемных дозах, озокерито- и парафинолечение. Назначают также облучение лазером [2, 8, 14].

Проведенный анализ литературных источников показывает, что лечение костной патологии включает хирургическую обработку с последующей антибиотикотерапией в сочетании с короткой новокаиновой блокадой. При этом обязательно общее лечение с применением антибиотиков и сульфаниламидных препаратов. При осложненной костной болезни применяют упругие колебания и излучения оптического диапазона (ультрафиолетовые лучи, лазерное излучение). Однако следует отметить, что в литературе нет строгих научных

объяснений действия этих физических факторов на костную ткань при лечении костной патологии.

1.2. Применение электромагнитных излучений для интенсификации восстановительного процесса

Биологические исследования, проводимые на различных уровнях организации материи, показали, что организмы самых различных видов чувствительны к низкоэнергетическим (информационным) электромагнитным излучениям сверхвысокой частоты [18, 19].

Информационное ЭМП не оказывает сколько-нибудь существенного энергетического воздействия на ткани – ни нагрева, ни радиационного разрушения, поэтому его действенность может определяться только мобилизацией сил и высвобождением энергетических резервов самого организма.

Исследования, проведенные на животных, позволяют сделать вывод о том, что ЭМП оказывают стимулирующее действие на функции кроветворения и состав крови [20, 21]. Электромагнитное излучение вызывает биохимические изменения, как у животных, так и у людей, которые заключаются в изменении содержания белка и белковых фракций, в увеличении в крови холестерина, гистамина, меди, в снижении калия [22, 23]. Экспериментальные данные показывают, что электромагнитные излучения способствуют повышению резистивности эритроцитов к влиянию низких температур, а предварительное облучение снижает эффект действия рентгеновского излучения [24, 25].

Замечено, что волны высокой частоты (свыше 1000 МГц) стимулируют рост клеток, их деление, способствуют быстрому заживлению ран, повышают восстановительную способность поврежденных тканей [26].

В США получил признание тот факт, что облучение модулированной высокочастотной энергией с низкой плотностью мощности может влиять на деятельность организма высших животных (млекопитающих) [27].

Электромагнитная энергия в коротковолновом (27 МГц) или СВЧ (2450 МГц) диапазонах может приводить к нагреву глубоких тканей, а также стимулировать некоторые заболевания [28].

За последние годы накопился большой экспериментальный и клинический материал по электрофизическим методам лечения сельскохозяйственных животных и птиц.

Подтверждена положительная роль облучения волнами миллиметрового (ММ) диапазона при лечении злокачественных опухолей, регенерации мягких и костных тканей.

Установлено, что облучение волнами ММ-диапазона позволяет реализовать потенциальные возможности организма [29]. Экспериментально были разработаны дозировки воздействия СВЧ поля при заболевании пищеварительного аппарата у кур. Эти данные использовались с целью повышения продуктивности кур, повышения яйценоскости и качества яиц.

Подобные исследования были проведены на овцах. В этих исследованиях было показано, что высокочастотные поля обладают высокой терапевтической активностью при лечении бронхопневмонии, серозных и гнойных плевритов у овец и в определенных дозах могут применяться для повышения продуктивности животных [30].

Было отмечено изменение всасывательной и секреторной деятельности желудка и кишечника при экспериментальном гастрите и энтерите и восстановление этих функций при воздействии на организм высокочастотными физическими агентами (ультразвук, УВЧ, СВЧ) [32].

В диапазоне около 10 ГГц облучение приводит к пробуждению спящего или подвергнутого действию наркоза животного и увеличению бодрости проснувшегося животного [32]. СВЧ облучение головы животного, подвергнутого наркозу с помощью нембутала, пробуждало его от хирургически эффективного действия наркоза. Подобная реакция наводила на мысль, что определенные комбинации частоты, модуляции и плотности могут оказывать вредное или положительное воздействие на организм. При облучении свиноматок одновременно ультрафиолетовыми (УФ) лучами с длиной волны

см и инфракрасными (ИК) лучами с длиной волны см наблюдается лучшее развитие плода в эмбриональный период. Молодняк, полученный от облученных свиноматок, обладает повышенной устойчивостью к заболеваниям. Ультрафиолетовое облучение свиноматок улучшает оплодотворяемость, способствует повышению плодовитости и молочности маток, способствует рождению поросят с большим живым весом. Приплод от облученных свиноматок отличается лучшим ростом, развитием и лучшей сохраняемостью [33].

У животных облучение лазером спонтанных переломов трубчатых костей, подвергнутых остеосинтезу, ускоряет образование костной мозоли, сокращает сроки ее консолидации.

Опыт лечения лазером параплегии тазовых конечностей травматической этиологии у мелких животных показал, что в результате облучения области позвоночника на месте травмы наступает обезболивающий эффект и восстановление функции тазовых конечностей [33].

Использование ультрафиолетового облучения для повышения продуктивности различных видов и пород сельскохозяйственных животных является одним из важнейших дополнительных резервов. Живая масса облучаемых телят была на 7 - 8 % выше по сравнению с контрольными животными [33].

Разработанные методы очистки и дезинфекции воздуха в птицеводческих помещениях бактерицидным УФ-излучением и фильтрами позволяют увеличить среднесуточные привесы молодняка птиц на 8 - 10 %, а яйценоскость кур-несушек на 10 - 12 штук яиц в год [33].

При УФ-облучении кроликов от них получено на 10 - 12 % больше молодняка, чем от контроля. Облученные кролики отличаются высокой жизнеспособностью и более интенсивным ростом [33].

Изучение действия СВЧ излучения на различные биологические системы позволило установить, что биологическое действие этого вида излучения основано на резонансном характере воздействия и избирательно для различных биологических систем [34]. Также установлено [34], что для получения биологического эффекта требуется небольшая интенсивность воздействия: для бактериальных систем 0,05 мВт/см², для животных 9 мВт/см², которая практически не изменяет температуру объекта.

В медицине микроволновое излучение применяют при лечении язв желудка и двенадцатиперстной кишки, трофических язв, травм, стенокардии, некоторых онкологических и других заболеваний [35, 36].

В работе [37] отмечено, что электромагнитные излучения соответствующей частоты могут активно влиять на больной организм до его выздоровления. Данные многочисленных исследований позволили предположить, что характер реакции биологических объектов зависит не только от величины электромагнитной энергии, но и от модуляционно-временных параметров ЭМП. Подбирая параметры электромагнитного излучения для лечения болезней животных, можно добиться благоприятного влияния на ход лечения при многих болезнях, с которыми данный вид организмов может бороться. Воздействие электромагнитных излучений усиливает и ускоряет борьбу с заболеванием, мобилизуя для этого собственные возможности организма в той мере, в которой возраст и различные факторы, нарушающие нормализацию жизнедеятельности, не исчерпали его резервов [38].

Доказано, что зависимость метаболических процессов в биологическом объекте от действия низкоэнергетических электромагнитных излучений связана с наличием информационных процессов на основе ЭМП [39 - 41]. Проникая в организм животного, эти излучения при определенных параметрах (частота, мощность, экспозиция, модуляция) трансформируются в информационные сигналы, осуществляющие управление восстановительными процессами в нем [39, 40].

Новейшие исследования подтверждают положения и об электромагнитной основе передачи генной информации [42]. Есть все основания полагать, что взаимодействие ЭМП с биообъектами связано с механизмом переключения генной активности, который является важнейшим в процессе жизнедеятельности. Любые клетки одного и того же биологического объекта содержат одинаковый набор фрагментов ДНК, а функционально морфологическое разнообразие клеток биологического объекта объясняется тем, что в разных клетках включены (активированы) или выключены (репрессированы) разные гены. Активизация генов происходит под воздействием сигналов из цитоплазмы и из клеточного окружения. Этот сигнал имеет электромагнитную природу [43].

В ветеринарной практике для лечения животных использовалось электромагнитное излучение с экспозицией 30 - 60 мин. один раз в сутки; курс лечения 10 - 20 сеансов [44]. Лечение проводили воздействием

электромагнитным излучением контактно на патологический очаг или через центральную нервную систему при приложении КВЧ-излучателя в области между 3 - 4-м грудными или поясничными позвонками при его нахождении соответственно в области плечевого пояса или тазовой области и тазовых конечностей. Исследования проводили на лошадях и крупном рогатом скоте. В коневодстве положительные результаты получены при лечении миозитов, артритов, энтероколитов, эмфиземы и переутомлениях, связанных с большой физической нагрузкой [44]. Так, например, жеребец в возрасте 2 года болел хроническим артритом копытного сустава левой грудной конечности. Лошадь хромила в течение одного года, несмотря на то, что применяли внутрисуставные инъекции кортикостероидов и антибиотиков, а также внутривенно вводили препараты фенол-бутазолидонового ряда. После 10 сеансов электромагнитной терапии в области холки хромота исчезла.

Жеребец в возрасте 5 лет поступил с диагнозом эмфизема легких. У него наблюдали кашель, хрипы, жесткое, напряженное дыхание, учащенный пульс, сильное утомление, отказ от работы. После проведения КВЧ-терапии (10 сеансов по 30 мин.) симптомы, характерные для эмфиземы легких, исчезли, появился аппетит, повысился общий тонус, жеребца можно было использовать в работе.

Применение электромагнитной терапии позволило вылечить лошадь, у которой был острый миозит поясничной области, проявлявшийся сильной болезненностью. Внутримышечные инъекции кортикостероидов, аутоотрансфузия крови с 0,5 %-ным раствором новокаина, массаж в течение 1,5 мес. не дали положительных результатов. После применения КВЧ-терапии (10 сеансов по обычной методике) лошадь выздоровела и вернулась к тренировкам.

В Хреновском заводе Воронежской области лечили 8 телят айрширской породы в возрасте 3 - 4 мес., больных бронхопневмонией. Диагноз был поставлен на основании клинических признаков: кашель, повышенная температура, угнетенное общее состояние, временами отказ от корма. При аускультации легких прослушивались сухие и влажные хрипы. Длительность заболевания колебалась от 5 до 10 суток. У 7 телят было состояние средней тяжести, у одного – очень тяжелое.

В первые 3 дня лечение продолжалось 40 мин., в последующие – 30 мин. Другие методы терапии не применялись. После 6 сеансов у всех животных значительно улучшилось общее состояние: прекратился кашель, исчезла одышка, нормализовалась температура, повысился аппетит. Через 8 сеансов клиническое выздоровление наступило у 7 телят.

В Московской области было проведено испытание СВЧ излучения на 7 телятах с признаками бронхопневмонии: повышение температуры тела, угнетенное состояние, плохой аппетит, учащенное дыхание, при аускультации – влажные хрипы.

После 10 сеансов лечения у 4 телят температура нормализовалась, появились аппетит, подвижность, исчезли хрипы. У остальных 3 телят после курса лечения общее клиническое состояние улучшилось, однако сохранились

хрипы и учащенное везикулярное дыхание [44].

В работе [44] также приведены данные о лечении домашних животных, собак и кошек, электромагнитным излучением крайне высоких частот. Лечение этих животных электромагнитным излучением проводили при ушибах, растяжении связок и мышц, костно-суставной недостаточности, отитах и гастроэнтеритах. Лечение медикаментозными способами ощутимых результатов не давало. После 8 - 10 процедур лечения животных электромагнитным излучением с экспозицией 30 мин. наступало или полное выздоровление или улучшенное состояние.

Электромагнитное излучение СВЧ и КВЧ диапазонов применяют и для лечения мастита у коров. Высокий уровень механизации молочно-товарных ферм значительно повышает производительность труда и снижает себестоимость молока, но наряду с этим возрастает количество заболеваний коров маститом. По опубликованным данным [45], корова, пораженная маститом, теряет до 15 % годовой молочной продукции, зачастую корова выбраковывается. Молоко от коров, пораженных маститом, представляет серьезную угрозу здоровью людей. Для лечения мастита у коров используют большое количество антибиотиков. Последние, выделяясь с молоком, отрицательно влияют на его качество. Антибиотики с молоком и мясом поступают в организм человека и приводят к появлению у него устойчивых рас микробов. В ряде стран (США, Англия, Германия) введен с 1971 г. закон об ограничении применения антибиотиков для лечения маститов [46].

Как показывает опыт (ГНПП "Исток", г. Фрязино; ВНИИ ветеринарной санитарии, гигиены и экологии РАН), лечение мастита у коров электромагнитным излучением приводит к положительным результатам. При лечении мастита электромагнитная терапия проводилась в течение 30 мин. ежедневно. После 10 сеансов были вылечены до 60 % коров с легкой формой заболевания, а у остальных наблюдалось улучшенное состояние. Столь незначительный эффект лечения мастита у коров электромагнитным излучением связан с тем, что воздействие проводилось с неоптимальными параметрами ЭМП для данного биологического объекта.

Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о том, что в ветеринарной практике электромагнитная терапия является новым методом, который принципиально и выгодно отличается от существовавших ранее физиотерапевтических процедур. В ряде случаев она заменяет медикаментозный и даже хирургический методы лечения. Кроме того, электромагнитная терапия является высокорентабельной, так как при высоких ценах на медикаменты она окупается при излечении нескольких десятков животных. И что особенно важно, многие лекарственные препараты обладают кумулятивными свойствами, накапливаются в тканях и органах животного, а электромагнитная терапия позволяет получить экологически чистые продукты питания: молоко, мясо.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для получения полезных изменений в биообъекте необходимо находить такую структуру

внешнего ЭМП (частота, мощность, экспозиция, поляризация), которая привела бы к желаемому эффекту, например, лечению животных, увеличению объема и качества тканевых структур в ветеринарии. Применение низкоэнергетических излучений в животноводстве связано с наименьшими затратами энергии при наивысшем влиянии на информационные процессы жизнедеятельности биообъектов, так как основой жизни являются обмены веществ, энергии и информации [47].

Эффективное лечение болезней животных следует ожидать от действия ЭМП дециметрового диапазона, поскольку они обладают большей проникающей способностью, чем волны других диапазонов. Воздействием ЭМП СВЧ диапазона можно получить хороший лечебный эффект при наличии резко воспалившихся ран, плохо заживающих язв, травматического отека, экземы, костных патологий, заболеваний кожи и слизистых оболочек. Локальным воздействием электромагнитного излучения СВЧ диапазона на патологический очаг излучения можно улучшить крово- и лимфообращение, повысить тканевую трофику, провести быструю эвакуацию патологических продуктов [30, 32].

Однако следует отметить, что эффективное использование низкоэнергетических ЭМП дециметрового диапазона для лечения животных невозможно без разработки физико-математических моделей, учитывающих параметры воздействия ЭМП и электрофизические параметры сельскохозяйственных объектов [48].

1.3. Анализ биофизического действия электромагнитных излучений СВЧ диапазона

В качестве одного из основных механизмов действия СВЧ излучения на клеточном уровне является концепция ведущей роли биологических мембран в реакциях биосистем на микроволновое облучение [11, 20, 49].

Выбор нами биологических мембран в качестве предмета исследования обусловлен, во-первых, их повсеместностью и решающей ролью в жизнедеятельности отдельных клеток и организма в целом; во-вторых, их первоочередностью к воздействиям внешних физических факторов. Поэтому поиски первичных механизмов воздействий низкоэнергетических электромагнитных полей на клетку должны идти параллельно с изучением молекулярных принципов строения и функционирования мембран. Причем выясняемые специфические механизмы воздействий низкоэнергетических ЭМП могут определять соответствующие электрические и магнитные свойства мембранных молекул и процессов с их участием.

Свойства мембран определяются их молекулярной организацией. Поверхностные слои мембраны образованы полярными головками липидов, молекулами белков, гидратированной водой и адсорбированным мембраной слоем минеральных ионов. По своим диэлектрическим свойствам наружный и внутренний слои мембраны приближаются к свойствам гидратированного

белка. Соответственно в наружном и внутреннем слоях мембраны прямое поглощение СВЧ энергии должно быть не менее чем в 4 раза больше по сравнению с электролитической средой [49, 50].

Действие низкоэнергетических излучений влечет за собой перераспределение электрических сил, участвующих в функционировании мембраны. В результате меняется степень связывания Ca^{2+} , Mg^{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) [49, 50].

Электрические явления, происходящие в биомембранах, играют исключительно важную роль. Образование трансмембранной разности потенциалов обусловлено избирательной ионной проводимостью мембран, являющихся, в целом, отличным диэлектриком. Так, биослой электроизолирующих липидных молекул способны выдерживать большие значения напряженности электрического поля. Величина электрического потенциала на мембране чрезвычайно важна. По современной теории трансмембранного транспорта [49] именно электрическое поле 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 и некоторыми другими [49 - 52].

Рассматривая всю совокупность мембранных биоэлектрических явлений, можно выделить некоторые электрические структурно-функциональные свойства биомембран, которые в настоящее время недостаточно изучены. Одно из них – индуцируемые изменяющимся трансмембранным электрическим полем структурные перестройки мембран, в частности, ионопроводящих комплексов и их липидного окружения, имеющие первостепенное значение в проблеме выяснения физических механизмов управления трансмембранным ионным транспортом. Здесь же интересен вопрос электрозависимости переноса ионов через мембрану, поскольку еще не найдено строгое объяснение участкам в вольтамперных характеристиках мембран, отвечающим отрицательному электрическому сопротивлению. Кроме того, важным, но совершенно не изученным аспектом в исследовании электрических свойств мембран является выяснение роли наведенного электрического потенциала на устойчивость мембран под действием низкоэнергетического электромагнитного излучения СВЧ диапазона [50].

Теоретический и экспериментальный материал по проблеме биологического действия электромагнитного излучения свидетельствует, что информационное действие СВЧ излучения должно иметь резонансный характер [53, 54]. Биологические макромолекулы и надмолекулярные системы имеют

некоторые собственные частоты колебаний, лежащие в диапазоне СВЧ. Так, в биомембранах полярные головки фосфолипидов совершают вращательное движение с частотой 109 Гц, а характеристическая частота связанной воды лежит в области 108 - 109 Гц. В области 1010 - 1011 Гц расположены

характеристические частоты , и других групп, играющих важную роль в функционировании белковых молекул. Кинетика элементарных актов ферментативного катализа характеризуется следующими временами: взаимное узнавание фермента и субстрата, образование фермент-субстратного комплекса – 10-8 - 10-9 с; локальные микрохимические изменения в активном центре – 10-10 - 10-11 с.; конформационная релаксация в фермент-субстратном комплексе 10-3 - 10-7с. [50, 53]. Следовательно, в биологическом объекте резонансное поглощение энергии СВЧ излучения возможно в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн.

Зависимость чувствительности биосистем к внешнему полю связана с наличием информационного взаимодействия электромагнитных излучений с живыми организмами. Предполагается, что в основе информационного влияния электромагнитного излучения лежит синхронизация в СВЧ поле колебаний

осцилляторов с собственными частотами Гц. При синхронизации внешнее ЭМП меняет спектральные характеристики этих осцилляторов. Синхронизация может сопровождаться фазировкой колебаний автогенераторов, при которых фазы колебаний автогенераторов совпадают с фазой внешнего поля в данном объеме биологического объекта. Как следует из работ [54 - 57], синфазные колебания способны вызвать конформационные перестройки клеточных структур, влиять на проницаемость мембран и служить информационным сигналом для регуляторных систем всего объекта.

Что касается порогового значения энергии, то ее численные оценки для реальных биологических систем зависят от конкретных молекулярных механизмов воздействия внешнего поля с клеточными осцилляторами, модуляционно-временных параметров ЭМП, уровня шумов в биологической системе и должны превышать уровень слабых нековалентных связей в макромолекуле: ионных взаимодействий, водородных связей и вандерваальсовых взаимодействий. С помощью этих связей реализуется информация, заключенная в последовательности макромолекулярных цепей. Практические уровни энергии для лечения костной патологии животных должны лежать в интервале от единиц мВт/см² до десятков единиц мВт/см².

Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в исследованиях по воздействию низкоэнергетических ЭМП на биологические объекты, многие первичные молекулярные механизмы этих воздействий практически не вскрыты. Такое положение приводит к появлению в литературе большого числа гипотетических механизмов воздействия электромагнитных полей, которые часто физически не обоснованы. Все это, на наш взгляд, объясняется, с одной стороны, недостаточностью чисто физического подхода к живой материи, а с другой – тем, что затруднено, а иногда и невозможно успешное нахождение

адекватной простой модели тех или иных процессов, происходящих в биологических структурах. Знание же первичных, физически обоснованных механизмов воздействия низкоэнергетических ЭМП на биообъекты, а также закономерностей взаимосвязи молекулярного и системного уровней, позволит объяснить фазонаправленность биоэлектромагнитных эффектов и даст возможность прогнозировать их возникновение, что особенно важно в сельскохозяйственном производстве для лечения животных.

1.4. Обоснование требований к источникам СВЧ излучения для информационного влияния на биологические объекты

Поскольку влияние внешних СВЧ излучений на организм животных связано с тем, что на определенных резонансных частотах поступающие извне сигналы имитируют сигналы управления, генерируемые в целях сохранения гомеостаза самим организмом, в [58 - 60] достаточно подробно рассмотрен вопрос о диапазоне частот сигналов управления, от которого зависит эффективность использования ее "системы управления". Электрическая длина резонансной системы определяет количество сигналов, которые могут быть возбуждены в системе. Таким образом, для обеспечения различных сигналов управления длины возбуждаемых волн должны быть очень малыми по сравнению с геометрической длиной. Там же указано, что "возможная" степень сокращения длины волны (увеличение частоты колебаний) ограничивается величиной энергии кванта $h\nu$, достаточной для эффективного разрушения биологических связей.

В коротковолновой области излучения ($\lambda < 10^3$ м) доминируют квантовые шумы, связанные с дискретной природой излучения; уверенная передача определенного объема информации [19] требует, чтобы соответствующий сигнал формировался числом квантов, превышающим некоторый минимальный для этого объема информации уровень. Минимальная энергия сигнала, определяемая числом квантов, увеличивается с возрастанием частоты ν , а отношение объема информации к энергетическим затратам снижается пропорционально $1/\nu$. Указано [53], что для живых организмов с их ограниченными энергетическими ресурсами минимизация затрат последних, определяемая использованием ММ диапазона и ближайших к нему более коротковолновых диапазонов, достаточно существенны. Приведенные в [53] экспериментальные данные показали, что резонансное действие СВЧ излучения на клетки, связано с возбуждением акустоэлектрических волн в замкнутых клеточных мембранах. В [61, 62] произведена оценка скорости распространения акустических волн в мембране, которая составляет ~ 400 м/с. Используя эти данные в [19] получено соотношение

связывающее отношение резонансных частот к смещению между центрами соседних резонансных частот с обратным отношением числа длин волн к периметру мембраны. Это соотношение позволило [19] оценить добротность резонансов биологических мембран, которая составляет $\sim 10^3 \dots 10^5$. Клеточные мембраны поляризованы [62], и при нормальном функционировании клетки напряженность электрического поля в мембране перпендикулярно ее поверхности составляет $\sim 10^3$ В/см, поэтому при распространении акустических волн, вызывающих периодическое изменение толщины мембраны, в поляризованной мембране появляется переменное электрическое поле, изменяющееся с частотой возбуждающих его акустических колебаний.

Необходимо отметить, что в отличие от электромагнитных волн, замедление которых в мембране было бы незначительным, длина акустоэлектрической волны в мембране в $\sim 10^6$ раз меньше длины волны в свободном пространстве, поэтому энергия электрического КВЧ поля в ходе колебаний в основном преобразуется не в энергию магнитного поля, а в энергию акустических КВЧ колебаний и обратно. Аналогией является преобразование энергии в некоторых низкочастотных параметрических системах, в которых колебания поддерживаются за счет преобразования механической энергии, затрачиваемой на увеличение расстояния между зарядами на обкладках конденсатора в энергию электрического поля. Разным резонансным частотам соответствует различное число стоячих волн на периметре мембраны. Поэтому с n изменяется и характер распределения КВЧ поля, как на поверхности мембраны, так и в прилежащем к ней внутри и внеклеточном пространстве, а, следовательно, и характер управляющего действия КВЧ поля. При большом, общем числе длин волн, укладывающихся по периметру мембраны, изменение этого числа на единицу, соответствующую соседним резонансам, вносит малое изменение в характер распределения поля. При этом характер управляющего действия, связанного с пространственной структурой поля, от одного резонанса к другому меняется постепенно. В то же время, управляющее действие внешних излучений может быть связано не только с пространственным распределением поля, но и с резонансными частотами тех или иных белковых молекул или внутриклеточных элементов. Эти последние изменения со структурой поля акустоэлектрических волн связаны слабее. В [61] показано, что поскольку различные мембранные системы буквально пронизывают всю клетку, акустоэлектрические волны, ответвляясь от резонирующей мембраны, могут проникать к любой области клетки, причем направление распространения и действия зависит от типа колебаний в резонирующей мембране и характера мембранной сети, изменяющей конфигурацию в различных условиях.

Проведенное краткое рассмотрение позволяет сделать однозначный вывод о резонансном характере взаимодействия электромагнитного поля с живыми организмами, оцениваемая добротность систем составляет $\sim 10^3 \dots 10^5$. Оценка добротности систем проводилась как теоретически, так и экспериментально, при этом собственная относительная нестабильность частоты, в основном, нестабилизированных генераторов СВЧ диапазона, с помощью которых производились исследования, составляла $\sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Опыт работы с такими источниками показывает, что наибольшие флуктуации несущей частоты происходят на частоте 50 Гц (частота сети). Здесь необходимо отметить, что даже при использовании медленного изменения частоты будет происходить также модуляция с частотой 50 Гц, т.е. на медленные изменения будут накладываться быстрые. Таким образом, доминировать будут быстрые изменения частоты, и время взаимодействия составит $\sim 2 \cdot (10^{-3} \dots 10^{-4})$ с. В [63] указано, что эффекты, наблюдаемые при некотором фиксированном времени воздействия СВЧ излучения, не критичны к плотности падающего потока энергии. Начиная с некоторой минимальной (

пороговой) плотности, составляющей для разных организмов Вт/см², последующее возрастание потока на несколько порядков при разовом воздействии на биологический объект, как правило, не влияет, а запоминание действия СВЧ излучения наступает в тех случаях, когда облучение длилось достаточно долго: от нескольких десятков минут до нескольких часов [63]. Сравнение приведенных оценочных расчетов с экспериментальными результатами показывает, что поскольку время взаимодействия за счет быстрых флуктуаций, а это основной доминирующий фактор, приводящий к изменению частоты генератора, составляет $\sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$ с, то для достаточно узкой линии фактическое время взаимодействия уменьшается на 6 - 7 порядков.

Таким образом, облучение биологических объектов необходимо производить ЭМП, в качестве источников которого используются стабильные и высокостабильные генераторы монохроматических колебаний СВЧ диапазона, позволяющие осуществить точную ($\sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$) настройку на контур линии биологического объекта, что обеспечит полную ($\sim 95\%$) передачу энергии облучения биологической структуре, существенно уменьшит время синхронизации и общее необходимое время воздействия на несколько порядков. Таким образом, наиболее правильное решение задачи более интенсивного использования СВЧ излучения в народном хозяйстве (медицине, биологии, сельском хозяйстве и т.д.) состоит в создании специализированных стабильных и высокостабильных источников колебаний с малой дискретностью перестройки частот ($\sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$) от ширины линии.

1.5. Анализ технических средств для восстановления тканей сельскохозяйственных животных. Постановка задач для исследования

Существенным тормозом при проведении экспериментальных исследований на сельскохозяйственных животных является и отсутствие

специализированной аппаратуры.

Современная электротехника позволяет использовать для лечебных целей самые разнообразные формы электрической энергии, обладающие способностью вызывать специфические физиологические реакции. Этим обеспечивается возможность подбора нужной формы электрического воздействия в соответствии с характером патологического процесса и его фазности.

По результатам анализа литературных источников, в табл. 1.1 представлены сравнительные характеристики приборов, применяемых в сельскохозяйственном производстве [64 - 67].

В соответствии с этими рекомендациями, ультрафиолетовое облучение проводят стационарной ртутно-кварцевой лампой с горелками ДОТ-200 или

ДОТ-400. Для электрофореза используют портативный аппарат для гальванизации. Густой волосяной покров выстригают. Максимально

допустимый ток 50 - 65 А при плотности тока А на м активного электрода.

Лампой № 6 "соллюкс" производят облучение вымени в течение 30 - 60 минут на расстоянии 60 - 80 сантиметров.

Для лечения ультразвуком применяют ветеринарный ультразвуковой терапевтический аппарат ВУТ-1 с интенсивностью Вт/м 2.

УВЧ-терапию мастита проводят с помощью аппарата доильного передвижного с УВЧ (ЛПДА-УВЧ-1) в процессе машинного доения. Электрическое поле УВЧ подают на пораженные доли вымени путем подсоединения через гибкий провод-фидер выхода генератора УВЧ с электродами, вмонтированными в межстенную камеру доильных стаканов.

Выходная мощность всех приведенных приборов (кроме медицинского прибора "Электроника МИРТА-02") составляет от десятков до сотен ватт и требует принятия специальных защитных мер для обслуживающего персонала. Этим же обусловлены и противопоказания при острых гнойных процессах, злокачественных образованиях, острых воспалительных процессах, болезнях сердца, отеках легких, так как это связано с возможностью всасывания гноя и возникновения септических явлений.[64].

Все эти приборы являются стационарными аппаратами, вес которых составляет от единиц до десятков килограмм. Требования техники безопасности по принятию защитных мер для обслуживающего персонала не позволяют пользоваться ими вне специально оборудованных помещений.

Появившийся в последние годы прибор "Электроника МИРТА-02" не требует специальных защитных мер для обслуживающего персонала, но также является довольно громоздким аппаратом, весящим 12,5 кг. Длина волны излучаемого сигнала, составляющая 12 см, и невысокая стабильность частоты выходного сигнала не позволяют использовать его для проведения экспериментальных исследований по лечению заболеваний животных.

Как известно [68, 69], в СВЧ диапазоне происходит сильное резонансное поглощение энергии. Ткани организма при таком возбуждении начинают работать в оптимальном режиме. Химические, физиологические и изменения в поведении, вызываемые слабыми полями, наблюдаются только в пределах частотных и энергетических окон. Это обуславливает высокие требования по стабильности частоты и степени подавления побочных дискретных составляющих. Анализ серийно выпускаемых генераторов СВЧ диапазона по таким параметрам, как нестабильность частоты, погрешность установки выходной частоты, диапазон перестройки показал, что они не могут быть использованы в биомагнитологии [70 - 75].

Генераторы, выпускаемые в России и Литве, могут работать в диапазоне частот 20...80 ГГц, но обладают высокой относительной нестабильностью выходной частоты (), высокой погрешностью установки несущей частоты (30...900 МГц), большой паразитной девиацией частоты (0,5...6 МГц), низкой монохроматичностью сигнала и малой выходной мощностью (4...5 мВт).

Генераторы, выпускаемые за рубежом, обладают меньшей нестабильностью (), большей точностью установки частоты, но малой выходной мощностью (до 5 мВт).

Проведенный обзор показал, что для создания электротехнологий, связанных с воздействием электромагнитных излучений на биологические объекты в лечебных целях, необходимы исследования по созданию высокостабильных источников СВЧ диапазона, отвечающих высоким требованиям по спектру выходных сигналов, диапазону перестройки частоты и мощности выходного сигнала.

Высокие требования к стабильности частоты, спектру выходных сигналов заставляют при разработке источников СВЧ колебаний обращать особое внимание на амплитудные и фазовые флуктуации. Очевидно, что перспективы улучшения спектральных характеристик источников СВЧ колебаний связаны как с совершенствованием теоретических методов расчета, так и совершенствованием схем и конструкций соответствующих устройств и их элементов.

Наиболее перспективным является направление, связанное с разработкой схемных методов повышения стабильности генераторов [72]. Эти методы позволяют создать такие условия, при которых нестабильности параметров элементов в наименьшей степени влияют на стабильность частоты (фазы) сигнала. В то же время, схемные методы в принципиальном отношении отличаются наибольшей сложностью из-за многообразия возможных решений, что в значительной мере затрудняет их разработку и практическое использование.

При этом следует отметить, что создание системы и стабилизированных источников, перекрывающих диапазон частот с высокой стабильностью частоты, является достаточно сложной научно-технической задачей. При решении данной задачи необходимо проводить теоретический анализ кратковременной нестабильности частоты в зависимости от флуктуаций параметров эталонного генератора, в качестве которого выбирается кварцевый автогенератор, и тракта умножителя частоты [76 - 79].

Таким образом, проведенный анализ литературных источников показывает, что для лечения костной патологии животных следует применять низкоэнергетические ЭМП дециметрового диапазона, использование которых требует разработки физико-математических моделей для определения биотропных параметров электромагнитного излучения.

Отсутствие специализированных высокостабильных монохроматических источников СВЧ излучений дециметрового диапазона, делает проблематичной постановку вопроса о создании низкоэнергетической электротехнологии лечения костной патологии у сельскохозяйственных животных.

Учитывая вышеизложенное, целью данной работы является улучшение восстановления костной ткани сельскохозяйственных животных, путем низкоэнергетического электромагнитного воздействия на основе исследования и обоснования параметров электромагнитного поля, конструктивных схем, параметров и режимов работы источников излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ состояния использования немедикаментозных методов и применяемых технических средств для улучшения восстановления костной ткани животных;
- теоретически исследовать процесс взаимодействия низкоэнергетического ЭМП СВЧ диапазона с тканями конечностей животных на основе разработки математической модели и установления зависимостей между параметрами электромагнитного излучения и биофизическими характеристиками тканей;
- провести анализ структурных схем формирования колебаний в СВЧ диапазоне, обоснование параметров и конструктивных решений источника электромагнитного излучения для улучшения восстановления костной ткани конечностей животных;
- разработать и провести экспериментальные исследования источника СВЧ излучения для улучшения восстановления костной ткани конечностей животных, обосновать его режимные параметры;
- разработать методику и провести экспериментальные исследования по установлению зависимости между показателем электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани и параметрами ЭМП СВЧ диапазона;
- провести производственную проверку результатов теоретических и экспериментальных исследований, дать технико-экономическое обоснование и определить перспективу применения полученных результатов.

1.6. Выводы

1. Проведенными исследованиями установлено, что одним из перспективных методов (для улучшения восстановления костной ткани животных) является метод, основанный на использовании низкоэнергетических электромагнитных полей СВЧ диапазона, позволяющий создать эффективную, энергосберегающую и экологически чистую технологию регенерации (восстановления) костной ткани.

2. Для определения параметров электромагнитного излучения (частота, плотность потока мощности, экспозиция), вызывающих необходимый восстановительный эффект у больных животных, необходимы теоретические исследования на основе математического моделирования процесса взаимодействия ЭМП с тканями конечностей животных с учетом их строения и биофизических характеристик тканей.

3. Для совершенствования технологии лечения костной патологии у животных необходимы исследования и разработка высокостабильных по частоте (10⁻⁷-10⁻⁸) источников излучения СВЧ диапазона.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ СВЧ ДИАПАЗОНА В КОНЕЧНОСТЯХ ЖИВОТНЫХ

2.1. Модель травмированной конечности животного, находящейся под воздействием СВЧ излучения

В разделе 1 была отмечена высокая эффективность лечения различных заболеваний животных с помощью низкоэнергетических электромагнитных излучений СВЧ диапазона. В полной мере сюда можно отнести и заболевания костной ткани, включая переломы. При этом следует отметить, что в большинстве случаев, как параметры воздействующего электромагнитного поля, так и используемая с этой целью аппаратура, выбираются достаточно произвольно.

В связи с этим, возникает необходимость проведения физико-математического моделирования процесса взаимодействия ЭМП с тканями конечностей животных, позволяющего оценить биотропные параметры поля и создать необходимые предпосылки для проведения экспериментальных исследований.

Очевидно, что конечности сельскохозяйственных животных можно представить в виде многослойных структур, состоящих из кожного покрова, мягких тканей и, собственно, кости. Однако, при определении структуры электромагнитного поля внутри реального биологического объекта возникает трудность, связанная с точным математическим описанием его формы. Поэтому, для описания структуры рассматриваемых полей сами биологические объекты представляют в виде простых геометрических фигур. В частности, конечности сельскохозяйственных животных можно представить в виде многослойного цилиндра. [24,25,27,28].

Итак, пусть в пространстве, обладающем диэлектрической и магнитной

проницаемостью ϵ и μ , соответственно, помещен бесконечный цилиндр радиуса R (рис.2.1). Вдоль оси цилиндра его электромагнитные свойства не меняются, а по радиусу он представляет собой слоистую структуру с пятью слоями, соответствующими костному мозгу, кости, мышечной ткани, коже и шерстяному покрову. При этом, каждый из слоев обладает своими биофизическими характеристиками: [86].

-относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_i для:

- 1.костного мозга $\epsilon_{к.м.}=5.90-4.90$;
- 2.костной ткани $\epsilon_{к.т.}=8.35-7.83$;
- 3.мышечной ткани $\epsilon_{м.т.}=0-47.30$;
- 4.кожного покрова $\epsilon_{к.п.}=0-45.20$;
- 5.шерстяного покрова $\epsilon_{ш.п.}=4.63-5.36$;

- плотностью ρ_i для:

- 1.костного мозга $\rho_{к.м.}$;

- 2.костной ткани $\rho_{к.т.3}$;
- 3.мышечной ткани $\rho_{м.т.3}$;
- 4.кожного покрова $\rho_{к.п.3}$;
- 5.шерстяного покрова $\rho_{ш.п.}=1.28-1.33 \text{ кг/м}^3$

- внешним радиусом r_i для:

- 1.костного мозга $r_{к.м.}=7.5-10.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 2.костной ткани $r_{к.т.}=12.5-18.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 3.мышечной ткани $r_{м.т.}=20.5-28.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 4.кожного покрова $r_{к.п.}=23.5-35.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 5.шерстяного покрова $r_{ш.п.}=25.0-38.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

Что касается магнитной проницаемости каждого слоя, то она везде равна

магнитной проницаемости свободного пространства, то есть μ_0 Гн/м, так как и моделирующий конечность животного цилиндр и окружающая его среда, то есть воздух, являются немагнитными.

Пусть на рассматриваемый цилиндр падает плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном его оси. При этом возможны два случая:

- ось цилиндра параллельна электрическому вектору (E -поляризация);
- ось цилиндра параллельна магнитному вектору (H -поляризация).

Произвольная ориентация векторов электрической E и магнитной H составляющей падающего электромагнитного излучения может быть получена как суперпозиция этих двух случаев. Точки над обозначениями векторов свидетельствуют о том, что их амплитуды – комплексные величины.

Для решения задачи введем цилиндрическую систему координат, у которой ось z совпадает с осью цилиндра. Вектор Пойнтинга S падающей волны направлен в отрицательную сторону оси z . При этом рассматриваться будет E -поляризация в соответствии с рис. 2.1.

Решение задачи заключается в нахождении электромагнитных полей внутри цилиндра. При этом переход от E -поляризации к H -поляризации может быть произведен посредством замены $E \rightarrow H$, $H \rightarrow -E$. Бесконечность цилиндра по оси z будет обеспечиваться в практических случаях всегда, если его длина, по крайней мере, на порядок будет больше радиуса цилиндра, то есть когда можно пренебречь краевыми эффектами на торцах.

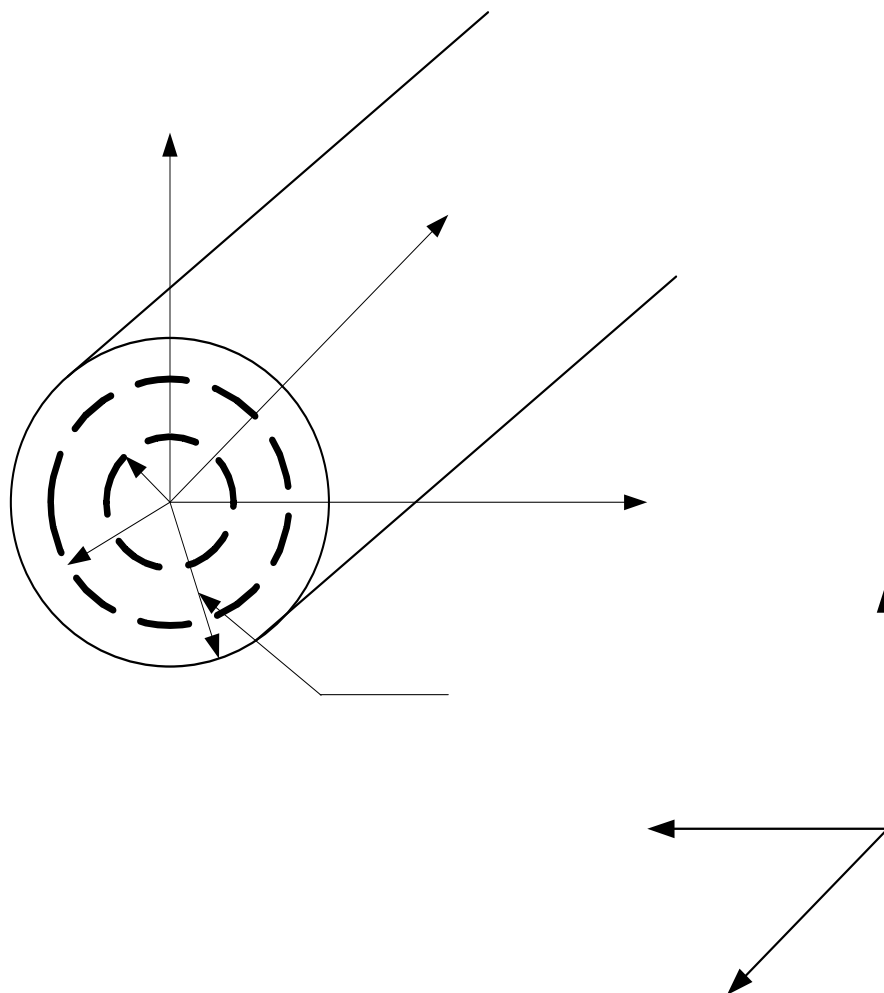


Рис. 2.1. Ориентация составляющих падающего ЭМП относительно конечности животного

Кроме того, перераспределение воздействующего на конечность животного ЭМИ от поверхности земли, туловища животного и других объектов можно не учитывать, что связано с длиной волны используемого излучения, а также возможным выбором конструкции антенны.

В соответствии с исходными условиями падающее поле при - поляризации будет иметь вид [79, 80]:

(2.1)

где E_0 и H_0 – комплексные амплитуды электрического и магнитного поля, соответственно;

k – волновое число в окружающей цилиндр среде;

ω – круговая частота падающего излучения;

ω_0 – частота ЭМП.

Здесь и далее временной множитель $e^{-i\omega_0 t}$ опущен.

2.2. Определение внутренних полей в однородном биологическом объекте, имеющем цилиндрическую форму

Строгое решение данной задачи сводится к решению уравнений Максвелла при заданных граничных условиях для составляющих электромагнитного поля на поверхности цилиндра с учетом условия излучения на бесконечности.

Присутствие цилиндра изменяет поле как по направлению распространения (ось z), так и в перпендикулярном к нему направлении (ось ρ). В направлении оси цилиндра с учетом его однородности поле не меняется, поэтому в уравнениях Максвелла частная производная по направлению оси

равна нулю ($\frac{\partial}{\partial z} = 0$). В цилиндрической системе координат с учетом выше сказанного и (2.1) уравнения Максвелла [79, 80]

(2.2)

приобретают вид:

(2.3)

Из (2.3) следует, что поскольку мышечная и костная ткань животного изотропна, то при наличии в падающем поле только продольной составляющей в рассеянном поле будет также присутствовать только продольная составляющая электрического поля.

В случае однородного диэлектрического цилиндра все пространство, в котором существует электромагнитное поле, необходимо разбить на две области: внешнюю и внутреннюю по отношению к цилиндру.

Во внешней области, которая характеризуется ϵ_1 и μ_1 , существует падающее поле E^i и отраженное – E^r . Во внутренней области цилиндра, характеризующейся проницаемостями ϵ_2 и μ_2 , существует только рассеянное внутрь поле E^t . При этом E^i определяется из (2.1), а E^r и E^t должны удовлетворять системе (2.3). Из сказанного следует, что на границе между внешней и внутренней областью, то есть на поверхности цилиндра, поле должно удовлетворять соотношениям:

(2.4)

Для решения системы (2.3) выразим E^r и E^t из первого и второго уравнения и подставим в третье уравнение. Это дает:

(2.5)

где α – соответствует или рассеянному внутрь или отраженному полю;
 β – определяется ϵ_1, μ_1 или ϵ_2, μ_2 в зависимости от области, в которой решается уравнение (2.5).

Дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных (2.5) решается методом разделения переменных [81]. С этой целью обозначим

$$\dots \quad (2.6)$$

Подставляя (2.6) в (2.5), получаем два независимых обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\dots \quad (2.7)$$

$$\dots \quad (2.8)$$

где $\dots$ – некоторое число.

Уравнение (2.7) представляет собой линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Его решением будет [81]:

$$\dots \quad (2.9)$$

Так как начало координат расположено на оси цилиндра и угол отсчитывается в плоскости, перпендикулярной оси, то, учитывая, что рассеянное внутрь электромагнитное поле не может принимать в одной и той же точке разные значения, приходим к выводу, что $\dots$ должна быть периодической функцией, а $\dots$ – целым числом. Кроме того, поскольку $\dots$ в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\dots, \quad (2.10)$$

то есть является четной функцией угла $\dots$, будем считать, что в дифрагированном поле с учетом выполнения граничных условий эта четность сохраняется. Следовательно, $\dots$ и $\dots$

$$\dots, \quad (2.11)$$

где $\dots$ – некоторый постоянный коэффициент;

– угол, отсчитываемый от оси $\dots$ в положительном направлении;

– целое число.

Уравнение (2.8) является уравнением Бесселя. Из теории этих уравнений [81, 82] следует, что их решение в нашем случае должно иметь вид:

$$(2.12)$$

или

$$(2.13)$$

Решение (2.12) соответствует внутренней области цилиндра, то есть прошедшей внутрь волне. Учитывая требование конечности поля на оси цилиндра, приходим к выводу, что . Это объясняется тем, что функция Неймана при стремлении аргумента к нулю стремится к бесконечности, что противоречит физическому смыслу задачи. Итак, внутри цилиндра

$$(2.14)$$

где – постоянный коэффициент;

– функция Бесселя первого рода;

– то же, что и в (2.11);

– определяется электромагнитными характеристиками цилиндра и ;

– текущая координата по радиусу цилиндра ().

Решение (2.13) соответствует внешней области цилиндра, то есть отраженному полю. Принимая во внимание асимптотики функций Ханкеля

и , которые для и имеют вид [82]:

$$(2.15)$$

приходим к выводу, что при функция соответствует волне, идущей из бесконечности к цилиндру, а

– наоборот, от цилиндра на бесконечность. Учитывая принцип излучения на бесконечности [80], необходимо положить, что волны, идущей к цилиндру не существует, то есть

и вне цилиндра

$$, \quad (2.16)$$

где – постоянный коэффициент;

– функция Ханкеля второго рода;

– то же, что и в (2.11);

– определяется электромагнитными свойствами окружающей цилиндр среды (в нашем случае воздуха);

– текущая координата по радиусу вне цилиндра ().

Принимая во внимание сказанное выше и подставляя (2.11), (2.14), (2.16) для соответствующей области в (2.6), приходим к выводу, что в задаче о рассеянии электромагнитного поля на однородном диэлектрическом цилиндре приходится иметь дело с тремя видами волн: падающей

$$, \quad (2.17)$$

отраженной

$$, \quad (2.18)$$

где ,
и прошедшей внутрь цилиндра

$$(2.19)$$

где .

В (2.18), (2.19) производится суммирование по , так как оно может принимать в решениях (2.11), (2.14), (2.16) любые целые значения. Значит, общее решение должно быть суперпозицией всех возможных решений, при этом отрицательные значения не берутся с учетом четности рассматриваемой задачи.

Таким образом, внутри цилиндра будет существовать поле, которое определяется выражением (2.19), а вне цилиндра –

$$. \quad (2.20)$$

Величины неизвестных коэффициентов и определяются из граничных условий (2.4).

Первое граничное условие из (2.4) получаем, приравнявая (2.19) и (2.20) при условии, что :

$$. \quad (2.21)$$

Используя известное из теории функций Бесселя равенство [82]:

$$, \quad (2.22)$$

перепишем (2.21) следующим образом:

$$(2.23)$$

Учитывая ортогональность цилиндрических функций, приводящую к независимости решений для разных , получаем два равенства:

$$(2.24)$$

и

$$(2.25)$$

Для второго граничного условия необходимо выразить $\vec{H}_2$ через $\vec{H}_1$. С этой целью используем второе уравнение (2.3):

$$\vec{H}_2 = \vec{H}_1 + \vec{H}_{\text{отр}}. \quad (2.26)$$

Тогда падающее поле с учетом (2.22) будет характеризоваться выражением:

$$\vec{H}_1 = \vec{H}_0 e^{ikz}, \quad (2.27)$$

отраженное поле –

$$\vec{H}_{\text{отр}} = \vec{H}_0 R e^{-ikz}, \quad (2.28)$$

и прошедшее внутрь цилиндра поле –

$$\vec{H}_2 = \vec{H}_0 T e^{ikz}. \quad (2.29)$$

Подставляя (2.27) - (2.29) во второе уравнение (2.4), получим граничные условия для тангенциальных составляющих магнитного поля:

$$H_1 = H_2, \quad (2.30)$$

что аналогично сказанному выше также приводит к двум равенствам:

$$H_1 = H_2, \quad (2.31)$$

(2.32)

Уравнения (2.24), (2.31) образуют неоднородную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов a_n и b_n . Ее решение имеет вид:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(n\theta) d\theta, \quad (2.33)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(n\theta) d\theta. \quad (2.34)$$

Для вычисления коэффициентов a_n , b_n вначале преобразуем уравнения (2.25), (2.32), воспользовавшись ортогональностью функций $\cos(n\theta)$ и $\sin(n\theta)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ [81]. С этой целью умножим обе части указанных уравнений на $\cos(n\theta)$ и проинтегрируем их по переменной θ в пределах от 0 до 2π . Полученные интегралы будут равны нулю для всех $n \neq 0$, а при $n = 0$ дадут π . Благодаря данному свойству уравнения (2.25), (2.32) преобразуются к виду:

(2.35)

Решение системы (2.35) дает необходимые коэффициенты:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(n\theta) d\theta; \quad (2.36)$$

. (2.37)

В результате определения коэффициентов α и β величины электромагнитных полей, отраженных от однородного диэлектрического цилиндра и прошедших внутрь него, однозначно определены.

Таким образом, в том случае, когда облучаемый объект имеет цилиндрическую или близкую к ней форму (а именно такую форму имеют конечности сельскохозяйственных животных), нулевая гармоника проникающего внутрь электромагнитного поля имеет аналогично падающей плоской волне лишь три

составляющих: E_z , H_z и θ . Фазовые соотношения между этими составляющими определяются размерами биообъекта, его электрофизическими характеристиками и частотой падающей волны. Это следует из того, что

коэффициент α (2.36) является комплексной величиной, причем при заданном поперечном сечении цилиндра его фаза связана с частотой падающей волны. Это явление вызвано резонансными процессами, происходящими внутри

облучаемого тела на разных длинах волн. Общая зависимость α , β и θ от радиуса биообъекта определяется функциями Бесселя и Ханкеля соответствующего порядка. Следовательно, изменение длины падающей волны должно привести к поперечным резонансам полей, что вызовет повышение интенсивности электромагнитного воздействия в пучностях внутреннего поля. Воздействие облучения на биообъект при резонансных явлениях будет неоднородным в поперечном сечении. Значит, подбирая частоту, можно избирательно воздействовать на определенные точки, если это необходимо, или наоборот, уменьшать степень риска их повреждения, сдвигая пучности электромагнитного поля в сторону.

2.3. Рассеяние электромагнитного поля на конечностях сельскохозяйственных животных, имеющих слоистую структуру

Решив задачу о рассеянии электромагнитной волны СВЧ диапазона на однородном биологическом объекте цилиндрической формы, можно перейти к основной задаче о рассеянии этой волны на биологическом объекте той же формы, но слоистом по радиусу [83, 84]. Как было сказано в п. 2.1, будем считать эти конечности имеющими пять слоев.

Рассмотрим два слоя: под номером i и j . Очевидно, слой под номером i будет внутренним по отношению к слою j . Внутренний слой расположен между радиусами r_i и r_j , то есть $r_i < r_j$, и характеризуется электрофизическими параметрами ϵ_i , μ_i , σ_i , α_i , β_i , θ_i .

. Внешний слой расположен между $z = 0$ и $z = d$, то есть $0 < z < d$, и характеризуется ϵ_1 , μ_1 , σ_1 .

Учитывая результаты, полученные выше, электромагнитные поля во внутреннем и внешнем слоях необходимо представить в виде суперпозиции двух полей: поля, пришедшего из внешней к данному слою области, и поля, отраженного от внутренней к данному слою области. При условии, что падающее на цилиндр поле является плоским с z -поляризацией, все перерассеянные поля также должны иметь три составляющих: две тангенциальных E_{θ} , E_{ϕ} и одну радиальную E_r . Так как условие сшивания полей на границе двух областей связано с тангенциальными составляющими, в дальнейшем будем

рассматривать только E_{θ} и E_{ϕ} . Кроме того, основываясь на полученных в п. 2.2 выражениях, нулевую гармонику рассеянного поля следует рассматривать отдельно от гармоник с $m \neq 0$.

Итак, внутренний слой с номером n будет характеризоваться волной, пришедшей из слоя $n-1$, и волной, отраженной от слоя n . Обозначим составляющие пришедшей из слоя $n-1$ волны $E_{\theta}^{(n-1)}$, $E_{\phi}^{(n-1)}$, а отраженной от слоя n символами $E_{\theta}^{(n)}$, $E_{\phi}^{(n)}$. Таким образом, в слое под номером n будет существовать электромагнитное поле с компонентами:

$$E_{\theta}^{(n)} = E_{\theta}^{(n-1)} + E_{\theta}^{(n)}; \quad (2.38)$$

$$E_{\phi}^{(n)} = E_{\phi}^{(n-1)} + E_{\phi}^{(n)}. \quad (2.39)$$

Аналогично в слое с номером $n+1$ будет существовать волна, пришедшая из слоя n и отраженная от слоя $n+1$:

$$E_{\theta}^{(n+1)} = E_{\theta}^{(n)} + E_{\theta}^{(n+1)}; \quad (2.40)$$

$$E_{\phi}^{(n+1)} = E_{\phi}^{(n)} + E_{\phi}^{(n+1)}. \quad (2.41)$$

В выражениях (2.38) - (2.41) $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}$ обозначают коэффициенты прохождения и отражения для волн во внутреннем и внешнем слоях соответственно.

На границе между слоями $z=0$ и $z=d$ тангенциальные компоненты полей должны сшиваться, то есть равняться друг другу. Разделяя друг от друга нулевую гармонику и гармонику с номерами $n \neq 0$, а, также производя нормировку выражений для высших гармоник [81], получаем две независимые системы линейных алгебраических уравнений:

$$(2.42)$$

и

$$(2.43)$$

где $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ — матрицы.

Рассмотрим вначале систему (2.42). Данная система из двух линейных алгебраических уравнений содержит четыре неизвестных величины $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}$,

$\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}$. Как известно, [85], для нахождения фундаментальной системы решений однородной линейной системы двух алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными необходимо двум независимым переменным задать произвольные значения, а затем определить две оставшихся неизвестные. Однако это приводит к тому, что задача рассеяния электромагнитных волн на конечностях животнох однозначно решена не будет. Выход из создавшейся ситуации легко найти, вспомнив, что системы, подобные (2.42), должны быть записаны для каждого из пяти слоев рассматриваемой конечности. Каждая соседняя пара из пяти получившихся систем будет "сцеплена" между собой посредством двух неизвестных коэффициентов, входящих одновременно в обе системы. Так, например, системы алгебраических уравнений для нулевых гармоник дифрагированного поля, написанные для слоев $z=0$ и $z=d$, будут

содержать одновременно неизвестные коэффициенты $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}$ и $a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}$, для слоев n_1 и n_2 — и n_3 и так далее. Иначе говоря, записав систему уравнений для каждого из пяти слоев, получим систему из десяти однородных линейных алгебраических уравнений, содержащих двенадцать неизвестных коэффициентов. Причем все коэффициенты, начиная от первого слоя цилиндра и кончая окружающей его средой, взаимосвязаны. Остается вспомнить, что первый слой не имеет внутреннего, следовательно, в нем коэффициент a_{11} , связанный с отражением от внутреннего слоя, равен нулю, а в окружающей цилиндр среде коэффициент a_{25} , характеризующий прошедшую из внешнего слоя волну, будет равен a_{15} (см. (2.24)), то есть амплитуде падающей на цилиндр волны. Таким образом, из двенадцати неизвестных коэффициентов два определяются из физического смысла задачи, что, в результате, приводит к системе из десяти алгебраических уравнений с десятью неизвестными, которая имеет единственное решение [85].

Для практической реализации предложенного метода вычисления неизвестных коэффициентов $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}$ и $a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}$ поступим следующим образом. Представим систему (2.42) в матричном виде [85]:

$$A \cdot X = 0, \quad (2.44)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \end{pmatrix}, \quad (2.45)$$

$$X = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{12} & a_{22} & a_{13} & a_{23} & a_{14} & a_{24} & a_{15} & a_{25} \end{pmatrix}. \quad (2.46)$$

Тогда коэффициенты внутреннего слоя $a_{11}, a_{21}, a_{12}, a_{22}, a_{13}, a_{23}, a_{14}, a_{24}, a_{15}, a_{25}$ могут быть выражены через коэффициенты внешнего слоя $a_{12}, a_{22}, a_{13}, a_{23}, a_{14}, a_{24}, a_{15}, a_{25}$ следующим образом:

$$a_{11} = 0, \quad a_{21} = a_{15}, \quad a_{12} = a_{22}, \quad a_{13} = a_{23}, \quad a_{14} = a_{24}, \quad a_{15} = a_{25}. \quad (2.47)$$

где $\mathbf{A}^{-1}$ – матрица, обратная

Обозначая $\mathbf{B}$, окончательно получим

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C}, \quad (2.48)$$

где $\mathbf{B}$ – квадратная матрица второго порядка с элементами:

$$(2.49)$$

Используя введенные обозначения, получаем для слоя под номером пять:

$$\mathbf{B}_5 = \mathbf{A}_5^{-1} \mathbf{C}_5, \quad (2.50)$$

где номер 6 соответствует окружающей конечность животного среде;
для слоя номер четыре –

$$(2.51)$$

и так далее вплоть до слоя с номером один –

$$\dots \quad (2.52)$$

Подставляя теперь в (2.52) вместо столбца

его выражение через столбец

и так далее до столбца

,

получаем матричное уравнение

$$\dots \quad (2.53)$$

связывающее между собой неизвестные коэффициенты первого слоя конечности животного и окружающей его средой.

Обозначая

$$\dots \quad (2.54)$$

и принимая во внимание, что , , окончательно имеем

$$\dots \quad (2.55)$$

где — известные матрицы, заданные выражениями (2.49).

Уравнение (2.55) сводится к системе линейных алгебраических уравнений второго порядка с двумя неизвестными и имеет единственное

решение. Найдя из него a_n и b_n , с помощью (2.48) вычисляют все остальные коэффициенты.

Решение системы (2.43), то есть вычисление амплитуд рассеянных электромагнитных полей у гармоник с $n \neq 0$, проводится аналогичным способом. Учитывая, что $a_{-n} = -a_n$ и $b_{-n} = b_n$, получаем матричное уравнение:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_n \\ d_n \end{pmatrix}, \quad (2.56)$$

где элементы известных матриц A_{ij} определяются из выражений (2.49) посредством замены

$$(2.57)$$

Найденные из (2.56) неизвестные коэффициенты a_n и b_n позволяют вычислить все остальные коэффициенты с помощью выражения

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_n \\ d_n \end{pmatrix}, \quad (2.58)$$

аналогичного (2.48).

Подстановка найденных с помощью (2.48), (2.55), (2.56), (2.58) коэффициентов в (2.38), (2.39) дает возможность вычислить внутренние поля в каждом слое цилиндра, а также в окружающей его среде.

Из полученных выражений видно, что амплитуды внутренних полей – комплексные величины, меняющие свои фазовые соотношения в зависимости от размеров конечности животного, частоты падающего поля, электрофизических характеристик биологических тканей и местоположения их внутри конечности.

2.4. Численные расчеты электромагнитных полей внутри травмированных конечностей животных на основе предложенной теоретической модели

Как уже было сказано, предложенная в данном разделе модель должна послужить основой для предварительного определения биотропных параметров электромагнитных полей, воздействующих с лечебной целью на травмированные конечности сельскохозяйственных животных. С этой целью необходимо было, используя полученные математические выражения, провести численные расчеты величин этих полей в конечностях различных геометрических размеров, определить оптимальную величину частоты воздействия и на основании полученных результатов дать соответствующие рекомендации для технических характеристик предлагаемой терапевтической аппаратуры.

Поскольку основное воздействие на больную конечность оказывает нулевая гармоника падающего электромагнитного поля (амплитуды гармоник с номерами существенно ниже нулевой), что связано с низкими резонансными характеристиками облучаемых биологических объектов, в основу расчета было положено выражение (2.55), которое совместно с соотношениями (2.49) - (2.54) позволяет вычислить коэффициенты отражения ЭМП от каждого слоя и прохождения его внутрь каждой структуры рассматриваемой конечности.

Электрофизические характеристики всех пяти учитываемых слоев (рис 2.1) брались согласно данным справочника [86]. Напряженность электрической составляющей падающего поля бралась равной единице, что позволяет легко переходить в расчетах к любому конкретному значению, при этом рассматривался случай - поляризации.

В разделе 1 приведен обзор литературных данных, указывающий на то, что основное восстанавливающее действие электромагнитных излучений в случае костных патологий связано с их воздействием на клеточные мембраны и на активизацию транспорта сквозь них ионов различных микроэлементов. При этом характерные резонансные частоты этих процессов лежат в диапазоне

Гц.

Учитывая, что при прохождении электромагнитных излучений дециметрового и сантиметрового диапазонов сквозь конечность животного происходит, во-первых, поглощение этих излучений, а, во-вторых, резонансное их перерассеяние на различных биологических неоднородностях, следовало, прежде всего, выяснить, на каких частотах напряженность электрической составляющей поля будет максимальной на участках костного мозга и костной ткани.

С этой целью было проведено исследование зависимости амплитуды электрической составляющей от частоты (выражение 2.38), представляющего ЭМП, в области костного мозга и костной ткани конечности. Для получения

ЭМП, в области костного мозга и костной ткани конечности, Для получения более универсальной методики лечения животных были рассмотрены конечности как крупных животных (лошадь, корова), так и более мелких (свинья, овца). Это связано с тем, что поперечные геометрические размеры, как самих конечностей, так и размеры их внутренних тканей у этих животных существенно отличаются, а это может принципиально сказаться на распределении в них внутренних электромагнитных полей.

На рис. 2.2, 2.3 представлены результаты расчета для ноги свиньи, которые проводились в диапазоне частот 3,0...4,2 ГГц. Из рис. 2.2 видно, что в области костного мозга максимальная величина электрической составляющей будет на частоте порядка 3,8 ГГц. При сдвиге влево и вправо от указанной частоты амплитуда существенно уменьшается. То же самое можно сказать и о рис. 2.3, на котором представлена та же зависимость, но для области костной ткани. Здесь максимальная амплитуда наблюдается на частоте близкой к 3,7 ГГц, при этом смещение в более длинноволновый диапазон на величину поля влияет меньше, чем при смещении в более коротковолновый диапазон.

На рис. 2.4 и 2.5 изображены кривые, соответствующие частотной зависимости квадрата амплитуды электрической составляющей внутреннего поля для ноги коровы. Следует отметить, что в данном случае, и в области костного мозга и в области костной ткани ноги, максимум выражен слабее, чем у свиньи. Это объясняется более крупными размерами самой ноги по отношению к длине падающей на нее электромагнитной волны. Следовательно, резонансные явления в данном случае выражены слабее. Однако, и в этом случае электрическая составляющая достигает своего максимума в диапазоне частот 3,6...3,8 ГГц.

Из полученных результатов следует вывод, что наиболее приемлемой частотой для облучения травмированных ног сельскохозяйственных животных и с точки зрения процессов в мембранах клеток, и с точки зрения электродинамики, является частота в районе 3,7 ГГц. Кроме того, соответствующее распо-

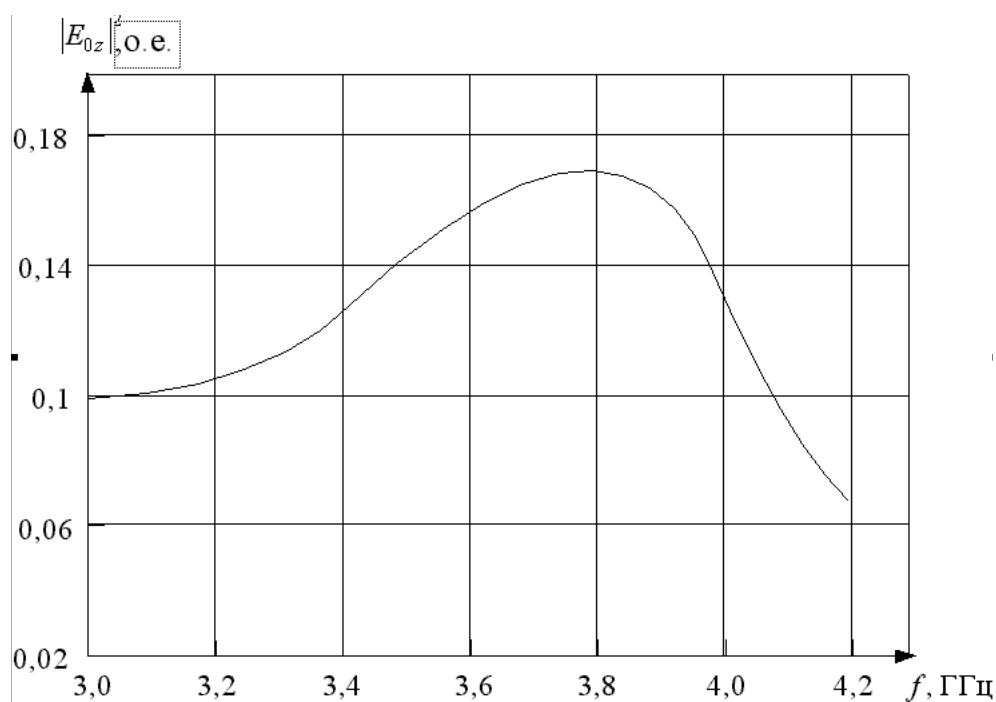


Рис. 2.2. Зависимость квадрата амплитуды электрической составляющей

ЭМП от частоты в области костного мозга ноги свиньи

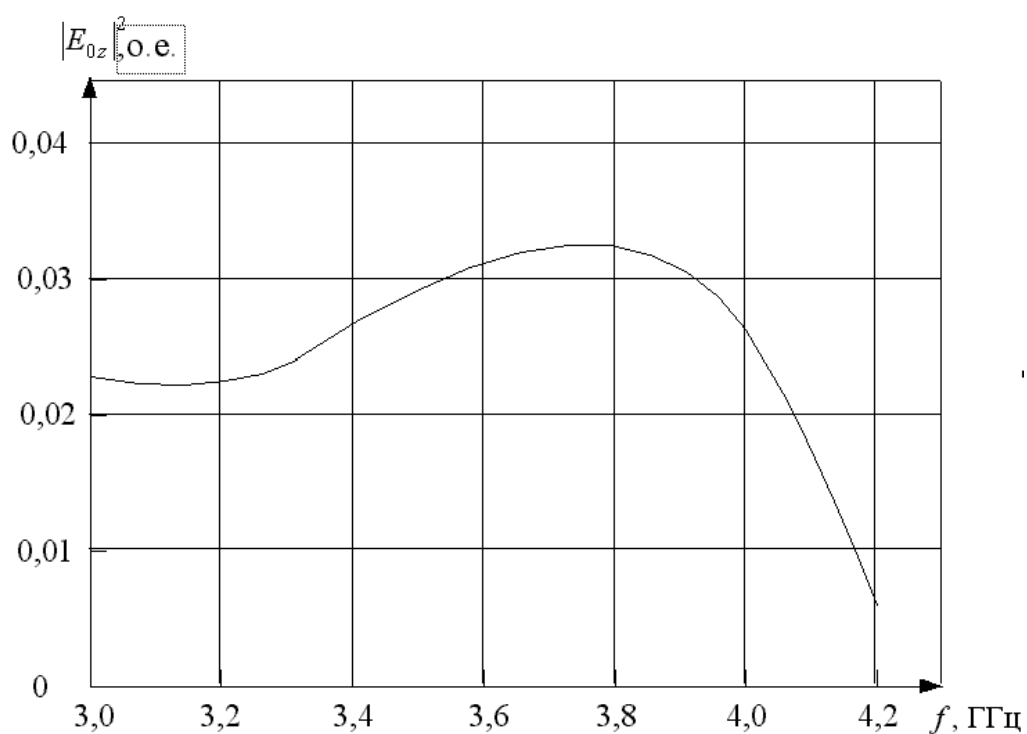


Рис. 2.3. Зависимость квадрата амплитуды электрической составляющей

ЭМП от частоты в области костной ткани ноги свиньи

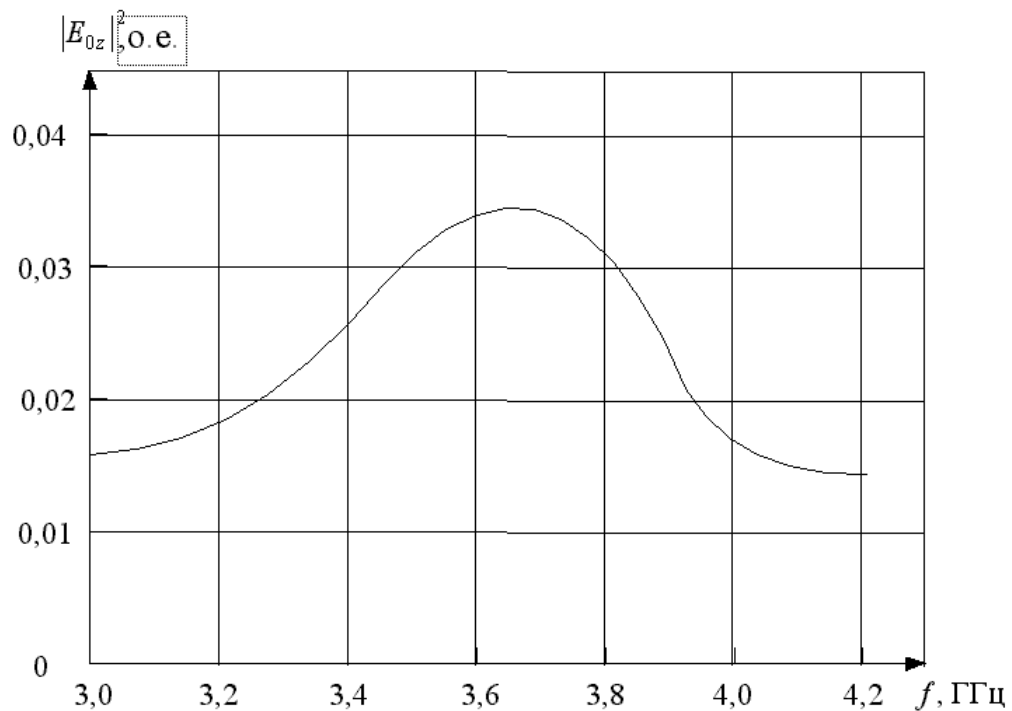


Рис. 2.4. Зависимость квадрата амплитуды электрической составляющей

ЭМП от частоты в области костного мозга ноги коровы

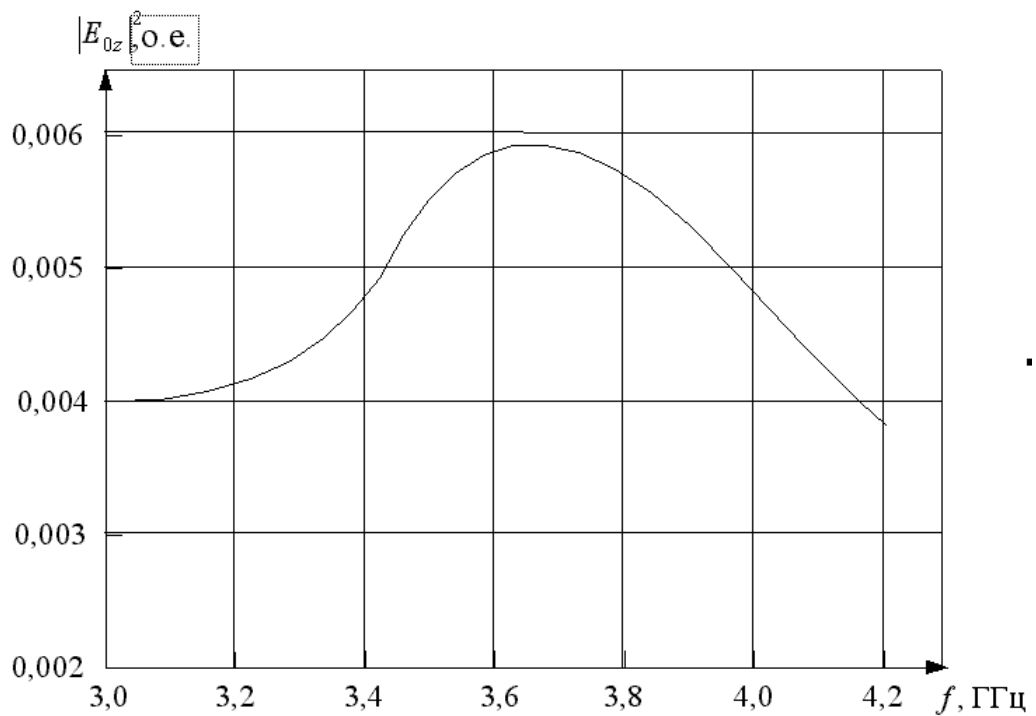


Рис. 2.5. Зависимость квадрата амплитуды электрической составляющей

ЭМП от частоты в области костной ткани ноги коровы
 положение максимумов воздействующего поля позволяет выбирать источники
 излучения с меньшим потоком мощности, что важно с точки зрения
 восстановительного процесса.

Следует отметить, что и на данных графиках, и на последующих, по оси ординат отложена безразмерная величина, показывающая, какая часть падающей на конечность животного мощности электромагнитного излучения достигает нужного участка травмированной ноги.

После выяснения наиболее удобной для облучения частоты электромагнитного поля, необходимо было провести численное исследование его распределения в поперечном сечении травмированной конечности. Это необходимо было сделать для выяснения вопроса, насколько эффективно это поле будет действовать именно на участки костной ткани конечностей.

Для получения данного результата была исследована зависимость (выражение (2.38)) от радиуса поперечного сечения ноги на основе ее анатомического строения.

На рис. 2.6 представлена зависимость квадрата амплитуды продольной составляющей электрического поля ЭМИ внутри конечности свиньи от радиуса поперечного сечения ноги. Частота облучения при этом бралась равной 3,7 ГГц. Из графика видно, что как в области костного мозга, так и в области костной ткани, электрическое поле значительно выше, чем в других областях. Отсюда следует вывод, что облучение с данной частотой будет оказывать максимальное воздействие именно на больную костную ткань, что должно способствовать ее быстрейшему восстановлению.

Аналогичный результат следует и из рис. 2.7, на котором изображено распределение квадрата электрической составляющей в поперечном сечении ноги коровы на частоте 3,7 ГГц. В данном случае пучности поля расположены в области костного мозга и самой травмированной костной ткани.

Таким образом, независимо от размеров животного (свинья, корова) именно облучение на указанной частоте оказывает максимальное стимулирую-

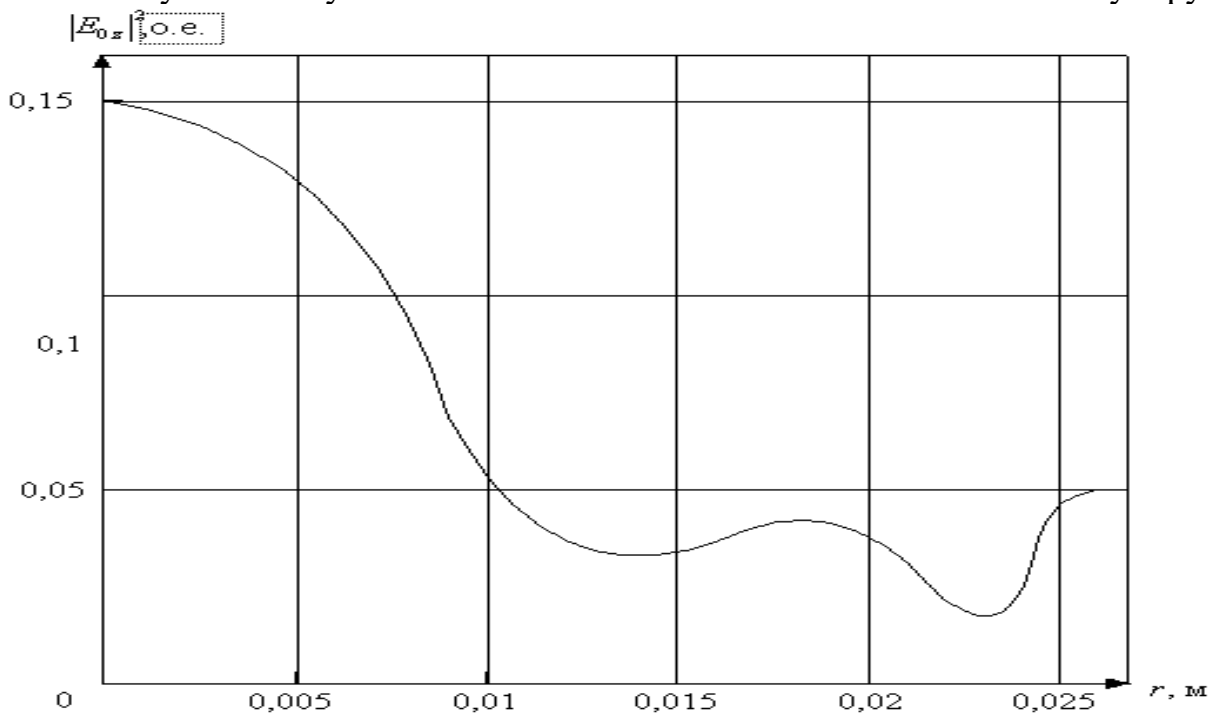


Рис. 2.6. Распределение квадрата амплитуды электрической составляющей электромагнитного излучения внутри конечности свиньи на частоте 3,7 ГГц

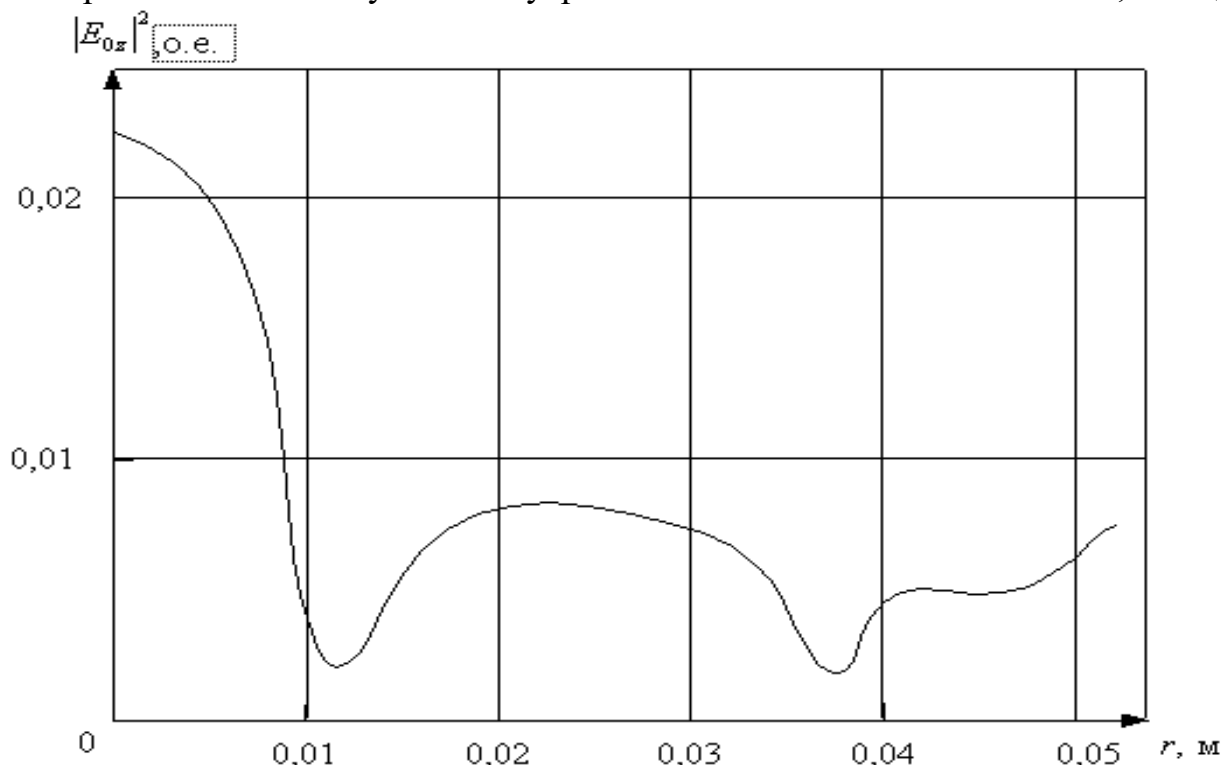


Рис. 2.7. Распределение квадрата амплитуды электрической составляющей электромагнитного излучения внутри конечности коровы на частоте 3,7 ГГц

щее воздействие на камбиальный слой надкостницы; эндост и костный мозг обоих обломков; на кортикальный слой кости и мягкие ткани вблизи перелома.

Аналогичные результаты были получены и при проведении расчетов для конечностей других сельскохозяйственных животных (лошадь, овца). Следовательно, можно сделать вывод, что наиболее приемлемой частотой электромагнитного поля, используемого в терапевтических целях при лечении травм конечностей различных сельскохозяйственных животных, является диапазон от 3,6 до 4,0 ГГц. Данный диапазон приемлем, как с точки зрения получения максимальных амплитуд ЭМП внутри облучаемых объектов, так и с точки зрения оптимального распределения внутреннего поля.

Из приведенных выше расчетов, можно сделать вывод и относительно плотности потока мощности облучения травмированных конечностей. Как следует из литературных источников [87, 88], мощности облучения порядка 0,1

вызывают появление на мембранах клеток наведенных потенциалов, которые начинают позитивно влиять на трансмембранный перенос ионов. Иначе говоря, происходит интенсивный процесс восстановления больных и поврежденных клеток. Следовательно, источник облучения должен создавать в поврежденных областях именно такую плотность потока мощности. Меньшие величины мощности не будут оказывать лечебного эффекта, большие –

наоборот могут привести к негативным последствиям необратимого характера, которые связаны с разрушением клеток.

Учитывая результаты, представленные на рис. 2.2 - 2.7, которые показывают, какая часть мощности облучения достигает нужной области ($\sim 0.005 \dots 0.01$), и приведенный выше необходимый для восстановительного эффекта уровень мощности, можно сделать вывод, что источник облучения должен излучать порядка 100 Вт/м^2 .

2.5. Выводы

1. Усовершенствованная математическая модель процесса взаимодействия ЭМП с тканями конечности животного, которая рассматривается как многослойный цилиндр с различными биофизическими характеристиками слоёв ($\epsilon^*_{\text{к.т.}}=8.35-7.83$; $\epsilon^*_{\text{к.м.}}=5.90-4.90$; $\epsilon^*_{\text{м.т.}}=0-47.30$; $\epsilon^*_{\text{к.п.}}=0-45.20$; $\epsilon^*_{\text{ш.п.}}=4.0$; $\rho_{\text{к.т.}}=3$; $\rho_{\text{к.м.}}=3$; $\rho_{\text{м.т.}}=3$; $\rho_{\text{к.п.}}=3$; $\rho_{\text{ш.п.}}=1.28-1.33 \text{ кг/м}^3$), позволяющая определить параметры воздействующего электромагнитного излучения (частоту, плотность потока мощности, диапазон изменения частоты и др.) и распределения самого поля по поперечному сечению конечности, вызывающих необходимый восстановительный эффект, предопределяющий технические параметры источника СВЧ излучения.

2. Проведенные на основании предложенной математической модели расчеты показали, что наиболее приемлемой частотой электромагнитного облучения конечностей различных сельскохозяйственных животных является $3,6 \dots 4,0 \text{ ГГц}$. В этом случае, как распределение самого поля по поперечному сечению конечности, так и его амплитуда, наиболее оптимальны.

3. Из полученных результатов следует, что облучение должно вестись с мощностью порядка 100 Вт/м^2 , что интенсифицирует обмен веществ на уровне мембран больных клеток и способствует быстрейшему восстановлению поврежденной костной ткани.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОСТНУЮ ТКАНЬ ЖИВОТНЫХ

3.1. Программа исследований

Проведенный обзор существующих источников СВЧ колебаний позволил выявить ряд недостатков этих приборов. К ним относятся большие габариты многих из них, обусловленные применением электровакуумных приборов. Это же обуславливает и большое потребление электроэнергии, невысокую экономичность и срок службы. Все существующие промышленные источники СВЧ колебаний предназначены для теплового воздействия на биологические объекты. Аппаратура, предназначенная для информационного (нетеплового) воздействия на биологический объект, должна обеспечивать, помимо необходимой мощности и частоты сигнала, высокие требования по стабильности частоты и степени подавления дискретных составляющих в спектре выходного сигнала. Необходимость работы такой аппаратуры не только в лабораторных условиях, но и на различных сельскохозяйственных объектах (опытных участках, животноводческих фермах и т.д.), накладывает на нее определенные требования по компактности, экономичности, сроку службы, высокой устойчивости к механическим воздействиям.

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

С учётом поставленных задач и математического описания процесса взаимодействия электромагнитного поля с тканями конечностей животных, программа исследований технических средств СВЧ диапазона предусматривает:

- анализ методов построения высокостабильных источников электромагнитного излучения СВЧ диапазона;
- разработка структурной и принципиальной схем источника СВЧ излучения;
- анализ характеристик блоков источников СВЧ излучения;

Целью данных исследований являлось:

- получение исходных данных для обоснования базовой структурной схемы источника электромагнитного излучения и расчёта его характеристик;
- установление теоретических и экспериментальных зависимостей между режимными характеристиками источника СВЧ излучения;
- сравнение полученных теоретических и экспериментальных зависимостей и обоснование конструктивных и режимных параметров;

3.2. Анализ методов построения высокостабильных источников СВЧ колебаний

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

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

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

Выбор структуры полупроводниковых источников СВЧ колебаний определяется видом воздействия ЭМП на биологический объект: тепловым или информационным (нетепловым). При тепловом воздействии основными параметрами, определяющими структуру СВЧ источника колебаний, являются мощность и частота [89]. При информационном воздействии наряду с указанными параметрами (мощность и частота) необходимо учитывать требования по стабильности частоты и степени подавления дискретных составляющих в спектре выходного сигнала источника СВЧ колебаний [90]. Экспериментальные опыты на растениях и животных при нетепловом воздействии показывают, что для определения длины волны и плотности потока мощности, при которых наблюдается биологический эффект, необходимы источники СВЧ колебаний с нестабильностью 10^{-7} - 10^{-8} и ослаблением дискретных составляющих в спектре выходного сигнала на 40 – 50 дБ [90].

Анализ литературных данных [91 - 97] показывает, что генераторы, построенные на основе ЛПД и ДГ, по стабильности частоты и чистоте спектра выходного сигнала в настоящее время пока еще уступают генераторам с применением усилительно-умножительных каскадов на транзисторах и варакторах с возбуждением от кварцованного транзисторного автогенератора.

Поэтому, исходя из требований к стабильности частоты и спектру выходного сигнала источника СВЧ колебаний, в дальнейшем проведем исследование многокаскадных умножителей частоты с применением транзисторов и варакторов [98].

Наиболее простым и известным методом построения структурных схем формирования колебаний в СВЧ диапазоне является применение многокаскадных линеек умножения частоты кварцевого генератора (рис. 3.1). Такие линейки должны содержать, кроме каскадов умножения частоты на

транзисторах и варакторах, также каскады усиления мощности и различные селектирующие устройства. Такие схемы формирования СВЧ высокостабильных колебаний находят широкое применение в технике СВЧ. Однако получение высокой спектральной чистоты выходного сигнала является трудной задачей.

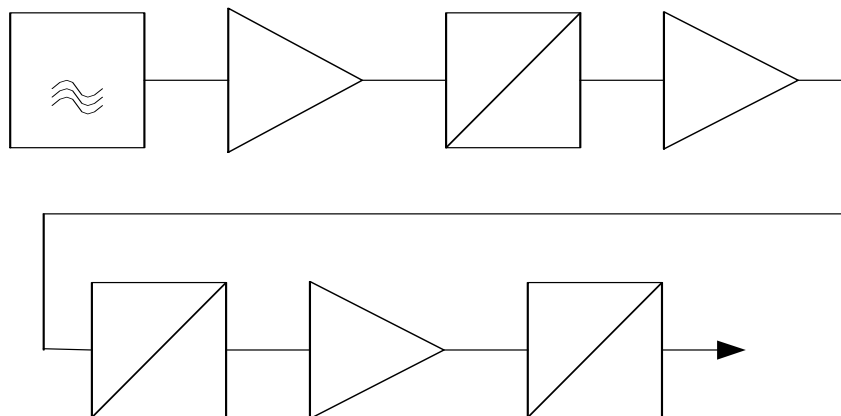


Рис. 3.1. Многокаскадная линейка умножения частоты кварцевого генератора

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

Не лучшим образом обстоит дело с флуктуационными составляющими выходного спектра. При умножении частоты уровень фазовых шумов опорного входного генератора возрастает в N раз, где N – общий коэффициент умножения последующих каскадов. Так, применение кварцевого генератора с выходной частотой 5 или 10 МГц и типовым для них значением уровня фазовых шумов, равным 130 - 140 дБ/Гц при расстройках от несущей 1 - 10 кГц с последующим умножением частоты до 10 ГГц ($N = 2000$), приводит к возрастанию уровня фазовых шумов на 60 - 85 дБ/Гц.

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

Учет собственных флуктуаций фазы каскадов умножения диктует определенную последовательность коэффициентов умножения при проектировании структурных схем многокаскадных линеек умножения частоты. Рассмотрим это на конкретном примере.

Пусть необходимо реализовать линейку с общим коэффициентом умножения K , имея при этом набор идентичных по фазовым флуктуациям каскадов с коэффициентами умножения $k_1, k_2, \dots, k_n$ и максимальным, вносимым каждым каскадом, отклонением фазы выходного сигнала, равным $\Delta\varphi$.

. При последовательности коэффициентов умножения флуктуации фазы первого каскада умножаются на коэффициент

k_1 . При последовательности $k_1, k_2, \dots, k_n$ соответствующий коэффициент умножения флуктуаций первого каскада составит

K . Отсюда следует, что оптимальной последовательностью коэффициентов умножения с точки зрения получения минимальных вносимых фазовых флуктуаций следует считать последовательность $k_1, k_2, \dots, k_n$ при

. Таким образом, первый каскад умножения частоты необходимо выполнить с максимальным коэффициентом умножения, приняв соответствующие меры по подавлению дискретных составляющих в спектре его выходного сигнала.

Паразитная фазовая модуляция (ФМ), флуктуации фазы, наводки в многократных умножителях частоты определяются, главным образом, входными каскадами [91 - 102].

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

Прежде всего, следует отметить недостаточно совершенное подавление колебаний гармоник умножаемой частоты на выходе первого каскада [92], которое появляется в виде амплитудной модуляции (АМ) по экспоненциальному закону с частотой огибающей, равной умножаемой. Во втором каскаде умножителя под воздействием таких амплитудно-модулированных колебаний возникает временно-импульсная модуляция импульсов тока нелинейного элемента, вследствие чего выходное напряжение этого и последующих каскадов оказывается модулированным по фазе с частотой огибающей АМ. Чем больше затухание фильтра и коэффициент умножения первого умножителя, тем большей будет ФМ, возникающая во втором каскаде умножителя частоты. Аналогичные процессы происходят и в последующих умножительных каскадах. В результате выходной сигнал многократного умножителя частоты модулируется по фазе умножаемой частотой и ее гармониками, номера которых определяются коэффициентами умножения отдельных каскадов. Боковые составляющие паразитной ФМ выходного сигнала первого каскада умножения наиболее близки к выходной частоте многократного умножителя и при

большом общем коэффициенте умножения могут оказаться в полосе пропускания фильтра последнего каскада. Поэтому паразитная ФМ наиболее опасна во входных каскадах.

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

- выбор малых значений коэффициентов умножения частоты входных каскадов;
- обеспечение высокой добротности и избирательности фильтров с целью подавления побочных гармоник, в частности, применение фильтров сосредоточенной селекции (ФСС) [103];
- построение умножителей по двухтактной схеме [104];
- выбор оптимальных углов отсечки [104, 105];

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

Высокочастотная ФМ может возникнуть в любом каскаде умножителя, если выходное сопротивление этого каскада или входное сопротивление следующего представляет собой нелинейное комплексное сопротивление. В этом случае изменение амплитуды выходного или входного напряжения приводит к различной расстройке избирательного фильтра, включенного между умножительными каскадами, и, следовательно, к изменению фаз этих напряжений. Наиболее заметно этот эффект может проявляться в транзисторных умножителях на высоких частотах [103].

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

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

Наличие естественных флуктуаций в активных и пассивных элементах вызывает флуктуации амплитуды и фазы выходных сигналов умножителей частоты [96, 105]. Для их уменьшения применяют:

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

Относительно высокий уровень флуктуаций фазы выходных сигналов многокаскадных линеек умножения частоты обусловлены, кроме всего прочего,

и тем фактом, что в низкочастотных высокостабильных кварцевых генераторах трудно обеспечить одновременное удовлетворение требований по высокой долговременной стабильности частоты и минимальному уровню фазовых шумов. Компромиссное решение этого вопроса реализуется в структурной схеме, изображенной на рис. 3.2.

Входной кварцевый генератор выбирается из условий обеспечения заданной долговременной стабильности частоты в требуемых условиях эксплуатации. Высокочастотный кварцевый генератор на частоту 200 - 500 МГц подстраивается системой фазовой автоподстройки (ФАП) по низкой частоте (рис. 3.2) и разрабатывается с максимальным отношением сигнал - шум [106]. Для реализации таких характеристик целесообразно применить мощный арсенидо-галлиевый полевой транзистор и работать на предельной мощности рассеивания на кварцевом резонаторе. Полоса пропускания или постоянная времени системы ФАП выбирается таким образом, что в СВЧ кварцевом генераторе компенсируются только медленные уходы частоты, а уровень быстрых флуктуаций фазы выходного сигнала полностью определяется соответствующей характеристикой СВЧ кварцевого генератора. Как показали расчеты и экспериментальные исследования, их уровень будет ниже уровня флуктуаций умноженного по частоте сигнала низкочастотного кварцевого генератора. Дальнейшее умножение частоты СВЧ кварцевого генератора в сантиметровом диапазоне волн приведет к возрастанию их уровня лишь на 10 - 15 дБ/Гц, что является приемлемым, так как при этом получаем уровень фазовых шумов равным 120 - 130 дБ/Гц при расстройках от несущей более чем на 1 кГц.

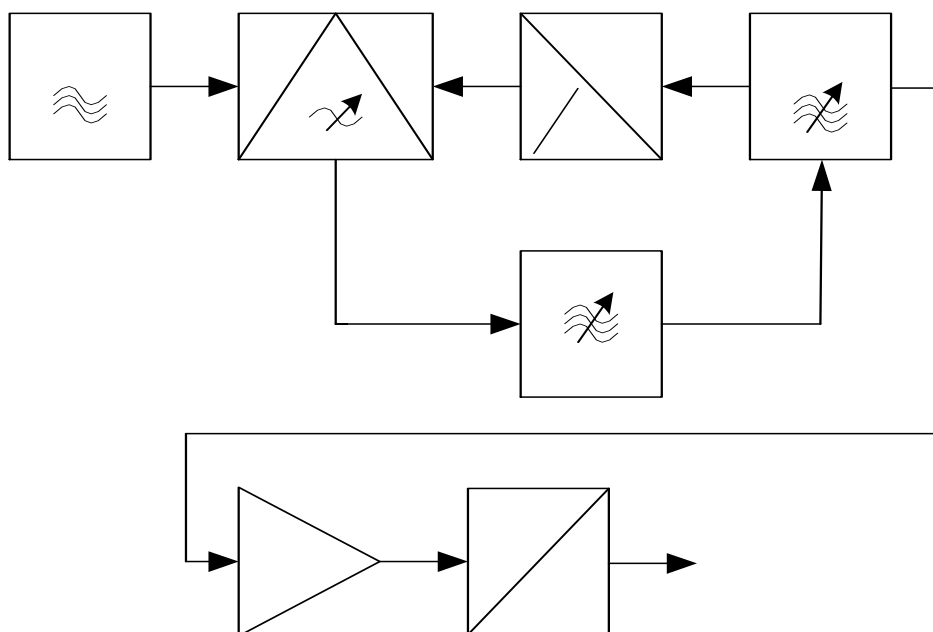


Рис. 3.2. Линейка умножения с синхронизацией СВЧ кварцевого генератора

Аналогичные результаты по спектрально-флуктуационным характеристикам можно получить и в структурной схеме, изображенной на рис. 3.3 [107]. Здесь система ФАП настроена непосредственно на заданную выходную частоту, а ее опорный сигнал получен путем умножения частоты низкочастотного кварцевого генератора. Линейка умножения частоты маломощная (Вт). В качестве подстраиваемого СВЧ генератора применяется автогенератор на арсенидо-галлиевом полевом транзисторе с высокодобротным () диэлектрическим резонатором, связанным с отрезком микрополосковой линии в цепи затвора транзистора. Резонатор изготавливается из диэлектрического материала с , например, монокристалла рутила (BaTiO_2) или керамики. Для компенсации уходов частоты такого генератора от изменений температуры окружающей среды или питающих напряжений схема содержит СВЧ варикап, электрически связанный с отрезком микрополосковой линии в цепи затвора полевого транзистора. Такой СВЧ автогенератор обеспечивает в диапазоне частот 4...10 ГГц уровень фазовых шумов 120 - 130 дБ/Гц при расстройках от несущей более чем на 10 кГц. Требуемый уровень выходной мощности (до 0,5 Вт) можно получить путем включения одного каскада усиления на транзисторе АП602Г.

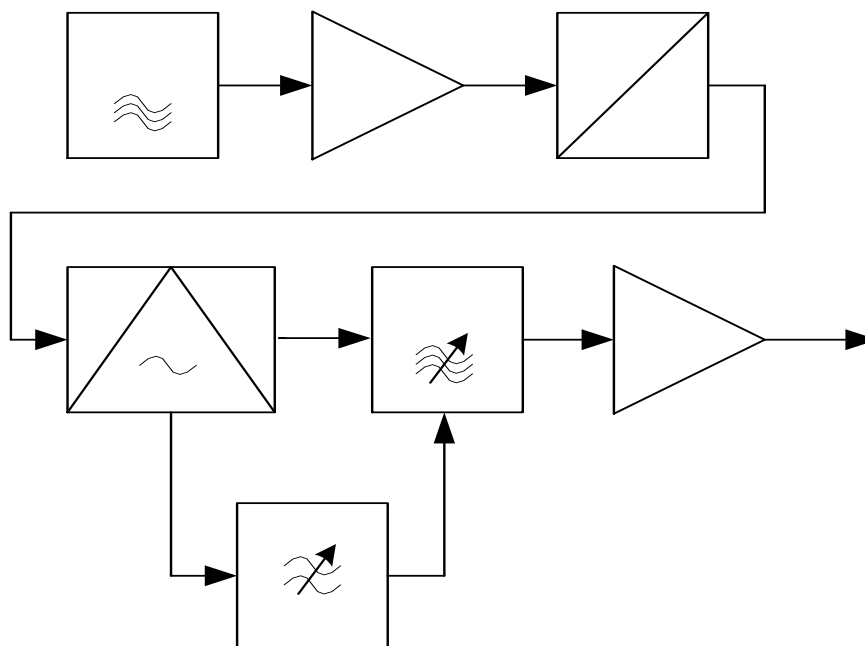


Рис. 3.3. Линейка умножения с синхронизацией СВЧ автогенератора

Для получения выходных колебаний в миллиметровом диапазоне волн можно либо умножать на варакторе полученную системой ФАП высокостабильную частоту, либо применить аналогичную рис. 3.3 схему формирования. При этом в качестве подстраиваемого генератора применяют генератор на диоде Ганна с подстройкой частоты варактором. Хорошие результаты можно получить при комбинации структурных схем, изображенных

на рис. 3.2 и рис. 3.3.

3.3. Разработка и исследование кварцевых СВЧ генераторов

В настоящее время существует большое количество различных схем кварцевых генераторов высоких частот, использующих гармоники резонаторов, которые изготавливаются до частот 100 МГц. Методики расчета генераторов с кварцевой стабилизацией частоты также разнообразны, однако, часто ограничены в частотной области генерации. Это обусловлено рядом факторов – трудностью измерения реактивных параметров транзисторов и резонаторов в диапазоне СВЧ, сложностью применяемого математического аппарата для расчета стационарного режима колебания, необходимостью учета инерционности транзисторов и других факторов. В то же время в инженерной практике необходим достаточно простой метод расчета кварцевых СВЧ генераторов, доступный при использовании исходных данных или справочных, или измеренных простыми методами.

Ниже приводится один из возможных вариантов такой методики расчета, которая справедлива в широкой частотной области и при значительных выходных мощностях [108].

Суть метода заключается в построении замкнутой цепи обратной связи, которая состоит из согласованных четырехполюсников – транзистора и согласующей цепочки и двухполюсника – кварцевого СВЧ резонатора.

Структурная обобщенная схема генератора с кварцем в цепи обратной связи представлена на рис. 3.4.

Активный четырехполюсник 1 может в общем случае содержать один или несколько транзисторов с соответствующими элементами питания по постоянному току и цепями фильтрации. Четырехполюсник 2 служит для оптимального согласования цепи ОС и сопротивления нагрузки с выходом четырехполюсника 1 для выполнения баланса амплитуд и фаз. Двухполюсник составного резонатора 3 состоит из кварцевого резонатора с цепями (элементами) компенсации или перестройки частоты. В частном случае при необходимости

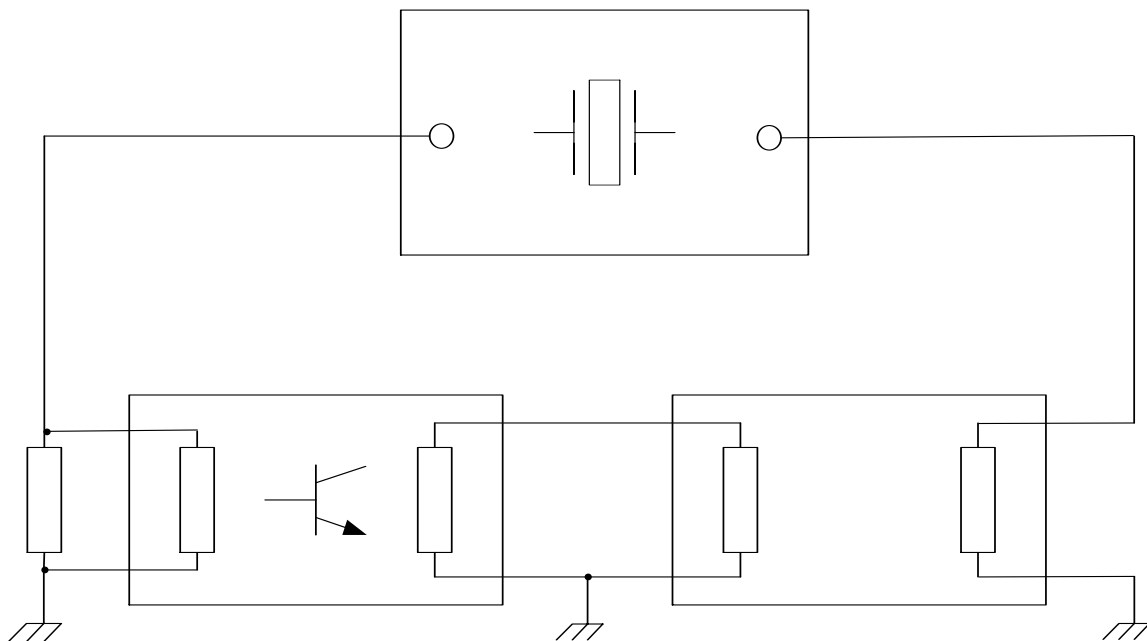


Рис. 3.4. Обобщенная структурная схема кварцевого генератора

большого сдвига фаз в цепи ОС между 1 и 2 может быть включен дополнительный трансформирующе-фазирующий четырехполюсник. Автогенераторы, выполненные по схемам индуктивной или емкостной трехточек, могут быть также представлены в виде рис. 3.4 с той лишь разницей, что составной резонатор 3 является в этом случае элементом 2. Для построения генератора по схеме рис. 3.4 необходимо знать (или измерить любыми доступными методами) комплексные значения входного и выходного сопротивлений транзистора и угол пролета (запаздывания) носителей на рабочей частоте, коэффициент передачи по мощности, сопротивление нагрузки, значение динамического сопротивления резонатора на рабочей частоте (на n -ой механической гармонике). В случае управления частотой резонатора цепь перестройки формируется так, чтобы при любом значении частоты в диапазоне перестройки цепь управления компенсировала реактивную составляющую комплексного сопротивления резонатора. Поэтому необходимо знать об изменении динамического сопротивления резонатора в диапазоне

перестройки. Эта зависимость может быть получена методом, описанным в [92].

Расчет состоит из двух этапов.

1. Расчет элементов согласования четырехполюсников 1, 2, 3. При этом используется достаточно хорошо разработанный аппарат трансформирующе-фазирующих четырехполюсников.

2. Расчет энергетических соотношений стационарного режима. В качестве примера приведены данные по величинам проводимостей транзистора ГТ330, который использовался при построении генераторов:

При $\omega = 10^6$ рад/с, измеренные значения коэффициента передачи равны соответственно: $K_{11} = 0,5$ при $\omega = 10^6$ МГц; $K_{12} = 0,1$ при $\omega = 10^6$ МГц.

Для расчета энергетических соотношений стационарного режима воспользуемся упрощенной структурной схемой. При этом положим, что реактивные компоненты X_{11} , X_{12} влияют на фазовые соотношения в генераторе (на баланс фаз), то есть на частоту генерации, и не влияют на баланс амплитуд. Баланс фаз обеспечивается с помощью фазирующего четырехполюсника 2.

Рассмотрим баланс амплитуд. Из рис. 3.5 видно, что выходная мощность транзистора выделяется в нагрузку, а часть ее через цепь ОС поступает на вход (базу) транзистора, причем некоторая доля входной мощности рассеивается на кварцевом резонаторе:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{нагр}} + P_{\text{ОС}} + P_{\text{рез}}. \quad (3.1)$$

Коэффициент передачи транзистора по мощности

$$K_{\text{мощ}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (3.2)$$

Обозначим через η коэффициент использования добротности резонатора:

$$\eta = \frac{P_{\text{рез}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (3.3)$$

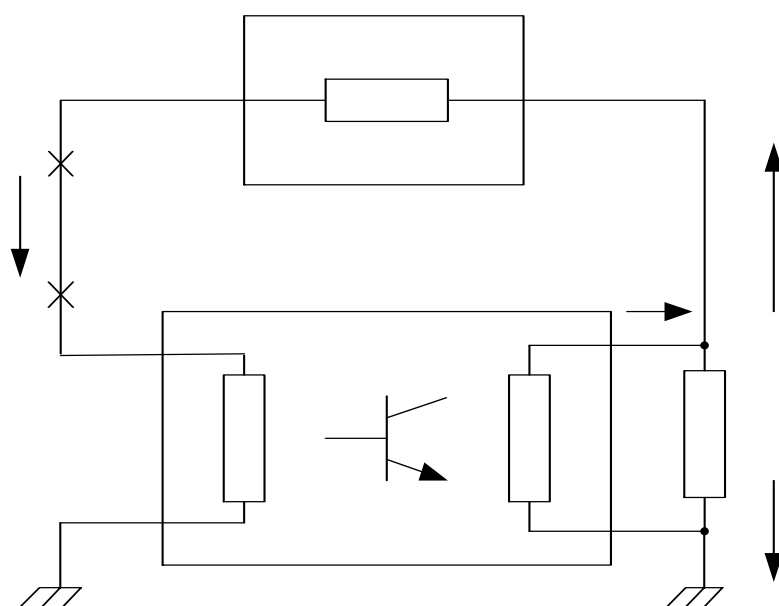


Рис. 3.5. Эквивалентная схема кварцевого генератора

где — эквивалентное сопротивление потерь составного резонатора.
 Полагая , схему рис. 3.5 можно представить в виде рис. 3.6.

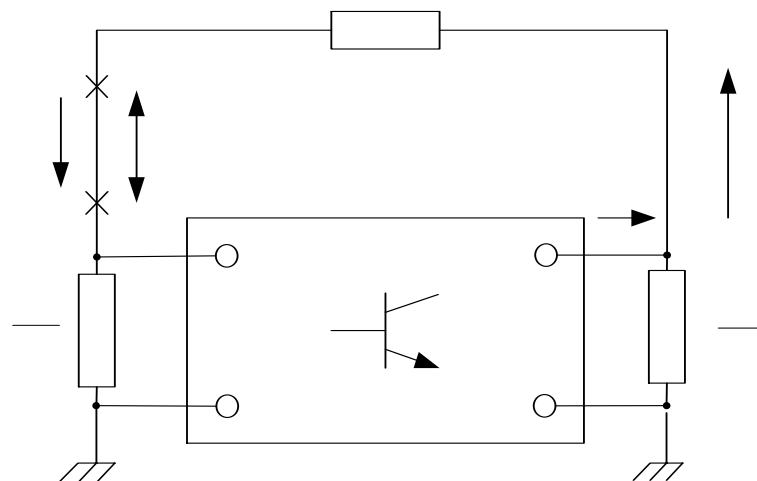


Рис. 3.6. Эквивалентная схема кварцевого генератора

Подключение кварцевого резонатора к точкам с сопротивлениями снижает его добротность до некоторой величины

$$Q = Q_0 \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.4)$$

где Q_0 – ненагруженная добротность кварцевого резонатора.
Из выражений (3.2) - (3.4) имеем

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) является условием баланса амплитуд генератора в стационарном режиме. После преобразования (3.5) получим выражение для выходной колебательной мощности генератора:

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.6)$$

На практике обычно . Тогда имеем:

$$\dots \quad (3.7)$$

Из выражения (3.6) видно, что при , так как вся выходная мощность расходуется на поддержание самовозбуждения.

Обозначим через коэффициент снижения добротности резонатора:

$$\dots \quad (3.8)$$

Коэффициент передачи цепи обратной связи равен:

$$\dots \quad (3.9)$$

Отсюда:

$$\dots \quad (3.10)$$

Используя выражение для коэффициента регенерации , нетрудно получить:

$$\dots \quad (3.11)$$

Из выражения (3.11) видно, что при некотором заданном коэффициенте , который обычно выбирается равным 2, увеличения можно добиться лишь посредством повышения . К этому выводу также можно прийти из анализа выражения (3.6). При повышении требуемый коэффициент регенерации может быть обеспечен при меньших значениях . В то же время для обеспечения максимального сильное снижение нежелательно. Оптимальным с этой точки зрения будет значение , не вызывающее

нелинейных эффектов (многочастотности) колебаний в непосредственной близости к частоте механической гармоник резонатора. Эта мощность обычно оговаривается на каждый тип резонатора.

Для отечественных резонаторов на 250 МГц величина мВт. В связи с вышеизложенным удобно выразить через , , :

$$; \quad (3.12)$$

$$. \quad (3.13)$$

Реальную величину можно определить из формулы (3.11), а затем по формуле (3.13) можно вычислить при заданном значении максимально достигнутую выходную мощность. Используя выше приведенные соотношения достаточно просто произвести энергетический расчет генератора при заданном , $R_{кв}$ и .

По известным (измеренным) значениям и, зависимости можно определить коэффициент трансформации и фазовый сдвиг 2, после чего составить схему генератора.

Рассмотрим энергетические соотношения в генераторе с разомкнутой цепью ОС (этот прием, используемый для отработки генератора и его настройки, будет описан ниже). При размыкании цепи ОС в точках и

подключении к резистору со стороны входа сопротивления , получим эквивалентную схему рис. 3.7.

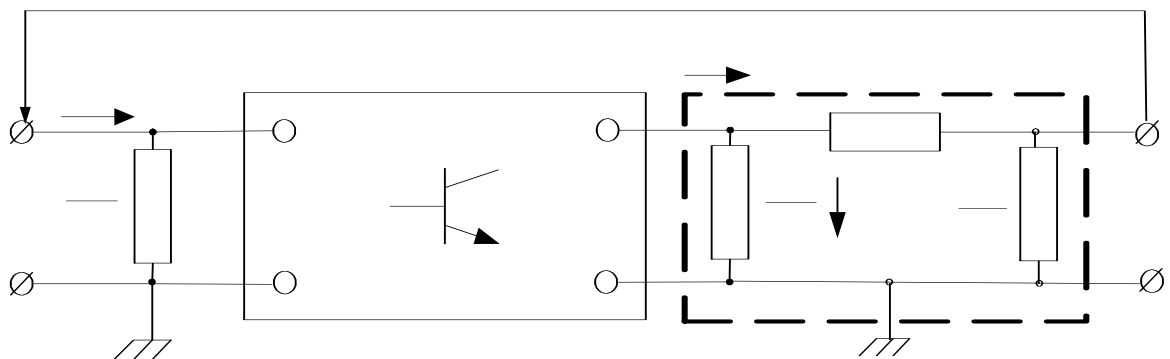


Рис. 3.7. Эквивалентная схема генератора с кварцевым резонатором

Обозначив амплитуду высокочастотного колебания в точке Б через U_B , можно записать:

$$U_B = U_{in} \cdot K_{12} \quad (3.14)$$

Коэффициент передачи по мощности четырехполюсника с кварцевым резонатором (обозначен пунктирной линией) будет равен:

$$K_{12} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.15)$$

Коэффициент передачи разомкнутой системы определится из соотношения:

$$K_{12} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.16)$$

Откуда имеем:

$$K_{12} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.17)$$

Если $U_B = U_{in}$, то $K_{12} = 1$.

Мощность на выходе разомкнутой системы зависит от следующим образом:

$$P_{out} = P_{in} \cdot K_{12}^2 \quad (3.18)$$

Для анализа и расчета кварцевого СВЧ генератора необходимо, таким образом, знать U_B и K_{12} транзистора. Поскольку эти параметры транзистора в нелинейном режиме работы зависят от уровня входной мощности, их следует измерять при рассчитанном уровне P_{in} . Параметры кварцевого

резонатора также измеряются экспериментально.

На высоких частотах необходимо тщательно выбирать и прочие элементы схемы – конденсаторы и, особенно, катушки индуктивности, для последних следует измерить их резонансную частоту и величину потерь.

Отработка схемы кварцевого генератора, как уже упоминалось, производится с разомкнутой цепью ОС. При этом измеряются и устанавливаются необходимые амплитудные (энергетические) и фазовые соотношения. Измерения производятся по схеме рис. 3.8.

Размыкание цепи ОС желательно производить в точке, имеющей только активную составляющую импеданса, близкую к волновому сопротивлению измерительных приборов (в нашем случае 750 Ом). В случае невозможности выполнения этого условия в точках и применяется параллельное или последовательное включения резисторов с учетом их влияния на показания измерительных приборов.

Величина затухания аттенюатора выбирается для обеспечения в точке расчетного значения мощности . Затухания аттенюатора и (и) выбираются из условия обеспечения нужных величин сигналов на измерительном и вспомогательном входах прибора 1. Величина затухания должна превышать величину на значение коэффициента усиления схемы 2 между точками и ();

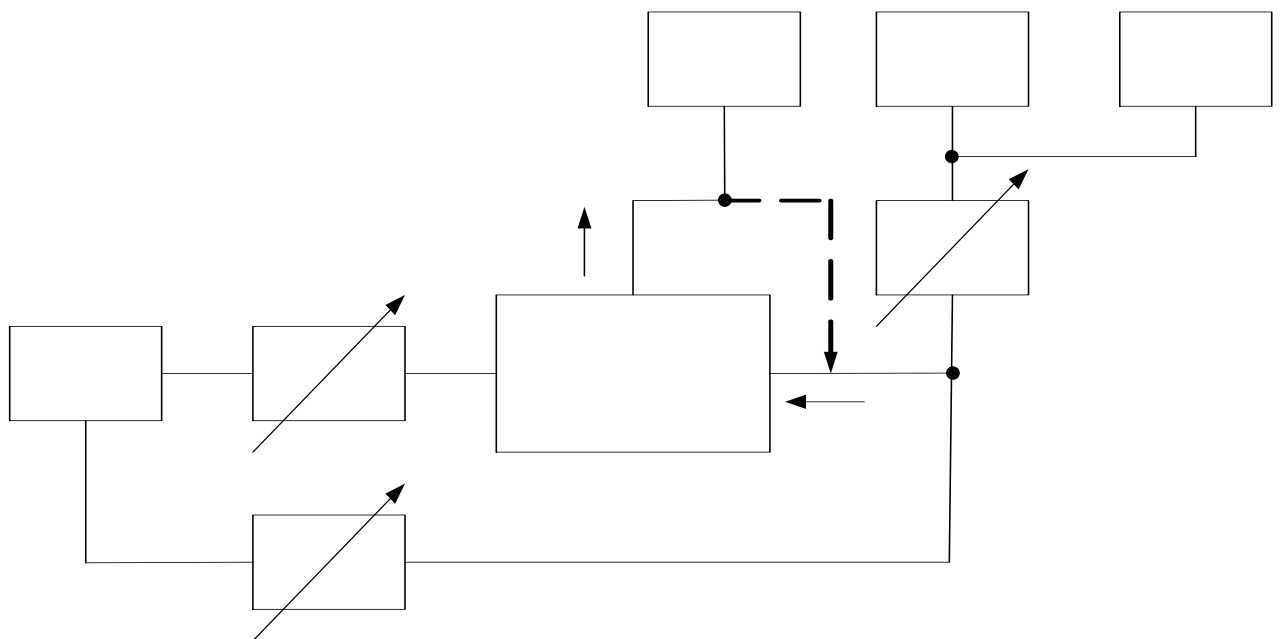


Рис. 3.8. Структурная схема установки измерения характеристик схемы кварцевого генератора:

- 1 – измеритель полных сопротивлений;
- 2 – исследуемая схема;
- 3 – измеритель мощности;
- 4 – генератор сигналов;
- 5 – частотомер;

, , – аттенюаторы

Применение прибора 1 в режиме измерения комплексных коэффициентов передачи по мощности позволяет производить непосредственное измерение

– фазового сдвига между точками и коэффициента регенерации :

$$, \quad (3.19)$$

где – затухание, считываемое с диаграммы комплексных коэффициентов передачи по мощности прибора 1.

Полагая, что реактивные элементы схемы генератора имеют малые потери, оценим величину потерь :

$$, \quad (3.20)$$

где

.

При замыкании цепи ОС может произойти незначительная расфазировка схемы, которая обычно не превышает % и автоматически компенсируется смещением частоты генерации относительно частоты последовательного

резонанса . В граничных точках полосы пропускания резонатора ()

сдвиг достигает и коэффициент регенерации уменьшается в 2 раза.

На рис. 3.9 представлена схема "синтезированного" по приведенной методике кварцевого генератора на частоту 250 МГц. Генератор собран на

транзисторе ГТ-330, напряжение питания – 5 В, ток – 11 мА, мощность на выходе 1,8 мВт.

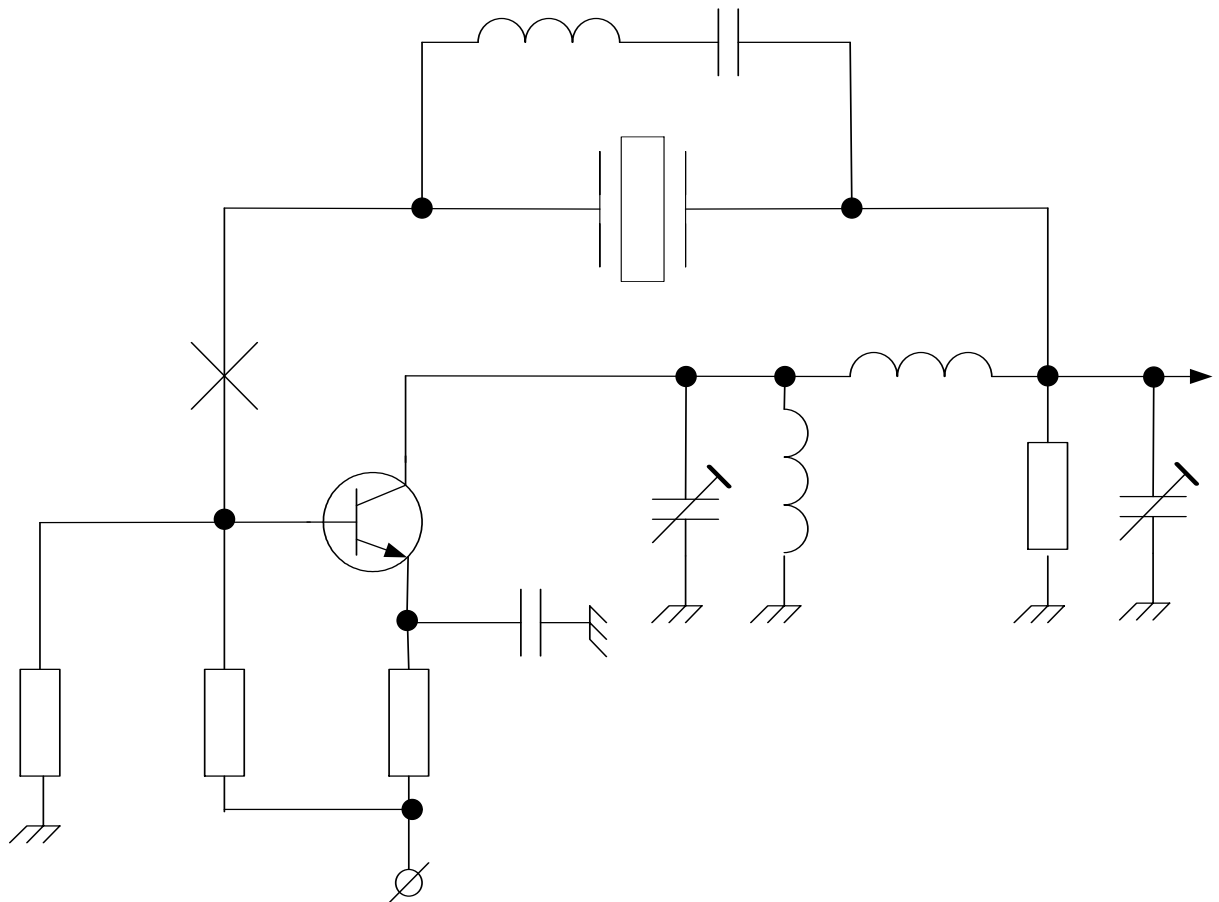


Рис. 3.9. Принципиальная схема кварцевого генератора на 250 МГц

Кварцевый генератор построен так, что может возбуждаться в диапазоне частот 100...300 МГц при смене катушек индуктивности (спиральные, из провода м).

При настройке схемы контур настраивается по максимуму показаний прибора 1 (рис. 3.8). Регулировкой номиналов , ,

добиваются необходимого распределения мощностей между цепью ОС и нагрузкой (выставляется необходимый коэффициент регенерации).

Сопоставляя показания приборов 1 и 2 (рис. 3.8), можно определить величину мощности, рассеиваемой на кварцевом резонаторе. Таким образом обеспечивается баланс амплитуд. Баланс фаз устанавливается настройкой фазирующей цепи .

Опыт настройки схем показывает, что при замыкании цепи обратной связи дополнительная подстройка элементов не требуется, частота генерации отличается от частоты последовательного резонанса не более чем на 0,5 кГц.

В практике разработки схем могут быть некоторые принципиальные отличия от схемы рис. 3.9, которые, как правило, относятся к трансформирующе-фазирующим цепям.

На рис. 3.10 приведены энергетические характеристики синтезированного СВЧ генератора, из которых следует, что экспериментальные зависимости

отличаются от теоретических не более чем на 10 - 13 %

Как было рассмотрено ранее (раздел 1) одним из важных показателей при воздействии электромагнитных излучений на биологические объекты является нестабильность частоты источника СВЧ излучения, которая, в основном, определяется кварцевым генератором.

Измерение нестабильности частоты синтезированного генератора проведено на частоте 250 МГц. В качестве опорного генератора использован высокостабильный кварцевый генератор на частоте 5 МГц с последующим умножением частоты. Структурная схема измерения приведена на рис. 3.11.

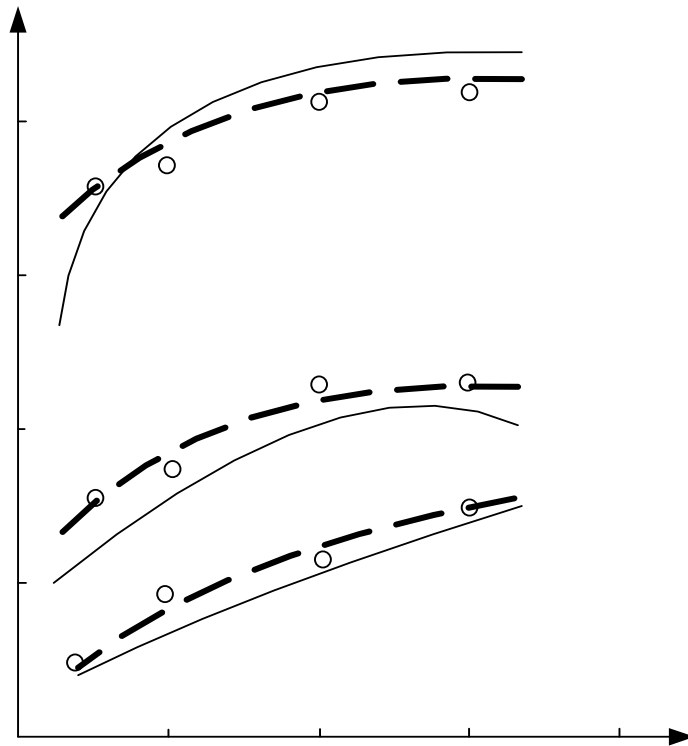


Рис. 3.10. Энергетические характеристики СВЧ генератора:

- 1 – теоретическая зависимость ;
- 2 – экспериментальная зависимость ;
- 3 – экспериментальная зависимость мощности, рассеиваемой на кварцевом резонаторе ;
- 4 – теоретическая зависимость мощности, рассеиваемой на кварцевом резонаторе ;
- 5 – экспериментальная зависимость мощности на выходе системы при разомкнутой цепи обратной связи ;
- 6 – теоретическая зависимость мощности на выходе системы при разомкнутой цепи обратной связи

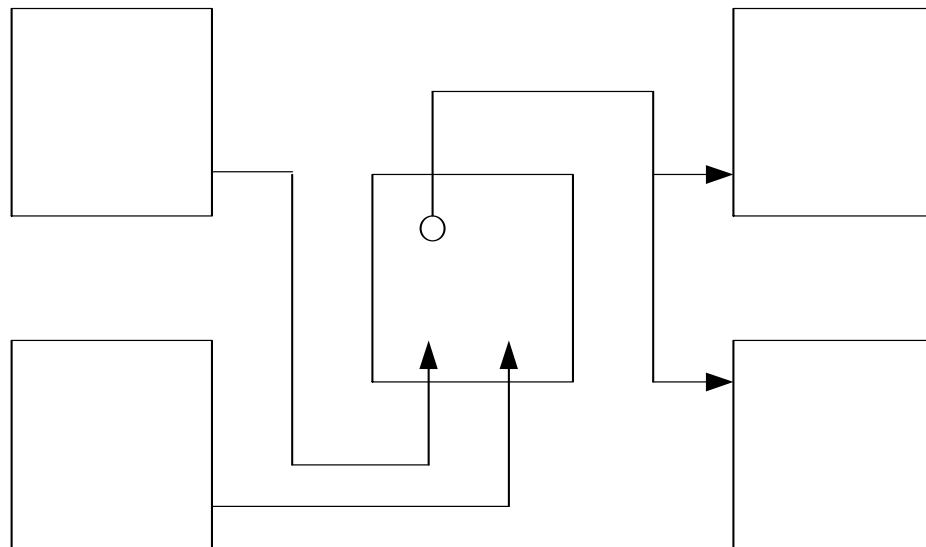


Рис. 3.11. Структурная схема измерения нестабильности генератора:

- 1 – синтезированный генератора на частоту 250 МГц;
- 2 – опорный кварцевый генератор;
- 3 – компаратор фазовый автоматизированный образцовый (Ч7-42)
- 4 – анализатор спектра СЧ-48;
- 5 – анализатор спектра СЧ-73

Как видно из структурной схемы измерений сигналы от обоих генераторов СВЧ поступают на входы 1 и 2 ("01" и "00") компаратора Ч7-42. Прибор Ч7-42 измеряет как нестабильность частоты за время измерения (1 - 10 -3) с, так и с помощью внешнего анализатора спектра спектральную плотность мощности флуктуаций фазы (СПМФФ), которая рассчитывается по формуле [102]:

$$, \quad (3.21)$$

где – показания анализатора спектра, В;

– коэффициент передачи ФД, В/рад;

– коэффициент усиления усилителя;

– полоса пропускания анализатора спектра.

В качестве анализаторов спектра применялся анализатор типа СЧ-48 в диапазоне 5 Гц - 60 кГц и типа СЧ-29 в диапазоне частот 0,05 Гц - 100 Гц.

Среднеквадратическое относительное отклонение частоты было определено из выражения [107, 109]:

$$\dots \quad (3.22)$$

Результаты нестабильности частоты приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Нестабильность частоты генератора					
1	Время измерения	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10 0
2		10^{-6}	10^{-7}		

Как следует из результатов измерения, кратковременная нестабильность частоты генератора составляет 10^{-6} за время измерения 10^{-3} с, а долговременная нестабильность частоты – за время измерения 1 с.

3.4. Особенности в разработке управляемых по частоте кварцевых генераторов

Практическое использование СВЧ источников излучения для воздействия на биологические объекты с лечебной целью требует перестройки частоты генератора в пределах 2 % от основной частоты.

Расчет кварцевого генератора с управлением частоты практически не отличается от приведенного выше. Особенность заключается лишь с учетом того, что кварцевый резонатор в этом случае представляется совокупностью элементов управления и самого резонатора, именно в виде некоторого сложного резонатора (составного), который строится так, чтобы при перестройке частоты каждый установленный номинал соответствовал последовательному резонансу сложного резонатора.

Таким образом, для синтеза схемы управляемого генератора необходимо составить (сложную) схему составного резонатора и измерить его параметры.

Управление частотой генератора может осуществляться несколькими способами [106]:

- а) с использованием управляемой напряжением барьерной емкости перехода полупроводникового диода (варикапа);
- б) с применением железисто-иттриевых гранатов (ЖИГ);
- в) изменением напряжения питания коллектора;
- г) за счет изменения диэлектрической или магнитной проницаемости вещества, заполняющего колебательную систему.

С помощью первых двух способов возможно получение больших коэффициентов перекрытия по частоте, и в настоящее время они широко используются в радиоэлектронной аппаратуре.

Электронная перестройка напряжением коллекторного питания сопряжена со значительным изменением генерируемой мощности и требует мощную схему управления, поэтому, в основном, используется при подстройке частоты в небольших пределах, например, в системе АПЧ.

Последний способ не получил распространения на практике и представляет лишь академический интерес.

Перестройку с применением железисто-иттриевых гранатов перспективно использовать в диапазоне частот выше 1 ГГц. ЖИГ обладают следующими достоинствами: высокой добротностью; низким напряжением перестройки; линейной вольт-частотной характеристикой перестройки.

К основным недостаткам этого способа перестройки следует отнести требования большего тока и невысокую скорость перестройки.

Перестройка с помощью варикапов в настоящее время вплоть до частот порядка 10 ГГц представляется наиболее приемлемой. Варикапы обладают следующими достоинствами: не требуют подвода мощности для управления частотой; обеспечивают высокую скорость перестройки; имеют приспособленность к монолитным микроволновым схемам.

Исходя из приведенного сравнения, можно заключить, что обеспечение требуемой перестройки частоты в разрабатываемом автогенераторе целесообразно производить с помощью варикапов. Проведем более подробное рассмотрение этого метода.

Как известно, изменяя напряжение на варикапе, подключенном к колебательному контуру, можно обеспечить управление резонансной частотой контура.

При включении варикапа в колебательную систему к нему, кроме управляющего напряжения $U_{уп}$, прикладывается еще и высокочастотное напряжение $U_{вч}$ (в грубом приближении косинусоидальной формы).

Большая амплитуда высокочастотного напряжения $U_{вч}$ на переходе нарушает нормальную работу варикапа. За счет нелинейности его характеристики форма ВЧ напряжения сильно искажается относительно косинусоидальной, в выходном сигнале автогенератора появляются гармонические составляющие. Если напряжение смещения на переходе по абсолютной величине меньше амплитуды высокочастотного напряжения $U_{вч}$ на нем, то имеет место попадание пиков этого напряжения в положительную область, сопровождающееся отпираанием перехода и детектированием ВЧ напряжения. Сопротивление варикапа со стороны управляющего напряжения падает. Ток, протекающий через варикап, создает дополнительное автосмещение за счет падения напряжения на сопротивлениях цепи управления варикапом. Закон изменения частоты, в зависимости от управляющего

напряжения, нарушается. Емкость варикапа при открытом переходе резко увеличивается за счет диффузионной составляющей. Частота может изменяться скачкообразно, генерируемый сигнал оказывается загрязненным побочными составляющими. Сильное увеличение активной составляющей импеданса варикапа приведет к увеличению потерь в контуре и к резкому падению выходной мощности автогенератора.

Исходя из сказанного, с учетом высокочастотного напряжения, рабочий интервал управления напряжением на варикапе оказывается ограниченным, с одной стороны, условием работы варикапа только в области отрицательных смещений, с другой – величиной обратного пробивного напряжения на переходе. Отрицательные управляющие напряжения на варикапе можно менять в пределах, определенных соотношениями:

Требуемый диапазон изменения управляющих напряжений должен укладываться в указанные пределы. При выборе варикапа следует также учитывать величину допустимой рассеиваемой мощности. Опыт разработки схем управляемых генераторов говорит о том, что динамическое сопротивление резонатора должно мало изменяться в диапазоне перестройки, суммарное сопротивление потерь цепи управления не должно превышать величину динамического сопротивления резонатора, поскольку может возникнуть перескок частоты.

На рис. 3.12 приведена схема перестраиваемого кварцевого генератора. Схема была рассчитана по методике, изложенной выше. В качестве варикапов были использованы приборы с параметрами:

На рис. 3.13 показаны зависимости перестройки, выходной мощности и коэффициента регенерации в пределах изменения управляющего напряжения от $-0,5$ до 30 В.

Из графиков видно, что мощность генератора и коэффициент регенерации в пределах перестройки изменяются незначительно. Характеристика перестройки частоты составляет более 5 МГц и в середине диапазона перестройки имеет почти линейную зависимость от .

3.5. Анализ расчета спектральных характеристик выходного сигнала в умножителях частоты

Разработка источников СВЧ колебаний на основе транзисторно-варакторных цепочек требует проведения расчета спектральных характеристик выходного сигнала.

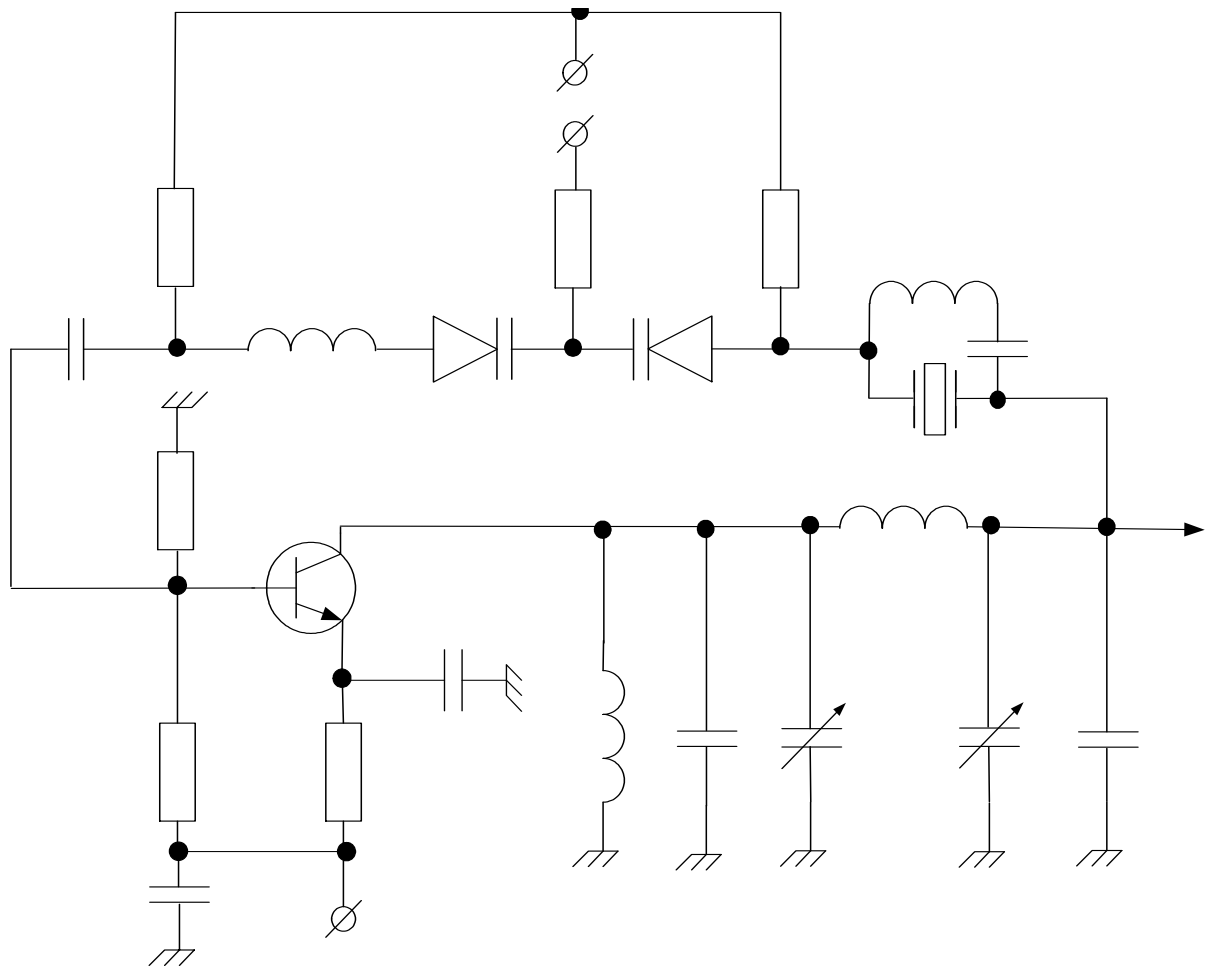


Рис. 3.12. Принципиальная схема кварцевого генератора с электронной перестройкой частоты

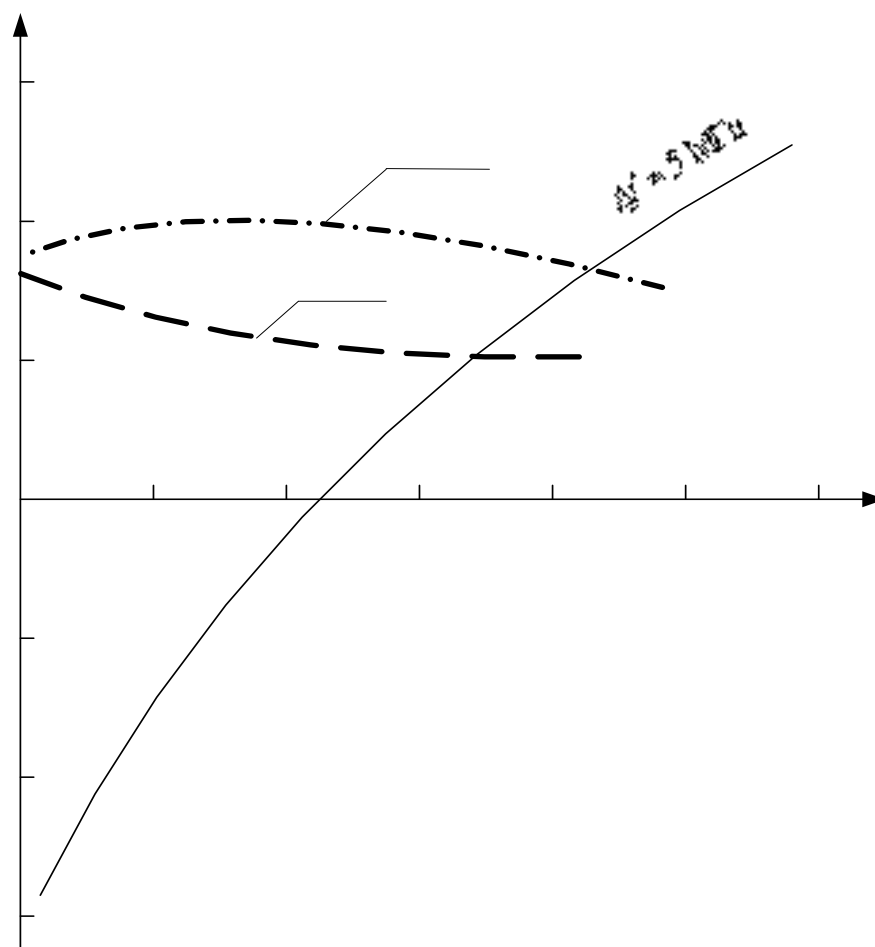


Рис. 3.13. Зависимость перестройки (), выходной мощности () и коэффициента регенерации () от изменения

Расчет спектральных характеристик рассмотрим на примере двух возможных вариантов усилительно-умножительных линеек с выходной частотой 1400 МГц и имеющих структурные схемы с коэффициентами умножения: ; [96];

Проведем сравнительную оценку таких вариантов структурных схем по спектральным характеристикам выходного сигнала.

В первом и втором вариантах умножителей первый каскад имеет одинаковый коэффициент умножения . Будем учитывать в спектре выходного сигнала умножителей только две побочные составляющие, ближайшие к колебаниям выделенной частоты. Они, как правило, будут иметь

и наибольшую амплитуду по сравнению с другими составляющими. После фильтра первого каскада умножения имеем спектр с тремя составляющими:

; ; . На выходе второго умножительного каскада с коэффициентами умножения для первого варианта структурной схемы умножителя и для второго варианта будем иметь спектр, обязанный своим происхождением, как умножению частоты, так и модуляции.

Действительно, во-первых, частоты ; ; умножаются на и, во-вторых, каждое колебание частот (исходных и умноженных) промодулируется частотой , полученной в результате выделения на одном из нелинейных элементов умножителя. На выходе второго умножителя получаем бесконечный дискретный спектр с шагом . Выделим следующие, представляющие интерес, колебания частот:

I

II

Аналогично можно записать значения частот для спектра на выходе третьего каскада умножения () первого варианта структурной схемы. Однако на выходе умножителя включен полосовой фильтр, что позволяет исключить из рассмотрения частоты и . Будем рассматривать только интервал частот . Для оценки амплитуд этих составляющих считаем, что на исследуемый умножитель частоты поступает три гармонических колебания:

В пределах исследуемого интервала частот на нелинейном элементе второго умножителя частоты происходят следующие процессы: из колебаний (3.23) образуется колебание частоты ; частота умножается на ; колебание модулируется по амплитуде с частотой .

Образование частоты можно рассматривать как результат гетеродинного детектирования колебаний и . При на нагрузке умножителя выделяется напряжение

$$U_{\text{д}} = K_{\text{д}} U_{\text{в}} \quad (3.24)$$

где $K_{\text{д}}$ – коэффициент передачи детектора.

В выражении (3.24) напряжение резонансной частоты является третьим слагаемым . При этом от соотношения сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления диода зависит коэффициент передачи детектора. Так как на выходе умножителя включен фильтр со средней частотой , то сопротивление нагрузки и коэффициент передачи детектора являются функциями от и : , . Следовательно,

$$K_{\text{д}} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{в}}} \quad (3.25)$$

Результат умножения частот на можно записать в виде:

$$U_{\text{в}} = U_{\text{в}0} \cos(\omega_0 t) \quad (3.26)$$

где $K_{\text{д}}$ – коэффициент передачи по напряжению второго умножителя частоты при умножении в раз.

Амплитуда умноженного по частоте колебания, согласно (3.26), равна:

$$U_{\text{в}} = U_{\text{в}0} \cos(\omega_0 t) \quad (3.27)$$

Амплитудная модуляция напряжения (3.26) осуществляется диодным модулятором, который находится под воздействием двух напряжений

В токе диода будет боковая составляющая:

$$, \quad (3.28)$$

где μ – коэффициент амплитудной модуляции;

ω_m – динамическая крутизна характеристики модулятора;

$R_{\text{нл}}$ – сопротивление нелинейного элемента в рабочей точке и нагрузке.

Так как $\omega_m \gg \omega$, то

$$. \quad (3.29)$$

Отношение основного колебания на выходе умножителя к полученному боковому будет равно:

$$. \quad (3.30)$$

В полученных выражениях (3.25), (3.29), (3.30) функции μ и ω_m

зависят от характеристик фильтра, включенного на выходе второго умножителя частоты. Такие фильтры разрабатываются с характеристиками, которые обеспечиваются только в сравнительно узком диапазоне, вблизи частоты настройки, в результате чего аналитическое задание функций μ и ω_m весьма затруднительно.

Таким образом, полученные выражения (3.24) и (3.30) иллюстрируют физический смысл и раскрывают качественную сторону процессов образования боковых составляющих, что позволяет наметить пути оптимизации каскадов умножения частоты при их разработке. Полученные при этом соотношения и выводы являются достаточно сложными и требуют проведения измерений

дополнительных параметров эквивалентных схем транзисторов.

С достаточной для эскизных расчетов и практических целей точностью можно воспользоваться выводами ряда теоретических исследований [99].

Воспользуемся выводами этих работ для оценки степени подавления

побочных составляющих с частотой двух рассматриваемых структур умножителей частоты: и .

Будем считать, что первый каскад умножения () идентичен и обеспечивает без применения специальных сложных селектирующих систем

дБ. Тогда для первого и второго вариантов структурной схемы имеем:

[дБ];

[дБ].

Полученные значения вычислены без учета подавления побочных составляющих избирательными цепями усилителей, которые включаются

между умножительными каскадами. Однако сравнение и показывает, что в первом варианте линейки умножения необходимо предусмотреть дополнительный каскад селекции. Кроме того, дополнительный каскад умножения частоты () требует для обеспечения необходимых энергетических характеристик два - три каскада усиления по мощности, что ухудшает объемно-массовые и энергетические характеристики линейки умножения такого варианта.

Аналогичную разность в подавлении побочных составляющих таких вариантов линейки умножителя частоты мы получим и для флуктуационных составляющих, находящихся от несущей не более чем на 1 кГц, с той лишь разницей, что мы их не сможем подавить дополнительными каскадами селекции. Таким образом, по всем характеристикам преимущество имеет второй вариант структурной схемы.

Из полученных результатов следует, что разработанная методика позволяет оценить подавление побочных составляющих в спектре выходных сигналов умножительных устройств с различными коэффициентами умножения.

3.6. Выводы

1. Анализ вариантов структурных схем формирования колебаний в СВЧ диапазоне показал, что по простоте работы и надежности, объемно-весовым показателям следует отдать предпочтение схеме с прямым умножением частоты кварцевого генератора (подавление побочных составляющих в спектре выходного сигнала более 50 дБ), а спектрально-флуктуационным

характеристикам (подавление побочных составляющих в спектре выходного сигнала до 100 дБ) – схемам с фазовой подстройкой частоты.

2. Для разработки умножителей СВЧ тракта источников электромагнитного излучения, с учетом требований по спектральным характеристикам следует использовать разработанную методику, которая применима для широкого класса умножительных устройств с различными коэффициентами умножения.

3. Для построения схем кварцевых генераторов в диапазоне 100...300 МГц, следует применять разработанную методику по расчету основных параметров генератора (мощность рассеивания на кварце, выходная мощность, элементы согласующих цепей) с подстройкой частоты в пределах 2 % от основной частоты генератора.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ ДИАПАЗОНА НА КОСТНУЮ ТКАНЬ ЖИВОТНЫХ

4.1. Цель и программа экспериментальных исследований

Целью данных экспериментов была проверка достоверности теоретических подходов и моделей, описывающих процесс воздействия низкоэнергетических электромагнитных излучений СВЧ диапазона на конечности животных с костной патологией.

В соответствии с целью, программа экспериментальных исследований, предусматривает:

- исследование экспериментального образца источника СВЧ излучения (снятие режимных характеристик; определение граничных значений параметров; настройка блоков);
- исследование воздействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона на костную ткань:
 - 1) установление зависимости электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани с различными биофизическими характеристиками ($\epsilon_{к.т.}^* = 8.35-7.83$; $\rho = 1850-1930 \text{ кг/м}^3$; $r = 5-8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) от параметров воздействующего электромагнитного поля СВЧ диапазона (частоты, плотности потока мощности, экспозиции).
 - 2) статистическая оценка результатов измерений и определение граничных значений параметров ЭМП СВЧ диапазона (частоты, плотности потока мощности, экспозиции) интенсифицирующих процесс восстановления костной ткани конечностей животных.
- уточнение технических требований к источнику СВЧ излучения с учётом результатов экспериментальных исследований и технологических требований к режиму облучения;
- исследование по применению воздействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона на костную ткань конечностей животных в производственных условиях.

4.2. Исследования источника СВЧ излучения

На основании вышеизложенных требований был разработан источник СВЧ колебаний с параметрами: выходная частота 3,75 ГГц; выходная мощность

Вт; подавление побочных гармоник в спектре выходного сигнала

дБ; частота задающего кварцевого генератора 250 МГц с перестройкой по частоте в пределах 2 %; коэффициент умножения ; потребляемая мощность 30 Вт; при изменении питающего напряжения в пределах 10 %

мощность выходного сигнала изменяется не более чем на 5 %.

Кварцевый генератор собран на транзисторе 2Т306Б (рис. 3.12) и построен так, что может возбуждаться в диапазоне 100...300 МГц при смене катушек индуктивности . Катушки индуктивности спиральные, из провода

На рис. 4.1 приведен график зависимости частоты кварцевого генератора (КГ) от напряжения питания, который показывает, что при изменении напряжения питания на % частота КГ изменяется менее чем на 1 % от номинального значения.

Из экспериментальных зависимостей (рис. 4.2) видно, что при повышении температуры выходная мощность КГ увеличивается, а частота изменяется в сторону уменьшения.

Сигнал с выхода кварцевого генератора поступает на усилитель (рис. 4.3).

Усилитель собран на транзисторе (ГТ 330) и имеет соответствующую полосу усиления, так что его перестройка не требуется. С выхода усилителя сигнал с уровня 0,3 В поступает на утроитель частоты и трехкаскадный усилитель мощности. В утроителе частоты, выполненном не бескорпусном транзисторе (2Т324А), для обеспечения необходимого подавления побочных гармоник входной частоты в коллекторную цепь включена система связанных контуров , , , . На рис. 4.4 снята экспериментальная амплитудная характеристика умножителя частоты.

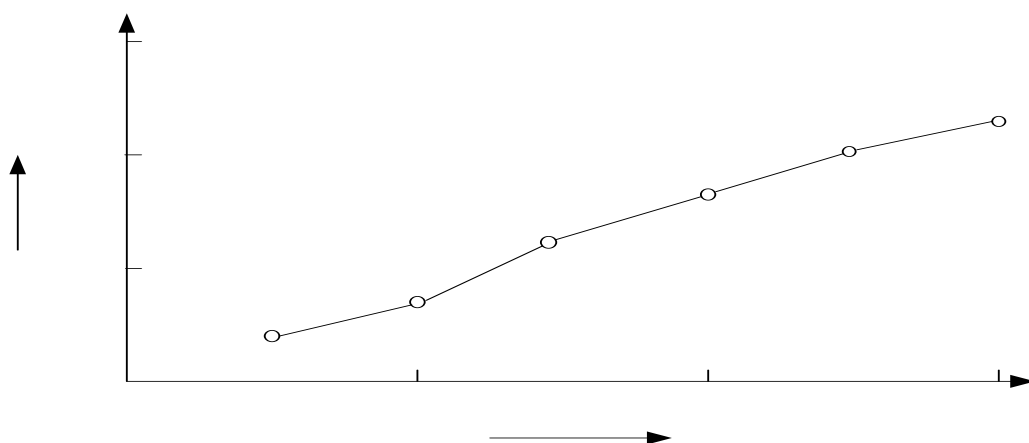


Рис. 4.1 График зависимости частоты кварцевого генератора от напряжения питания

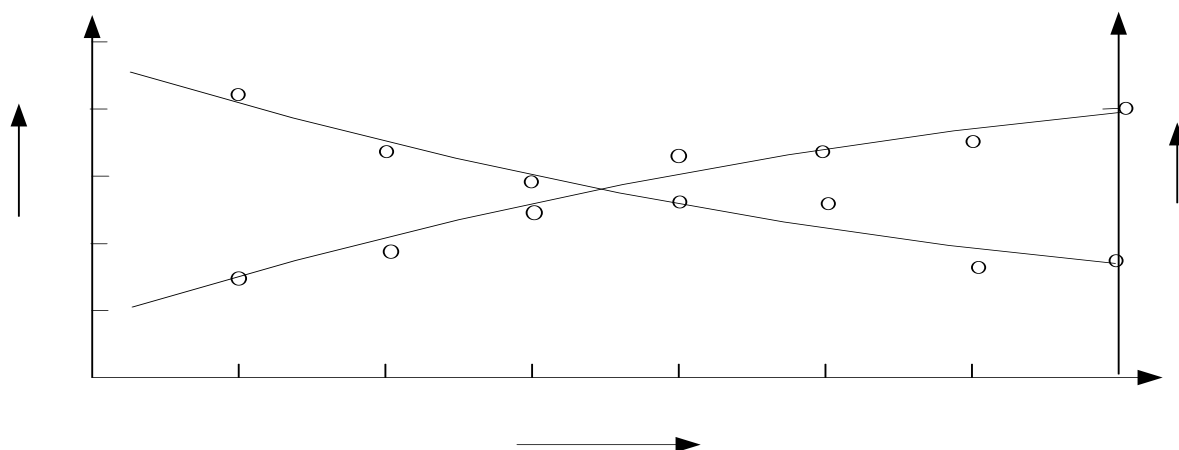


Рис. 4.2. График изменения частоты и выходной мощности кварцевого генератора от температуры

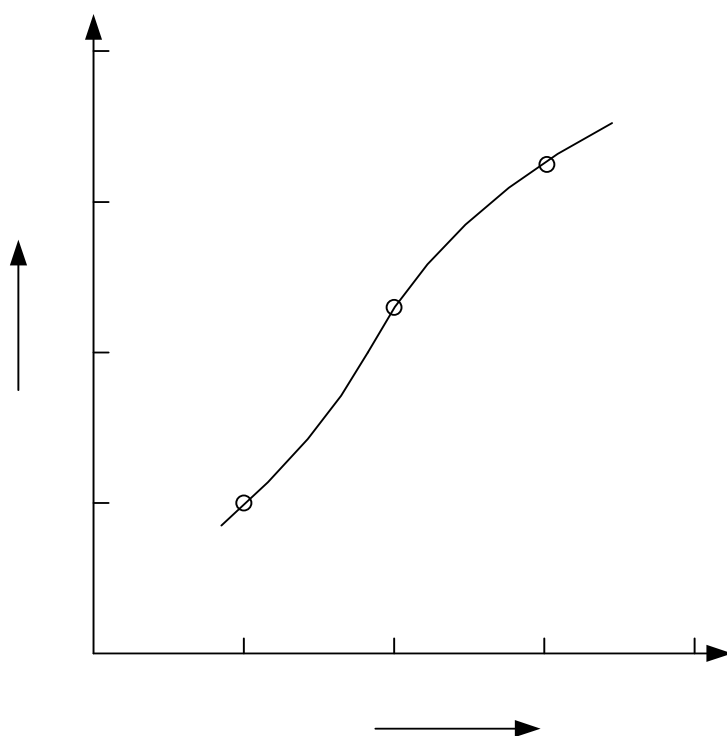


Рис. 4.4. Амплитудная характеристика умножителя 250 МГц 3

Транзисторные усилители и умножители частоты в диапазоне СВЧ характеризуются рядом особенностей, связанных со спецификой этого диапазона. К этим особенностям относятся, в частности, сильное влияние на характеристики усилителей и умножителей частоты реактивных паразитных параметров транзисторов и внешних элементов, относительно малый коэффициент усиления, сложность эквивалентных схем транзисторов.

Указанные особенности делают задачу рассмотрения транзисторных усилителей и умножителей частоты СВЧ более сложной, чем на низких частотах, и, поэтому, при проектировании и регулировке усилителей и умножителей частоты пользуются понятием коэффициента стоячей волны (КСВ) напряжения или тока по входу и выходу устройства. На рис. 4.5 показана зависимость КСВ умножителя частоты со стороны входа и выхода, снятая экспериментально. При тщательной настройке усилителей и умножителей можно добиться того, что КСВ будет не более двух. Характер изменения КСВ зависит от параметров транзистора и выбранного режима работы умножителя.

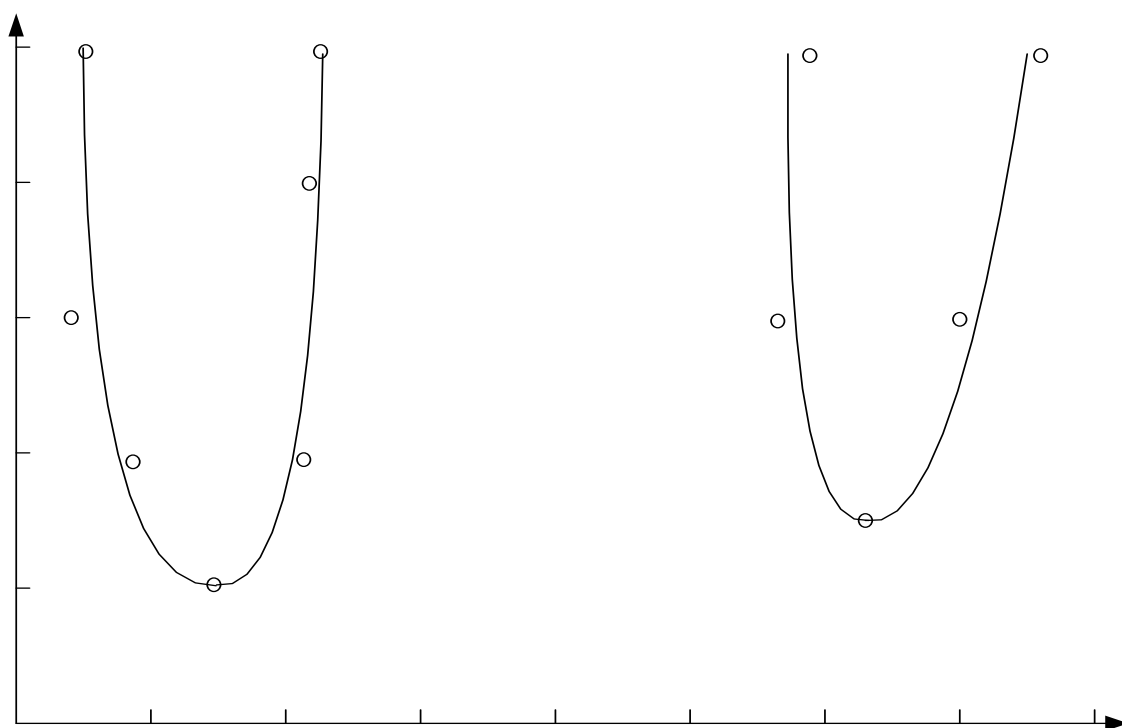


Рис. 4.5. Зависимость КСВ умножителя (250 МГц) со стороны входа и выхода

Первый каскад усилителя на транзисторе (2Т354А) обеспечивает дополнительную фильтрацию сигнала и его усиление до величины, необходимой для нормальной работы двухкаскадного усилителя мощности. Усилители мощности выполнены на транзисторах (2Т607А) и (2Т911А) и имеют идентичное схемное решение. В цепях баз транзисторов , включены согласующие элементы , , , .

На рис. 4.6 показан внешний вид усилителя мощности, а на рис. 4.7, 4.8 представлены зависимости выходной мощности и КПД усилителя от частоты.

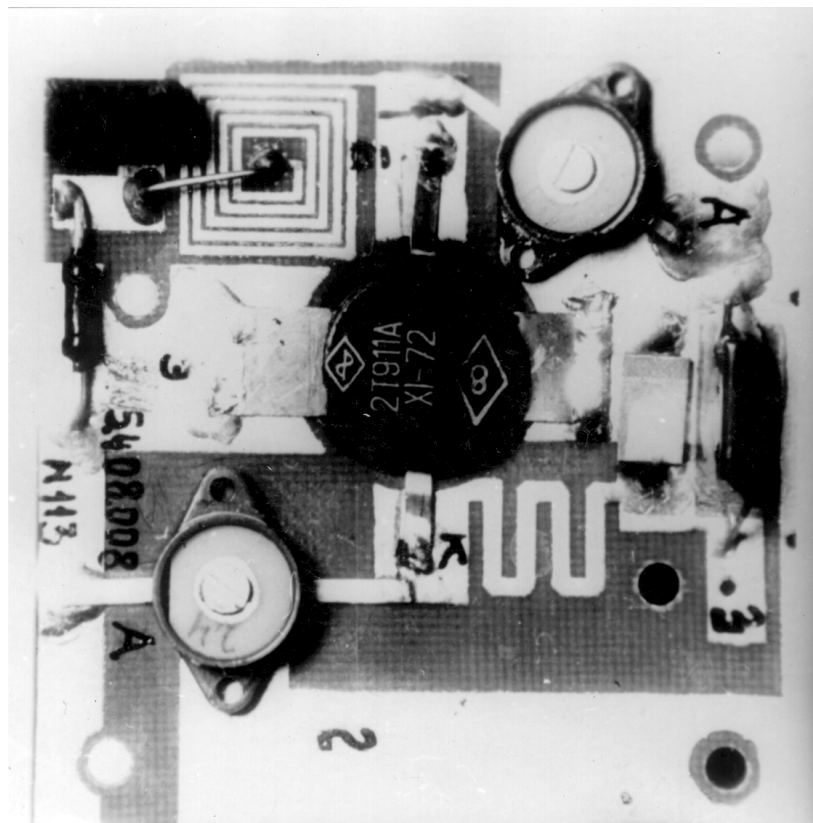


Рис. 4.6. Внешний вид усилителя

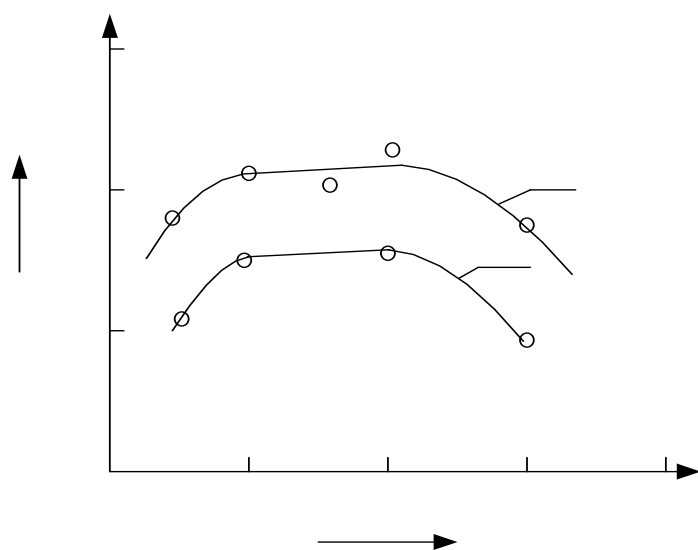


Рис. 4.7. Зависимость выходной мощности усилителя от частоты:

1 – $P_{\text{н}}$; 2 – $P_{\text{н}}$

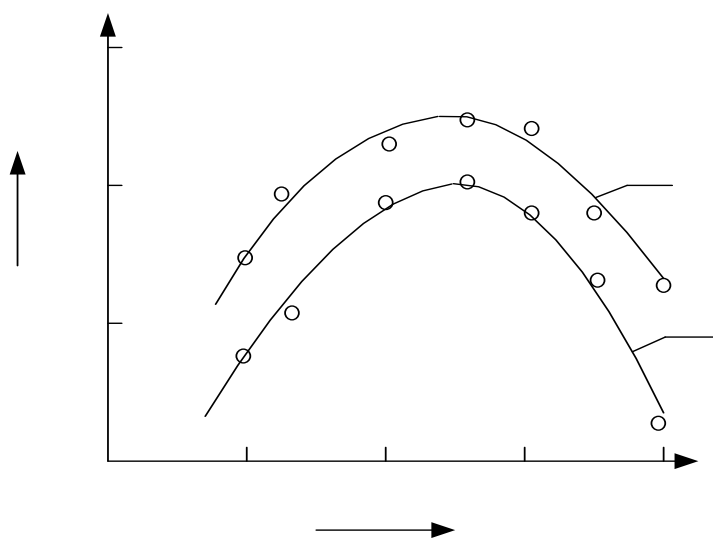


Рис. 4.8. Зависимость КПД усилителя мощности от частоты

Варакторный умножитель выполнен по схеме последовательного включения бескорпусного варакторного диода типа 2А606, работающего в режиме диода с накоплением заряда. Входная согласующе-фильтрующая цепь выполнена на элементах с сосредоточенными параметрами – пленочная индуктивность и навесной подстроенный конденсатор. Конденсатор

, компенсирующий входную реактивность диода, пленочный и дает возможность подстройки при замене варакторного диода.

Выходная цепь умножителя, включая полосно-пропускающий фильтр, выполнена на микрополосковых элементах. Источник СВЧ колебаний выполнен по гибридно-пленочной технологии. Это обстоятельство несколько ограничивает возможности по реализации высокоэффективных умножителей и усилителей мощности из-за относительно низких значений добротности пленочных катушек индуктивностей, но позволяет значительно уменьшить вес и габариты устройств.

Конструктивно источник СВЧ колебаний (рис. 4.9) выполнен на четырех поликоровых платах () м, на которых напылены проводники, катушки индуктивности, резисторы и микроволновые элементы варакторного усилителя. Конденсаторы большой емкости (68100 пФ) (K10-17B) и бескорпусные транзисторы являются навесными.

4.3. Исследование электрофоретической подвижности клеток поврежденной костной ткани после воздействия ЭМИ СВЧ диапазона

Анализ литературных источников, а также теоретические исследования (раздел 2), приводят к выводу о том, что существуют оптимальные параметры электромагнитных излучений, оказывающих наибольший терапевтический эффект на больные или поврежденные клетки. Об эффективности воздействия электромагнитных излучений на клетки тканей можно судить по электрофоретической подвижности ядер клеток – наиболее характерному показателю жиз-

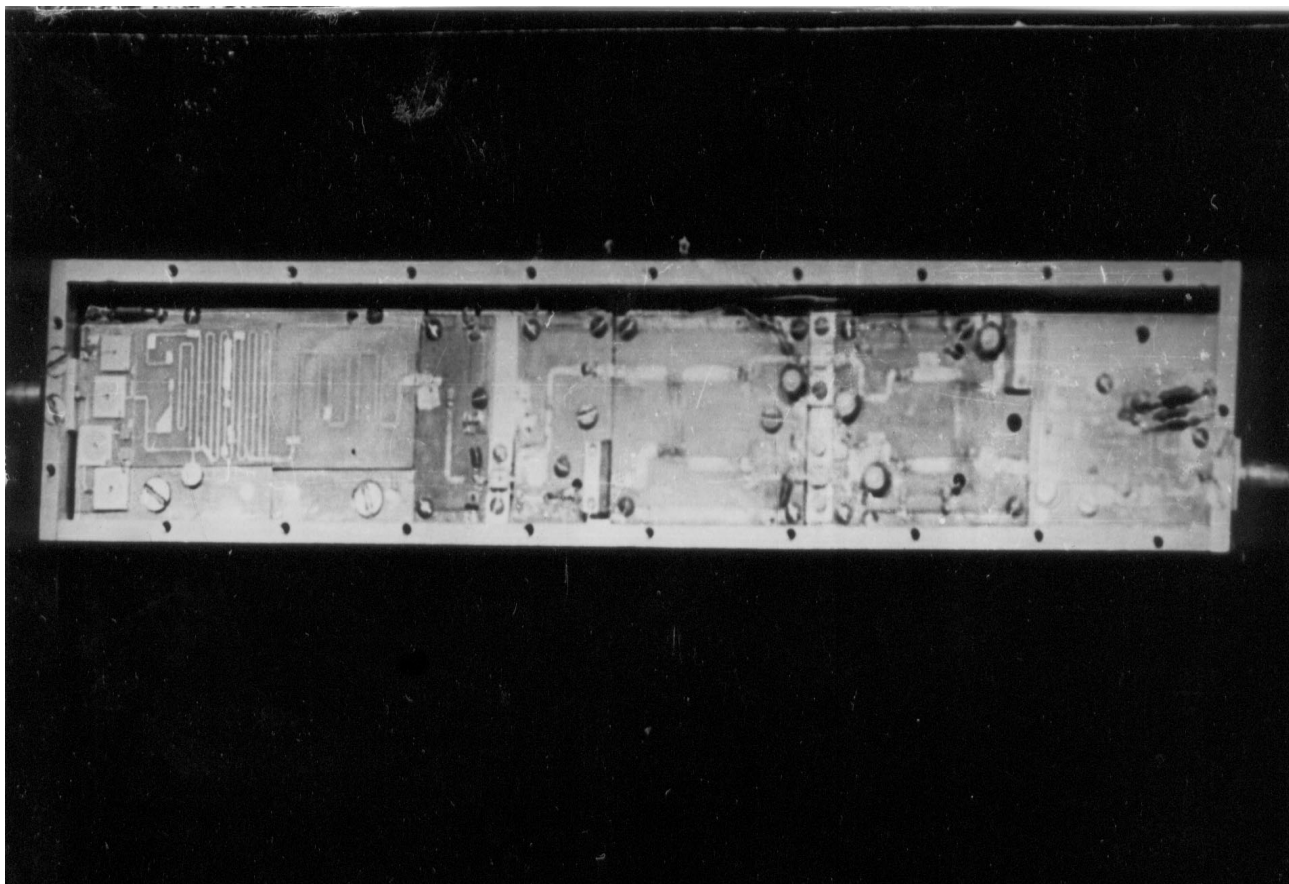


Рис. 4.9. Конструкция источника СВЧ колебаний

неспособности клеток. Поэтому необходимо определить минимальный ток, пропускаемый через раствор, с помещенными в нем клетками, при котором наблюдается перемещение ядер клеток при воздействии низкоэнергетических ЭМИ СВЧ диапазона.

4.3.1. Определение параметров электромагнитного излучения по электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани.

Электрофорез, или направленное движение коллоидных частиц или макроионов, под действием внешнего электрического поля считается важнейшей разновидностью электрокинетических явлений [18,19,35]. Именно на этой основе была создана установка для осуществления экспериментов по воздействию ЭМП дециметрового диапазона на клетки костной ткани.

Установка состоит из электрофоретической ячейки, источника постоянного тока, вольтметра, микроамперметра (рис. 4.10). Наблюдение за изменением электрофоретической подвижности клеток и клеточных структур производится с помощью бинокулярного микроскопа при увеличении 20x20 и 20x60.

Электрофоретическая ячейка (рис. 4.11, 4.12) представляет собой предметное стекло 1 с двумя параллельными электродами 2, между которыми помещается исследуемая культура клеток 5, которая, в свою очередь, располагается тонким слоем между двумя покровными стеклами 3 в электропроводящей среде. Для обеспечения надежности электрического контакта между объектом и электродами используются полоски фильтровальной бумаги 4, смоченные в электропроводящей среде.

Материалом для электродов может служить платина, золото, нержавеющей сталь и др. Выбор металла обусловлен составом электропроводящей среды: входящие в нее вещества или элементы должны быть инертны по отношению к данному металлу. Толщина электродов

м. Электроды не должны иметь острых углов, заусениц, вмятин, так как распределение плотности тока по площади электрода в этом случае будет неоднородным. На электроды пода-

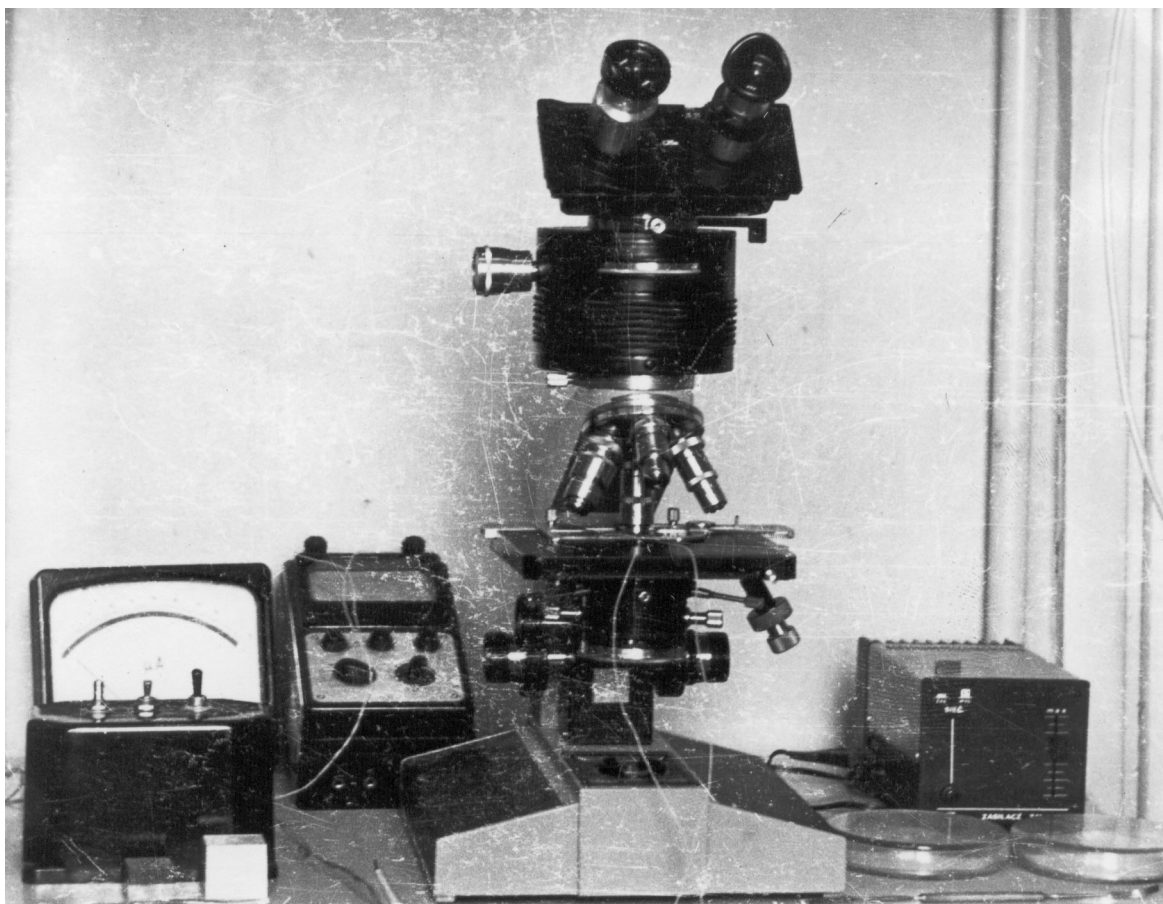


Рис. 4.10. Установка для исследования электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани

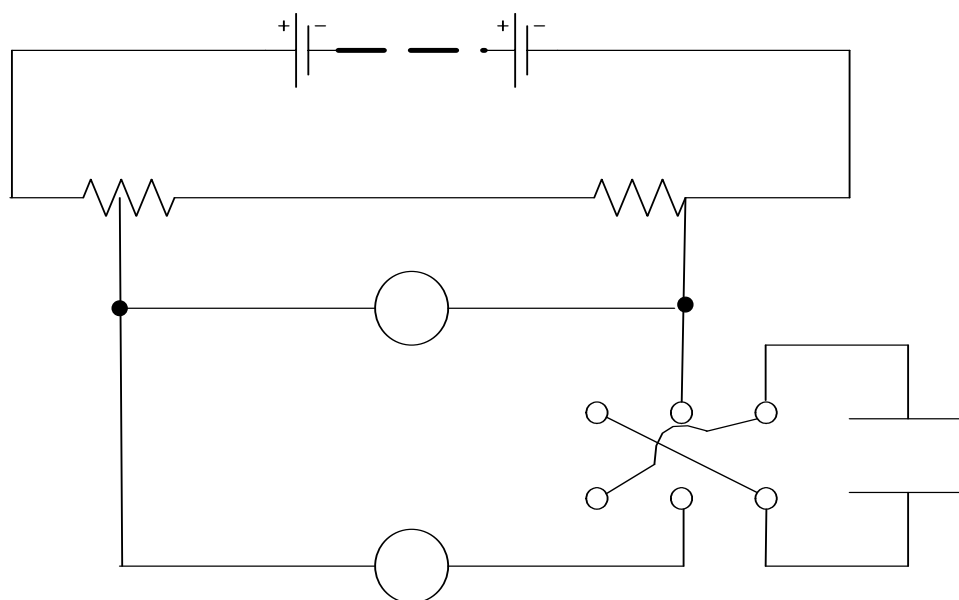


Рис. 4.11. Электрическая схема устройства

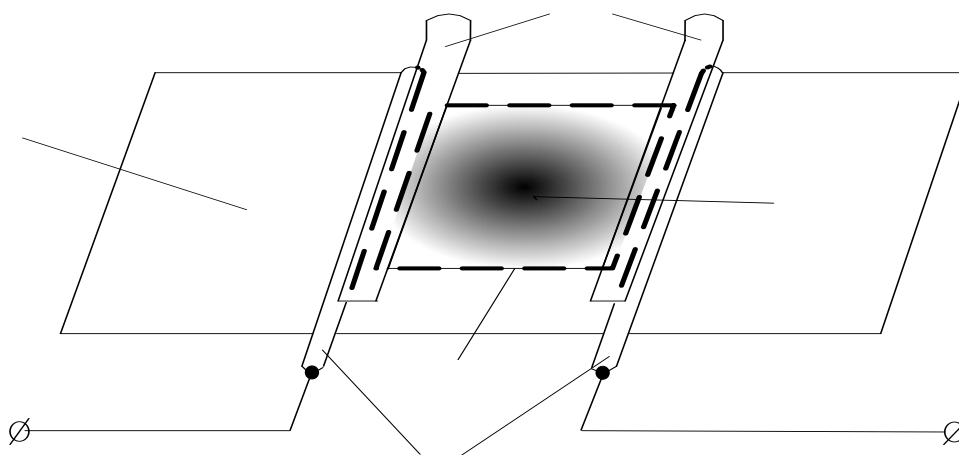


Рис. 4.12. Электрофоретическая ячейка

- 1 – предметное стекло
- 2 – электроды
- 3 – покровные стекла
- 4 – фильтровальная бумага
- 5 – исследуемая культура

ется стабилизированное и регулируемое напряжение 30...50 В при токе

А. Во избежание шунтирования цепи электрического тока, протекающего через объект, верхняя поверхность предметного стекла смазывается тонкой поперечной полоской вазелинового масла. Источник питания снабжен переключателем полярности тока, что обеспечивает процесс наблюдения изменения ЭФП клеток и клеточных структур.

Для качественного определения ЭФП клеток и клеточных структур, а также знака ϕ -потенциала проводится 20 измерений, в каждом измерении отмечается амплитуда и направление смещений под действием тока у пяти ядер

В результате теоретических исследований установлено, что зависимость показателя электрофоретической подвижности ядер костной ткани от параметров ЭМП, в общем виде, описывается математической моделью с определенным числом факторов (при соответствующих биофизических характеристиках костной ткани: $\epsilon_{к.т.} = 8,35-7,83$; $\rho_{к.т.} = 1850-1930$ кг/м³; толщиной $d-3$ м):

$$I = \frac{P}{f \cdot t} \quad (4.1)$$

где I – показатель электрофоретической подвижности ядер костной ткани, мА;

f – частота электромагнитного поля, ГГц;

t – экспозиция, мин;

P – плотность потока мощности, Вт/м².

Для определения степени влияния СВЧ (информационного воздействия ЭМП) на свойства клеточных структур использовался метод регрессионного и дисперсионного анализа [110].

Каждый опыт включал в себя две группы измерений. В каждую группу входило десять наблюдений без воздействия СВЧ и десять наблюдений с воздействием СВЧ. Длительность воздействия СВЧ (экспозиция) составляла от 2 до 90 минут. Как показали результаты эксперимента, заметное влияние поля СВЧ наблюдается при экспозиции не менее 9 минут. При увеличении экспозиции свыше 40 минут существенного изменения подвижности ядер клеток не наблюдалось (рис. 4.14).

В табл. 4.1 и 4.2 представлены типичные группы результатов, поступающие в обработку при экспозиции соответственно 40 и 10 минут.

Предварительные опыты показали, что существенное воздействие на клетки костной ткани оказывает только ЭМП дециметрового диапазона, поэтому экспериментальные исследования проводились именно в диапазоне 3600...4000 МГц.

Как показали экспериментальные исследования, влияние электромагнитного излучения на клетки костной ткани наблюдалось на частоте 3750 МГц (рис. 4.14). На рис. 4.15. приведена зависимость подвижности клеток костной ткани, из которой следует, что минимальным уровнем мощности воздействующего сигнала является мощность 100 Вт/м².

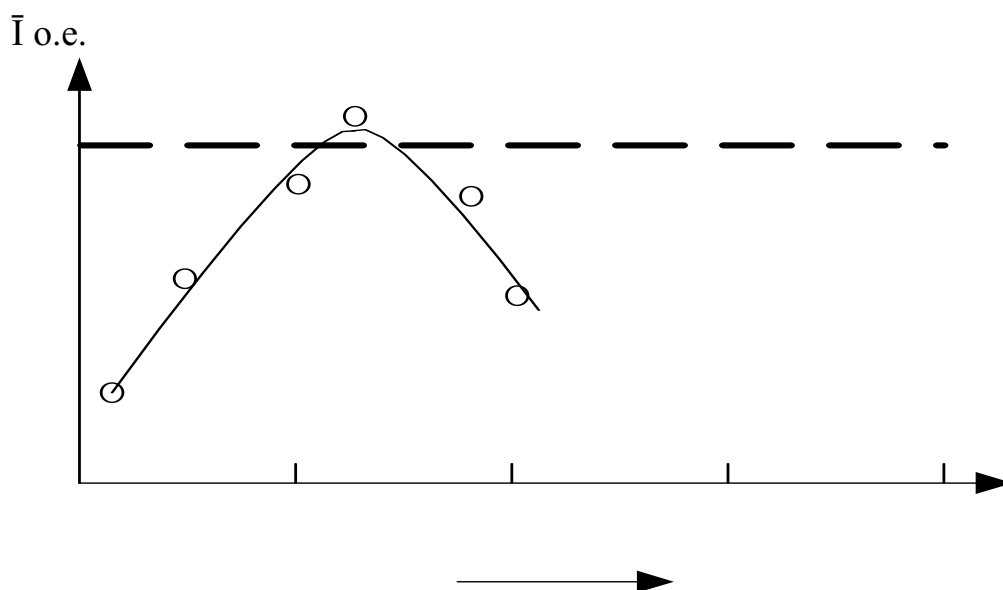


Рис. 4.13. Зависимость подвижности ядер клеток костной ткани в диапазоне частот: Вт/м²; мин.

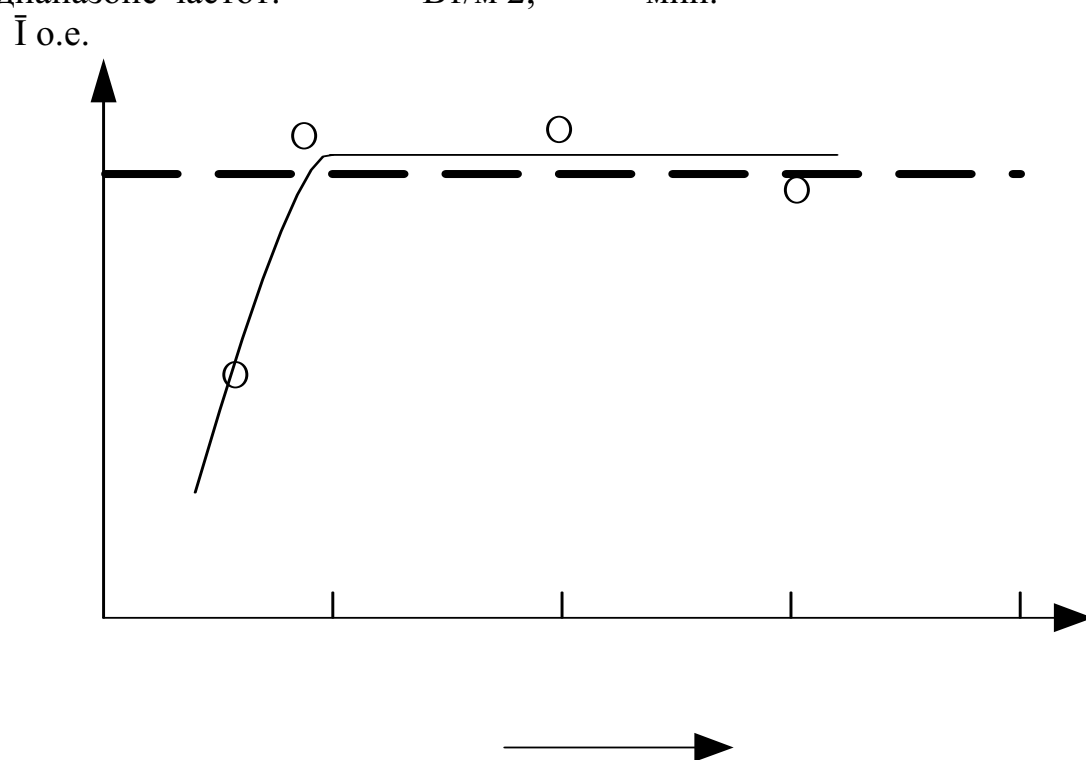


Рис. 4.14. Зависимость подвижности ядер клеток от экспозиции:
Вт/м²; $f=3750 \text{ МГц}$
 $\bar{I} \text{ o.e.}$

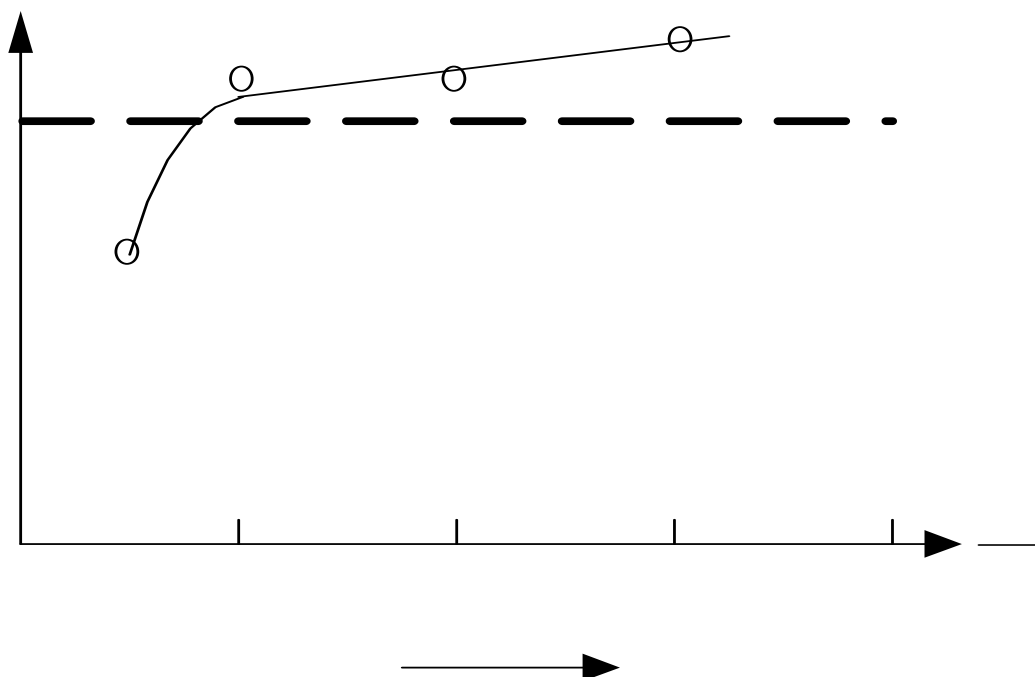


Рис. 4.15. Зависимость подвижности ядер клеток костной ткани от мощности: $f=3750$ МГц; $t = 10$ мин;

Таблица 4.1

Варианты опыта	(мА), результаты опыта	Сумма	Среднее значение
Без облучения СВЧ	16, 5, 3, 8, 16, 19, 10, 3, 3, 5	88	8,8
С облучением СВЧ (10 мин.)	7, 2, 4, 2, 3, 2, 4, 6, 5, 3	38	3,8

– минимальный ток, при котором наблюдалось перемещение ядер.

Таблица 4.2

Варианты опыта	(мА), результаты опыта	Сумма	Среднее значение
Без облучения СВЧ	16, 5, 4, 8, 16, 19, 10, 4, 4, 5	91	9,1
С облучением СВЧ (40 мин.)	7, 3, 4, 3, 3, 3, 4, 6, 5, 2	40	4,0

По результатам расчетов определим статистику [110]:

(4.2)

Обратимся теперь к таблицам дисперсионного отношения [110]. При данных числах степеней свободы находим табличное, которое для уровня значимости равно 4,41, а для уровня значимости равно 8,28.

Принимая во внимание то, что на величину показателя электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани влияют несколько факторов (частота ЭМП, экспозиция, плотность потока мощности) целесообразно провести многофакторный эксперимент, с применением математического метода планирования, с целью получения математической модели исследуемого процесса.

Необходимое число измерений со степенью определенности, которая зависит от числа наблюдений m в предварительном эксперименте, поставленном для оценки точности метода определяется из выражения [120]:

$$.3, \quad (4.3)$$

где m – число измерений в предварительном эксперименте;

W_m – размах варьирования, т.е. разность между крайними вариантами в упорядоченном ряду;

.3 – коэффициент, в котором $t_p(m-1)$ – значения коэффициента Стьюдента для вероятности p при числе измерений m ; берется из таблицы [121];

d_n – коэффициент для оценки стандартного отклонения по размаху варьирования [120].

Данные предварительного эксперимента приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3.

m	Результаты предварительного X=I, мА		Wm			Kω	n
5	3,3,3,4,4	3,4	1	29,4	0,31	0,53	9±2

Согласно предварительного эксперимента число измерений принимаем равным $n=10$.

Для получения зависимости, связывающей значения функции отклика с входными факторами при наличии аддитивной помехи случайного характера, применимо полнофакторное планирование второго порядка, в частности, ортогонального центрального композиционного планирования. Значения факторов и

их интервалы варьирования приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Значения факторов в эксперименте

Фактор	Кодированное обозначение	Значения факторов и интервалы варьирования					
		ΔX_i	-	-1	0	+1	+
Частота, ГГц	X1	0,2	3,557	3,6	3,8	4,0	4,043
Экспозиция, мин	X2	7,5	3,38	5,0	12,5	20,0	29,11
Плотность потока мощности, Вт/м ²	X3	50	39,3	50	100	150	160,7

При использовании стандартной методики построения планов второго порядка [119,120] составлены матрицы планирования эксперимента, расчета коэффициентов регрессии, определения дисперсии адекватности и результатов обработки данных приведенные в приложении А.

После проведения измерений и расчетов получено уравнение регрессии для показателя электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани:

$$Y = 6,16 - 0,192X_1 - 0,292X_2 - 0,228X_3 - 0,409X_1X_2 + 0,331X_1X_3 + 0,565X_2X_3 - 0,125X_1X_2X_3 \quad (4.4)$$

где Y- выходной параметр (показатель электрофоретической подвижности ядер костной ткани);

X₁ - частота электромагнитного поля ;

X₂ - экспозиция ;

X₃ - плотность потока мощности ;

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,01$ по критерию Стьюдента [120]. С учетом значимости коэффициентов, уравнение регрессии для электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани принимаем вид:

$$Y = 6,16 - 0,292X_2 - 0,228X_3 - 0,409X_1X_2 + 0,331X_1X_3 + 0,565X_2X_3 - 0,275X_1X_3 + 0,350X_2X_3 \quad (4.5)$$

На основании проверки данного уравнения на адекватность по критерию Фишера [120] сделан вывод, что уравнение адекватно описывает реальный процесс, и следовательно позволяет оценить характер влияния каждого из факторов на функцию отклика. Кроме того, стало возможным

практическое использование полученной модели для прогнозирования значений выходного параметра Y в области варьирования переменных X_i .

Для нахождения оптимальной точки процесса решена система уравнений, полученных приравниванием нулю значений компонентов градиента, вычисленных по выражению [119]:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_i} + \sum_{j=1}^m b_{ij} X_j = 0, \quad (4.6)$$

где X_i, X_j – кодированное значение фактора по которому берется производная и взаимодействующего с ним, соответственно;
 b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии.
 Для выражения (4.5) получена следующая система уравнений:

.3

$$\frac{\partial Y}{\partial X_i} + \sum_{j=1}^m b_{ij} X_j = 0, \quad (4.7)$$

Решение системы уравнений (4.7) дает следующие значения факторов в оптимальной точке: $X_{1оп} = -0,238$; $X_{2оп} = 0,436$; $X_{3оп} = 0,009$, что соответствует таким значениям натуральных параметров: частоте ЭМП $f_{оп} = 3,752$ ГГц; экспозиции $t_{оп} = 15,8$ мин.; плотности потока мощности $P_{оп} = 100, 5$ Вт/м².

С учетом различия биофизических характеристик костной ткани конечностей различных животных в пределах: относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{к.т.}^* = 8,45 - 7,93$; плотности $\rho_{к.т.} = 1850 - 1930$ кг/м³; толщины $d_{к.т.} = (5 - 8)10^{-3}$ м, параметры электромагнитного поля могут изменяться: частота $f = 3,752 \pm 0,15$ ГГц; экспозиция $t = 15,8 \pm 0,9$ мин; плотность потока мощности $P = 100, 5 \pm 4,9$ Вт/м².

На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения надёжной и эффективной работы источника электромагнитного излучения для улучшения восстановления костной ткани

конечностей животных необходимо предусмотреть следующие технические требования к источнику:

1. выходная частота – $3,75 \pm 0,15$ ГГц;
2. плотность потока мощности – 100 ± 5 Вт/м²;
3. частота задающего кварцевого генератора – 250 МГц;
4. диапазон перестройки частоты кварцевого генератора – 2%;
5. подавление побочных гармоник выходного сигнала не менее 40дБ;
6. уровень паразитной амплитудной модуляции выходного сигнала не более - 1%;
7. долговременная нестабильность частоты генератора – $2 \cdot 10^{-9}$ за 1 с;
8. выходная мощность генератора – 0,1 Вт;
9. предел нестабильности уровня выходной мощности при неизменных внешних условиях и неизменном напряжении питания за любые 15 минут работы должна составлять не более $\pm 0,3$ дБ;
10. КСВН выхода прибора при уровне выходного сигнала 0.1 Вт – не более 2;
11. потребляемая мощность (при частоте тока питающей сети 50 Гц) – 30 Вт;
12. коэффициент умножения усилительно-множительного каскада N – 15;

4.4. Исследование воздействия электромагнитных полей на клетки поврежденной костной ткани

Как известно, основу заживления, то есть восстановительно-репаративного процесса, составляют клетки-остеобласты, являющиеся предвестниками физиологически полноценной костной ткани. Эти клетки содержатся во внутреннем камбиальном слое надкостницы в неактивном состоянии [111 - 113].

В последнее время в зооветеринарии [114], наряду с антибиотиками и ферментами, стимулирующими заживление кости, используется электростимуляция остеогенных клеток на основе пропускания слабого электрического тока через поврежденный участок посредством введения электродов.

В сельскохозяйственной практике в зооветеринарии такой способ лечения обладает рядом недостатков, которые могут быть устранены путем использования электромагнитных полей, действующих дистанционно на поврежденный участок кости [115]. Таким же достоинством обладает и метод лечения на основе применения постоянного магнитного поля, носитель которого (например, эластичный магнитофор) в период лечения находится на свободно перемещающемся животном.

Обзор научной литературы и соображения, высказанные выше, свидетельствуют о том, что изучение воздействия постоянного магнитного

поля (ПМП), СВЧ полей и лазерного излучения на клетки-остеобласты, определяющие характер костной регенерации, является актуальной задачей.

Ниже представлены результаты по изучению воздействия ПМП, СВЧ колебаний дециметрового диапазона и лазерного излучения на процесс формирования регенерата кости у животных [116].

Объектом исследования были крысы Вистар в количестве 40 животных. Животные были подразделены на 4 группы по 10 особей в группе. Первая группа была контрольной. Животные второй группы подвергались воздействию постоянного магнитного поля: в третьей группе животные облучались СВЧ полем; на четвертой группе проверялось воздействие лазерного излучения.

Изучение воздействия названных факторов осуществлялось на основе стандартной модели дырчатого дефекта в верхней трети диафиза большеберцовой кости.

В качестве источника ПМП служили кольцеобразные ферритовые магниты с напряженностью поля внутреннего кольца порядка $(310 - 330) \cdot 10^{-4}$ Тл.

Большеберцовая кость животного в области дефекта помещалась внутри кольцевого магнита по его оси.

Источником лазерного излучения служил прибор типа ЛГ-52-1 с

выходной мощностью порядка Вт. Луч лазера с площадью сечения

м² направлялся на область повреждения кости, имеющую площадь м². Экспозиция при магнитотерапии и в случае лазерного облучения составила 15 минут в день.

СВЧ облучение проводилось генератором дециметрового диапазона волн ($f=3752$ МГц) с использованием диэлектрической антенны малых размеров, обеспечивающей локальность воздействия.

Поверхностная плотность потока мощности в зоне дефекта кости Вт/м². Антенна устанавливалась параллельно большеберцовой кости, экспозиция облучения в этом случае составляла 15 минут два раза в день.

Животные забивались на 3, 7, 14 сутки после того или иного вида воздействия.

Материалы подвергались гистологической обработке, приготавливались гистопрепараты, окраска гематоксином-эозином.

Основные результаты исследования состоят в следующем:

- постоянное магнитное поле напряженностью $(310 - 330) \cdot 10^{-4}$ Тл вызывает образование клеточно-волокнутого регенерата на 3 сутки, тогда как в контрольной группе образование этой формы регенерата происходит на 7 сутки. Использование ПМП вызывает разрыхление и быструю смену коллагеново-волокнутой ткани на вновь образованные костные балочки мелкопетличного регенерата на 14 сутки. Osteoblastы активизируются на 7 сутки после воздействия;

- СВЧ поле (с указанными параметрами облучения) вызывает ускоренное костеобразование: на 3 сутки появляется мелкопетлистый регенерат, который

уже на 14 сутки образует регенерат, состоящий из вновь образованной пластинчатой кости, при этом имеет место рассасывание и замена старого вертикального слоя вновь образованным, с сохранением костно-мозговой полости;

- лазерное облучение активизирует образование грубого коллагенового регенерата, который медленнее, чем при воздействии постоянным магнитным полем, рассасывается и превращается во вновь образованный широкопетлистый регенерат.

Таким образом, наиболее активизирующим влиянием на остеобласты обладает СВЧ облучение, затем следует постоянное магнитное поле и, наконец, лазерное воздействие.

СВЧ поле обладает противоотечным действием, которое проявляется на 3 сутки после облучения.

С гистопрепаратов получены микрофотографии для контроля и опытов. Представлены фотографии гистопрепаратов контрольных животных и животных, подвергнутых различным видам воздействия, соответствующих 3, 7, 14 суткам регенерационного процесса (12 микрофотографий).

Анализ их содержания подтверждает вышеперечисленные выводы.

На микрофото (МФ) № 1 (контроль, 3 сутки) представлен торец вертикального слоя кости (I) с уплотненным кровоизлиянием (II) в костно-мозговую лунку (III). На МФ № 2 – периостальный отек (I), начальное формирование клеточно-волокнутого образования (II), расширение костных канальцев (III)/

На МФ № 3 – образование плотного клеточно-волокнутого регенерата (I), закладка нежного костного матрикоса, не пропитанного слоями кальция (II), разрежение кортикального слоя компактной кости, начальная стадия резорбции (III) (рис. 4.16).

Анализ микрофото при действии СВЧ (3-и сутки).

На МФ № 4 видна остеобластическая активация остеогенного слоя надкостницы (I), сформированная сеть клеточно-волокнутого регенерата (II), образование нежного сетевидного остеоида (III).

На МФ № 5 – образованный остеоид с мелкопетлистым рисунком вновь образованных костных балочек (II), спаянность мелкопетлистого регенерата грубоволокнутой кости с торцом вертикального слоя старой кости (III).

На МФ № 6 – формирующаяся пластинчатая кость (I) с резорбцией старой кости (II), напластыванием пластинчатой кости на мелкопетлистую сеть костных балочек (III) (рис. 4.17).

Анализ действия СВЧ поля.

На МФ № 7 – периостат отечен (I), разрежение тромба (II), образование клеточно-волокнутого регенерата с остеоидом и кальцификацией. (III).

На МФ № 8 – резорбция кортикального слоя (I) с вновь образованной пластинчатой костью (II), которая напластана на старую кость (III).

На МФ № 9 – полное формирование дефекта вновь образованной пластинчатой костью (I), рисунок пластинчатой кости сохранен, полное

заживление дефекта кортикального слоя (III) (рис. 4.18).

Анализ действия лазерного излучения.

На МФ № 10 – кровоизлияние плотное, организованное, инфильтрировано, в основном, красными форменными элементами – эритроцитами (I).

На МФ № 11 – грубый клеточно-волокнистый регенерат (I) с разрежением кортикального слоя (II), с его продольной резорбцией.
На МФ № 12 – фрагмент вновь образованного широкопетлистого регенерата (I) с узкими межбалочными пространствами (II), резорбция клеточно-волокнистого регенерата, сеть клеточно-волокнистого регенерата еще плотная, с большим содержанием фибробластоподобных клеток. Остеобластическая активация (III) (рис. 4.19).

4.5. Лечение костной патологии электромагнитным излучением СВЧ диапазона у сельскохозяйственных животных

Для лечения животных с костной патологией использовался источник СВЧ с частотой излучения 3,75 ГГц и плотностью потока мощности 100 Вт/м². Излучающая антенна устанавливалась контактно на пораженную область животного и крепилась липкой лентой.

Для лечения поступали коровы и телята с различной костной патологией.

Ветеринарную оценку хода лечения проводили специалисты Волчанской районной государственной больницы ветеринарной медицины.

В производственном опыте было проведено лечение 7 коров и 8 телят с диагнозом серозный периостит (*Periostitis seroso*) плюсневой кости.

В первые дни в контрольной группе назначали холодные процедуры и короткие новокаиновые блокады с антибиотиками. В последующие дни назначали тепловые процедуры и повязки с 0,25 % -ным раствором димексида. В результате медикаментозного лечения выздоровели только 1 корова и двое телят.

В опытной группе лечение животных проводили с помощью СВЧ излучения в течение 10 суток, по 15 мин. в сутки. После 10 суток хромота исчезла, животные выздоровели.

В дальнейшем для лечения были взяты шесть коров с оссифицирующим периоститом, вызванного трещинами в путевых костях. Болезнь сопровождалась воспалением, как внутреннего, так и наружного слоя надкостниц. Для лечения животных вводили антибиотики и втирали 1 раз в два дня мазь из дву-хромового калия. В результате медикаментозного лечения одно животное было вылечено. У остальных пяти животных заметных улучшений не было выявлено.

Контактное облучение ран животных в течение 15 суток по 15 мин. в сутки привело к выздоровлению животных.

Электромагнитное лечение частичного некроза костей конечностей у трех коров, вызванного морозами, дало положительный результат. Для лечения применяли СВЧ излучение три раза в день по 5 мин. Через 20 суток животные выздоровели.

Перелом лучевой кости передней конечности у трех коров проводили СВЧ излучением в течение 25 суток, с облучением 16 мин. в сутки. Антенна крепилась контактно на область перелома. В контрольной группе из трех коров переломы лечили по общепринятой методике.

В первой фазе заживления перелома зона перелома была подготовлена к регенерации через 30 часов вместо 72 часов в контрольной группе.

Вторая фаза заживления перелома в группе опыта началась на вторые сутки, а в контроле на 4 сутки.

В тканях формирующейся мозоли интенсивность белкового и фосфорно-калиевого обмена в опыте на 17 % выше, чем в контроле. Количество мукополисахаридов и микроэлементов (меди, кобальта, цинка, алюминия, марганца, магния) в опыте было на 15 - 20 % больше в сравнении с контролем. Накопление микроэлементов в зоне перелома обеспечивает образование клеточных элементов регенерата.

Третья фаза, характеризующаяся окостенением мозоли, в опыте началась на 6 сутки, а в контроле – на 13 сутки. В опыте образование мозоли проходило с хорошим кровоснабжением и минерализацией. В контроле у одной из коров образовалась хрящевая мозоль.

В контроле местные биохимические изменения окончательно

нормализовались через 6 месяцев, а в опыте через 35 дней. Пять коров с ушибами III степени в области бедра были вылечены СВЧ излучением в течение 10 суток. Облучение проводили по 15 мин. в сутки. Результаты лечения представлены в табл. 4.5.

4.6. Выводы

1. В результате экспериментальных исследований получено регрессионное уравнение, устанавливающее зависимость показателя электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани от экспозиции и параметров воздействующего электромагнитного поля (частота, плотность

потока мощности).

2. Подтверждена принципиальная возможность регенерации костной ткани при воздействии на нее СВЧ излучением с оптимальными параметрами:

- частота ЭМП $f_{оп} = 3,752 \pm 0,15$ ГГц;
- плотностью потока мощности $R_{оп} = 100.5 \pm 4,9$ Вт/м²;
- экспозицией $t_{оп} = 15,8 \pm 0,9$ мин

при $\varepsilon^*_{к.т.р.к.т.3}$; $dk.t. \cdot 10^{-3}$ м.

3. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили необходимость и возможность создания источника СВЧ излучений с прямым умножением частоты кварцевого генератора и с параметрами:

- выходная частота – $3,75 \pm 0,15$ ГГц;
- плотность потока мощности – $100 \pm 5,0$ Вт/м²;
- частота задающего кварцевого генератора – 250 мГц;
- диапазон перестройки частоты кварцевого генератора – 2%;
- подавление побочных гармоник выходного сигнала – не менее 40 дБ;
- долговременная нестабильность частоты генератора – $2 \cdot 10^{-9}$ за 1 с;
- выходная мощность генератора – 0,1 Вт;
- потребляемая мощность $R_{пот.} = 30$ Вт;

коэффициент умножения усилительно-множительного каскада $N = 15$.

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена решению задачи получения новых научно-обоснованных теоретических и экспериментальных результатов, которые в совокупности являются существенными для развития низкоэнергетического электромагнитного воздействия и технических средств дециметрового диапазона для восстановления костной ткани сельскохозяйственных животных.

Главными итогами выполненной работы являются следующие результаты.

1. Проведенными исследованиями установлено, что одним из перспективных методов (для улучшения восстановления костной ткани животных) является метод, основанный на использовании низкоэнергетических электромагнитных полей СВЧ диапазона, позволяющий создать эффективную, энергосберегающую и экологически чистую технологию регенерации (восстановления) костной ткани.

2. Усовершенствована математическая модель процесса взаимодействия ЭМП с тканями конечности животного, которая рассматривается как многослойный цилиндр с различными биофизическими характеристиками слоёв ($\epsilon_{к.т.}^* = 8.35-7.83$; $\epsilon_{к.м.}^* = 5.90-4.90$; $\epsilon_{м.т.}^* = 46.50-47.30$; $\epsilon_{к.п.}^* = 43.50-45.20$; $\epsilon_{ш.п.}^* = 4.63-5.36$; $\rho_{к.т.} = 1850-1930 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{к.м.} = 928 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{м.т.} = 1033-1048 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{к.п.} = 1250-1270 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ш.п.} = 1.28-1.33 \text{ кг/м}^3$) позволяющая определить параметры воздействующего электромагнитного излучения (частоту, плотность потока мощности, диапазон изменения частоты и др.) и распределения самого поля по поперечному сечению конечности, вызывающих необходимый восстановительный эффект, предопределяющий технические параметры источника СВЧ излучения.

3. Проведённые на основании математической модели расчёты показали, что наиболее приемлемым диапазоном частот электромагнитного облучения конечностей различных сельскохозяйственных животных является 3,6-4,0 ГГц., В этом случае, наибольшее количество энергии ЭМП выделяется в слое костной ткани конечности животного ($\epsilon_{к.т.}^* = 8.35 - 7.83$).

4. В результате экспериментальных исследований получено регрессионное уравнение, устанавливающее зависимость показателя электрофоретической подвижности ядер клеток костной ткани от экспозиции и параметров воздействующего электромагнитного поля (частота, плотность потока мощности).

5. Подтверждена принципиальная возможность регенерации костной ткани при воздействии на нее СВЧ излучением с оптимальными параметрами:

- частота ЭМП $f_{оп} = 3,752 \pm 0,15 \text{ ГГц}$;
- плотностью потока мощности $P_{оп} = 100,5 \pm 4,9 \text{ Вт/м}^2$;
- экспозицией $t_{оп} = 15.8 \pm 0,9 \text{ мин}$

при $\epsilon^* = 8,45 - 7,93$; $\rho = 1850 - 1930 \text{ кг/м}^3$; $d = (5-8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

6. Проведённый анализ вариантов структурных схем формирования колебаний в СВЧ диапазоне показал, что по простоте работы и надежности, объемно-весовым показателям следует отдать предпочтение схеме с прямым умножением частоты кварцевого генератора (подавление побочных составляющих в спектре выходного сигнала не менее 40 дБ), а спектрально-флуктуационным характеристикам (подавление побочных составляющих в спектре выходного сигнала до 100 дБ) – схемам с фазовой подстройкой частоты.

7. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили необходимость и возможность создания источника СВЧ излучения с техническими параметрами:

- выходная частота – $3,75 \pm 0,15$ ГГц;
- плотность потока мощности – $100 \pm 5,0$ Вт/м²;
- частота задающего кварцевого генератора – 250 мГц;
- диапазон перестройки частоты кварцевого генератора – 2%;
- подавление побочных гармоник выходного сигнала – не менее 40 дБ;
- долговременная нестабильность частоты генератора – $2 \cdot 10^{-9}$ за 1 с;
- выходная мощность генератора – 0,1 Вт;
- потребляемая мощность $P_{пот.}$ – 30 Вт;
- коэффициент умножения усилительно-множительного каскада N – 15.

8. Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что на основании теоретических и экспериментальных исследований созданы предпосылки для разработки и внедрения в производство немедикаментозного способа и технического устройства СВЧ излучения для улучшения восстановления костной ткани животных, применение которых в условиях производства показали их высокую эффективность, которая невозможна была с применением традиционных способов воздействия.

9. Результаты исследований апробированы в хозяйстве ООО «Колос» Харьковской области. Экономическая эффективность от внедрения электромагнитного метода лечения животных составила 5,6 тыс. грн в год, от выбраковки были спасены 10 высокопродуктивных коров. На примере коровника в 200 голов было показано, что применение низкоэнергетических ЭМП СВЧ диапазона, позволит получать прибыль в размере 6700 грн в год.

10. Результаты, полученные в процессе выполнения данной работы, могут быть использованы для разработки новых типов технических устройств, для воздействия на различные органы животных с помощью направленных сверхвысокочастотных низкоэнергетических магнитных полей, с целью повышения их жизнедеятельности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукьяновский В.А., Лебедев А.В. и др. Болезни костной системы. - М.: Колос, 1984. - 254 с.
2. Лебедев А.В., Лукьяновский В.А., Семенов Б.С. и др. Общая ветеринарная хирургия. - М.: Колос, 2000. - 488 с.
3. Анакина Ю.Т. Болезни конечностей рогатого скота в условиях интенсивной технологии. - М.: ВНИИТЭИагропром, 1988. - 47 с.
4. Бурденюк А.Ф. Ветеринарная ортопедия. - Л.: Колос, 1976. - 200 с.
5. Поваженко И.Е., Братюха С.И. Общая ветеринарная хирургия. - Киев: Вища школа, 1989. - 460 с.
6. Плахотин М.В., Есютин А.В., Белова А.Д. Общая ветеринарная хирургия. - М.: Колос, 1981. - 461 с.
7. Никоноров В.А., Кузнецов А.К. Ветеринарная хирургия и ортопедия. - Л.: Колос, 1965. - 484 с.
8. Герцен П.П. Профилактика и лечение травм в промышленном животноводстве. - Кишинев: Кармя Молдовеняска, 1981. - 354 с.
9. Воронович И.Р. Заживление переломов костей. - Минск: Наукова і тэхніка, 1994. - 174 с.
10. Казьмина Л.И. Лечение открытых переломов костей и их последствий. - М.: Медицина, 1985. - 181 с.
11. Вайнштейн В.Г., Кошкарев С.Е. Лечение закрытых внутрисуставных переломов и вывихов костей конечностей. - Л.: Медицина, 1973. - 223 с.
12. Тарасов В.Р. Хирургия в овцеводстве. - М.: СельхозГИЗ, 1959. - 195 с.
13. Веремей Э.И., Елисеев А.Н., Лукьяновский В.А. Справочник по применению лекарственных средств в ветеринарной хирургии. - Минск: Урожай, 1989. - 170 с.
14. Семенов Б.С., Лебедев А.В., Елисеев А.Н. Частная ветеринарная хирургия. - М.: Колос, 1997. - 98 с.
15. Улащина В.С. Актуальные вопросы электролечения и ультразвуковой терапии. - Минск: Урожай, 1983. - 144 с.
16. Плахотин М.В. Справочник по ветеринарной хирургии. - М.: Колос, 1977. - 182 с.
17. Ультразвук и другие виды энергии в хирургии / Под ред. В.И. Лощилова. - М.: МВТУ, 1986. - 80 с.
18. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. - М.: Наука, 1968. - 288 с.
19. Девятков А.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. - М.: Радио и связь, 1991. - 169 с.
20. Исмаилов Э.Ш. К механизму влияния микроволн на проницаемость эритроцитов человека // Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. - М.: Медицина. - 1972. - С. 66 - 67.
21. Севостьянова Л.А., Потапов С.Л. Особенности воздействия радиоволн миллиметрового диапазона в комбинации с фторафуром на кроветворную систему // Биологические науки. - 1967. - № 12. - С. 48 - 50.

22. Pazderova-Vey Zupkova V., Frank Z. Proceedings: Influence of pulsed microwaves on haematopoiesis of adolescent rate // J. Microwave Power. - 1976. - Vol. 11, No. 2. - P. 133.
23. Kägi P., Rüegg R., Straub P.W., Hossli G. Hematological studies on changes caused by warming of the blood with microwaves // Inflationsther. Klin. Ernachs. - 1977. - Vol. 4, No. 5. - Pp. 285 - 289.
24. Grissom D., Hartwig W.H. Dielectric dissipation in Nall and below 4,2 K // J. of Appl. Phys. - 1966. - Vol. 37, No. 13. - Pp. 47 - 84.
25. Schwan H.P. Microwave radiation: biophysical considerations and standards criteria // IEEE Trans. Biomed. Eng.. - 1972. - Vol. 19, No. 4. - Pp. 304 - 312.
26. Карпов М.А. Лечит втрое быстрее // Изобретатель и рационализатор. - 1981. - Вып. 4. - С. 36 - 38.
27. Frey A.H. Behavioral biophysics // Psychol. Bull. - 1965. - Vol. 63. - Pp. 322 - 337.
28. Мильд Ч.Х. Воздействие электромагнитных ВЧ-полей на персонал // ТИИЭР. - 1980. - Т. 68. - С. 19 - 21.
29. Брюхова А.К. и др. Влияние ЭМП миллиметрового диапазона, лазерного излучения и их комбинированного действия на свойства микроорганизмов // Электронная промышленность. - 1985. - Вып. 39. - С. 6 - 9.
30. Влияние электромагнитных полей на организм животных: Сборник научных трудов кафедры патофизиологии и биофизики / Под ред. А.Ф. Кузьмина. - М.: МИИСП. - 1972. - Т. 2, Вып. 10. - С. 24.
31. Файтельберг-Бланс В.Р. Изменение всасывательной и секреторной деятельности желудка и кишечника при экспериментальном гастрите и энтерите и восстановление этих функций при воздействии на организм высокочастотными физическими агентами (ультразвук, УВЧ, СВЧ). Физиология и патологические пищеварительные системы. - М.: Наука, 1963. - 131 с.
32. Суббота А.Г. Нетепловое действие микрорадиоволн на организм (обзор литературы) // ВМЖ. - 1970. - Вып. 40. - С. 39 - 45.
33. Всесоюзное научно-производственное совещание по применению оптического излучения в сельскохозяйственном производстве при выполнении производственной программы: Тезисы докладов 11 - 14 сентября. - Львов, 1984. - 86 с.
34. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Н.Д.Девятков, М.Б. Голант. - М.: Связь, 1981. - 338 с.
35. Девятков Н.Д., Арзуманов Ю.Л., Бецкий О.В., Лебедев Н.Н. Применение низкоинтенсивных электромагнитных миллиметровых волн в медицине и биологии. - М.: ИРЭ РАН. - 1995. - 8 с.
36. Кабисов Р.К. Миллиметровые волны в системе реабилитации онкологических больных // Российский симпозиум с международным участием "Миллиметровые волны в медицине и биологии". - М.: ИРЭ РАН. - 1997. - С. 13 - 14.

37. Девятков Н.Д., Гельвич Э.А., Голант М.Б., Реброва Т.Б. Радиологические аспекты использования в медицине энергетических и информационных воздействий электромагнитных колебаний // Электронная техника. Серия: Электроника СВЧ. - 1981. - Вып. 9 (333). - С. 39-45.
38. Девятков Н.Д. Взаимодействие миллиметрового излучения с биологически активными соединениями и полярными жидкостями // Радиотехника и электроника. - 1978. - № 9. - С. 18 - 82.
39. Черенков А.Д., Пиротти Е.Л. Применение информационных ЭМП в технологических процессах сельскохозяйственного производства // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 62. - С. 72 - 77.
40. Кучин Л.Ф., Черенков А.Д. Роль низкоэнергетических ЭМП миллиметрового диапазона в метаболических процессах биообъектов // Вестник науки и техники. - Харьков: Дом науки и техники. - 1999. - № 3. - С. 44 - 46.
41. Кузнецов В.П., Трофимов А.В. Энергоинформационные взаимодействия в биосфере. Опыт теоретических и экспериментальных исследований // Русская мысль. - 1992. - № 1. - С. 22 - 27.
42. Чиркова Э.Н. Волновая регуляция генной активности: живая клетка как фотонная вычислительная машина // Русская мысль. - 1992. - № 22. - С. 29 - 41.
43. Молекулярная биология клетки: Пер. с англ. В 2 т. / Б.Албертс, Д.Брей, Д.Льюис и др. - М.: Мир, 1987. - Т. 2. - 312 с.
44. Иноземцев В.П., Балковой Н.И., Лукьяновский В.А., Ханжина Н.Н., Самоделкин А.Г. Применение электромагнитных излучений крайне высоких частот в ветеринарной практике // Ветеринария. - 1993. - № 10. - С. 38 - 42.
45. Ветеринарно-санитарное и техническое обеспечение профилактики и ликвидации заболеваний в промышленном животноводстве. Методические рекомендации. - Харьков: ХЗВИ, 1986. - 68 с.
46. Барсуков Н.А. Ветеринарная физиотерапия. - Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1985. - 52 с.
47. Черенков А.Д., Кучин Л.Ф. Влияние низкоэнергетических ЭМП на клетки тканей вымени коров больных маститом // Вісник ХДТУСГ. - Харків: ХДТУСГ. - 2001. - Вип. 6. - С. 328 - 331.
48. Черенков А.Д., Пиротти Е.Л. Технические средства контроля СВЧ воздействий на биологические объекты. - Харьков: Крок, 1999. - 182 с.
49. Исмаилов Э.Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучений // Использование СВЧ-энергии в сельскохозяйственном производстве. - Зерноград: ВНИПТИМЭСХ. - 1989. - С. 23 - 29.
50. Рубин А.Б. Биофизика. Т. 2. Биофизика клеточных процессов. - М.: Высшая школа, 1987. - 303 с.
51. Антонов В.Ф. Липиды и ионная проницаемость мембран. - М.: Наука, 1982. - 105 с.
52. Laamsweerd-Galler D.V., Meessen A. The Role of Proteins in a Dipole Mode for Steady-State Tonic Transport through Biological Membranes // J. Membr. Biol. - 1975. - Vol. 23. - Pp. 103 - 137.

53. Исмаилов Э.Ш. Биофизические действия СВЧ-излучения. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 144 с.
54. Девятков Н.Д. Голант М.Б., Тагер А.С. Роль синхронизации в воздействии слабых электромагнитных сигналов миллиметрового диапазона на живые организмы // Биофизика. - 1983. - Т. 28. Вып. 5. - С. 895 - 896.
55. Кузнецов А.П. Электромагнитные поля живых клеток в КВЧ диапазоне // Электронная техника: Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1991. - Вып. 7 (441). - С. 3 - 6.
56. Взаимодействие физических полей с живым существом/ Е.И.Нефедов, А.А.Протопопов, А.Н.Семенов. - Тула: Изд-во ТулГУ, 1995. - 208 с.
57. Кузнецов В.П., Трофимов А.В. Энергоинформационное взаимодействие в биосфере. Опыт теоретических и экспериментальных исследований // Русская мысль. - 1992. - № 1. - С. 22 - 27.
58. Макаренко Б.И., Малахов В.А. Низкоинтенсивная импульсная модуляция ЭМИ СВЧ диапазона в лечении больных начальной цереброваскулярной патологией // Труды 11 Научно-практической конференции. - Киев, октябрь, 1997 г.
59. Плетнев С.Д. Электромагнитные волны в онкологии // Всесоюзный семинар "Применение КВЧ излучения низкой интенсивности в биологии и медицине. - М. - 1989.
60. Кучин Л.Ф., Черенков А.Д. Новые электромагнитные технологии сельскохозяйственного производства // Харьковский фермер - 97. - Харьков: ХГТУСХ. - 1998. - С. 96 - 109.
61. Белецкая О.М., Макаренко Б.И., Лысенко Н.А., Безносенко Б.И. Результаты использования электромагнитных излучений для лечения онкологических больных // Зарубежная электроника. - 1996. - № 2. - С. 34 - 36.
62. Цуцаева А.А., Макаренко Б.И., Безносенко Б.И. и др. Воздействие электромагнитных излучений нетепловой интенсивности на развитие опухоли Эрлиха мышей // Зарубежная электроника. - 1996. - № 12. - С. 45 - 46.
63. Голант М.Б. О проблеме резонансного действия когерентных электромагнитных излучений миллиметрового диапазона длин волн на живые организмы // Биофизика. - 1989. - Т. 34. - № 2. - С. 339 - 348.
64. Медведев И.Д. Физические методы лечения животных. - М.: Колос, 1964. - 432 с.
65. Абрикосов И.А., Крылов Н.П. Практическая физиотерапия. - М.: Гос. НИИ физиотерапии, 1958. - 96 с.
66. Барсуков Н.А. Закономерности электрофореза сульфаниламидов и антибиотиков и применение его при лечении инфицированных ран: Дис. докт. мед. наук. - Алма-Ата, 1964. - 198 с.
67. Голиков А.Н. и др. Новые методы диагностики, лечения и профилактики неинфекционных и инфекционных заболеваний сельскохозяйственных животных. - М.: Колос, 1979. - 164 с.
68. Карпов М.А. Лечит втрое быстрее // Изобретатель и рационализатор. - 1981. - Вып. 4. - С. 36 - 38.

69. Эйди У.Р. Частотные и энергетические окна при воздействии электромагнитных полей на живую ткань // ТИИЭР. - 1980. - № 1. С. 140 - 145.
70. Справочник по радиоизмерительным приборам (под ред. В.С. Насонова). - М.: Сов. радио, 1986. - 485 с.
71. Каталоги радиоизмерительных приборов 1961 - 1994 гг. - М.: НИИЭИР, 1995. - 386 с.
72. Hewlett Packard Test Measurement Catalog 1984 - 1998.
73. Rohde Schwarz Messgeratekatalog 1992 - 1997.
74. Клейман А.С. Измерительная техника. - 1990. - № 9. С. 5 - 10.
75. Wolls F.L., Marchi A.De. IEEE Trans. Instr. Meas. IM 24/2101975. - No. 5. - Pp. 85 - 90.
76. Клейман А.С., Бондарев В.А., Кивган Б.А., Пестовский В.И. СВЧ и КВЧ генераторы высокой стабильности частоты. Методы и средства метрологического обеспечения измерения частотных характеристик лазеров // Сб. научных трудов НПО "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева". - Л.: НПО "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева". - 1989. - С. 91 - 96.
77. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. - М.: Наука, 1967. - 660 с.
78. Кабанов Д.А. Обобщенный подход к исследованию автогенераторов // Радиотехника и электроника. - 1974. - № 8. - С. 1690 - 1697.
79. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. - М.: ОГИЗ, 1948. - 539 с.
80. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Наука, 1978. - 543 с.
81. Тихонов А.Н., Самарский Л.А. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1966. - 724 с.
82. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. - М.: Наука, 1964. - 344 с.
83. Яковлев В.Ф., Орел О.М. Модель травмованої кісткової тканини тварин, що знаходиться під дією НВЧ опромінення // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - Вип. 12. - 2003. - С. 60 - 67.
84. Яковлев В.Ф., Орел О.М. До питання про модель травмованої кісткової тканини тварин, що знаходиться під дією НВЧ опромінення // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - Вип. 12. - 2003. - С. 68 - 73.
85. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. - М.: Наука, 1978. - 302 с.
86. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. - Киев: Наукова думка, 1990. - 223 с.
87. Хандола Ю.М. Моделювання розподілу електромагнітних полів всередині мух шкідників сільського господарства // Праці таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. - 2001. - Т. 21, вип.. 1. - С. 78 - 81.
88. Плонси Р., Барр Р. Биоэлектричество. Количественный подход. - М.: Мир, 1992. - 366 с.

89. Игнатов В.В., Панасенко В.И., Пиренко А.П. и др. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку. - Саратов: Изд-во ун-та, 1978. - 80 с.
90. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Под ред. Н.Д. Девяткова. - М.: Наука, 1981. - 338 с.
91. Бруевич А.Н. Фазовая стабильность многокаскадных умножителей частоты // Радиотехника. - 1961. - Т. 21, вып. 63. - С. 43 - 48.
92. Андреев В.С., Мазуров М.Е. О некоторых причинах появления паразитной фазовой модуляции в многокаскадных умножителях частоты // Электросвязь. - 1963. - Вып. 59. - С. 10 - 19.
93. Андреев В.С. Воздействие низкочастотной помехи на многокаскадный умножитель частоты // Электросвязь. - 1963. - Вып. 65. - С. 7 - 14.
94. Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л. Фазовая нестабильность многокаскадных умножителей частоты // Радиотехника. - 1964. - Вып. 74. - С. 15 - 16.
95. Бруевич А.Н. Паразитная фазовая модуляция в умножителях частоты // Радиотехника. - 1961. - Т. 20, вып. 62. - С. 1 - 8.
96. Ризкин И.Х. Умножители и делители частоты. - М.: Связь, 1976. - 328с.
97. К вопросу исследования высокостабильных умножителей частоты / Бондавре В.И. и др. // Методы и аппаратура для измерения сдвига фаз. - Красноярск: Изд-во ун-та. - 1980. - С. 43 - 45.
98. Орел О.М. Аналіз методів та електрофізичних пристроїв для лікування кісткової хвороби тварин // Праці Таврійської державної агротехнічної академії.-Мелітополь:ТДАТА.-Вип.15.-2003.-С.92-98.
99. К вопросу разработки и исследования полупроводниковых умножителей частоты / Бондарев В.А., Клейман А.С. и др. // Измерение параметров, форм и спектра радиотехнических сигналов. - Харьков: ХГУ. - 1981. - С. 53 -54.
100. Оптимизация характеристик умножителей частоты / Бондарев В.А. и др. // Метрологическое обеспечение измерений частотных и спектральных характеристики излучения лазеров. - Харьков: ХГУ. - 1982. - 96 с.
101. Барретт Р.М. Печатные схемы сантиметровых волн // Печатные схемы сантиметрового диапазона. М.: Радио, 1956. - С. 9 - 29.
102. Ковалев И.С. Теория и расчет полосковых волноводов. - Минск: Наука и техника, 1967. - 233 с.
103. Головин Э.С., Петров Н.И. Некоторые возможности уменьшения паразитной фазовой модуляции в многократных умножителях частоты // Электросвязь. - 1967. - Вып. 48. - С. 54 - 61.
104. Жаботинский М.Е., Свердлов И.П. Основы теории и техники умножения частоты. - М.: Советское радио, 1964. - 328 с.
105. Бруевич А.Н. Оптимальные углы отсечки многокаскадных умножителей частоты // Электросвязь. - 1964. - Вып. 19. - С. 153 - 157.

106. Бруевич А.Н. Спектры в умножителях частоты // Радиотехника и электроника. - 1962. - Т. 7, вып. 22. - С. 1082 - 1090.
107. Компаратор фазовый автоматизированный образцовый Ч7-42. - Т.о. - Харьков, 1986.
108. Орел А.Н., Яковлев В.Ф. Метод расчета кварцевых генераторов СВЧ // Вісник ХДТУСГ.-Харків.-2003.-Вип.19.-С.191-197.
109. Рутман Ш. // ТИИЭР. - 1978. - Т. 66, № 9. - С. 70 - 102.
110. Митропольский А.Е. Техника статистических вычислений. - М.: Наука, 1971. - 576 с.
111. Изменение в клеточном составе костного мозга крыс при воздействии ЭМП / Ткаченко В.В. и др. // Сб. научн. трудов Киргизского мед. ин-та. - Фрунзе: Изд-во КМИ, 1983. - 190 с.
112. Хем А., Кармак Д. Гистология. - М.: Мир, 1981. - 154 с.
113. Афанасьев Ю.И. Гистология / Под ред. В.Г.Елисеева. - М.: Медицина, 1983. - 588 с.
114. Успенская Н.В. Клиника хронического воздействия электромагнитных волн малой интенсивности. - Л.: Медицина, 1963. - 94 с.
115. Брюхова А.К. и др. Изменение свойств культуры микроорганизмов под воздействием электромагнитных волн миллиметрового диапазона и лазерного излучения // Электронная промышленность. - 1985. - Вып.1. - С. 6-9.
116. Орел А.Н., Яковлев В.Ф. Лечение костной патологии животных низкоэнергетическим электромагнитным излучением СВЧ диапазона // Вісник ХДТУСГ. -Харків.-2003.-Вип.19.-С.197-201.
117. Яковлев В.Ф., Назаренко И.П., Орел А.Н. Высокостабильный источник СВЧ излучения дециметрового диапазона // Праці Таврійської державної агротехнічної академії.-Мелітополь:ТДАТА.-Вип.19.-2004.-С.101-106.
118. Яковлев В.Ф., Орел О.М. Біотроні параметри електромагнітного випромінювання для регенерації травмованої кісткової тканини тварин. // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. Науково виробничий журнал №3(8).-2004р.-С.64-68.
119. Богданович Н.И. Расчеты в планировании экспериментов.-Л.:Изд. ЛТА, 1978-80с.
120. Основи наукових досліджень електрифікованих технологій в аграрному виробництві: Навчальний – посібник / Г.Б.Іноземцев, В.В. Козирський – К.: ЦТІ "Енергетика і електрифікація", 2003-160с.