

УДК 631.371

№ держресстрації 0118U003311

Инв. №

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002

тел. +38(057) 7003888 <http://btu.kharkov.ua>, info@btu.kharkov.ua



З А Т В Е Р Д Ж У Ю
Проректор з наукової роботи

Валерій МИХАЙЛОВ

З В І Т

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ НА ТЕМУ:
«ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ
ЗБЕРІГАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ»
(остаточний)**

Керівник НДР

д.т.н., проф.

Косуліна Н. Г.

Харків – 2022

Рукопис закінчено 25 листопада 2022 року

Результати цієї роботи розглянуто науково-технічною радою факультету енергетики, роботехніки, біомедичної інженерії та електротехніки, протокол №2 від 26. 12. 2022 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР:

д.т.н., проф.



Косуліна Н. Г.
(вступ, висновки,
розділ 1 - 3)

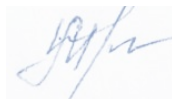
Виконавці:

к.т.н., доц.



Ляшенко Г. А.
(розділ 2)

к.т.н., доц.



Чорна М. О.
(розділ 3)
список літератури

аспірант



Федюшко О. Ю.
(розділ 1, 2, 3, 4)

Список викладачів та аспірантів
завірено



Декан ФЕРКТ Сорокін М. С.

РЕФЕРАТ

Звіт з НДР: 136 с., 38 рис., 8 табл., 139 джерел.

Мета роботи – удосконалення зберігання кісточкових плодів, оброблених плівкоутворюючими композиціями з використанням лікарсько-рослинної сировини.

Предмет дослідження. Низькоенергетичний електромагнітний метод і електронна система електромагнітного випромінювання для знищення мікроорганізмів, що викликають грибкові хвороби на плодах яблунь.

Об'єкт дослідження. Процес впливу низькоенергетичних електромагнітних випромінювань на мікроорганізми, які викликають фізіологічні і грибкові хвороби на плодах яблунь в процесі їх тривалого зберігання.

Методи дослідження. Для досліджень були використані методи математичної фізики; теоретичні положення електродинаміки, біофізики; основи електроніки і схемотехніки; методи планування повнофакторного експерименту.

Забезпечення населення плодовою продукцією визначається не лише рівнем виробництва, але й ефективною організацією зберігання. Практичний досвід показує, що для зберігання плодово-ягідної продукції широке поширення отримав метод зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем (РГС). Застосування РГС дозволяє значно збільшити вихід стандартної продукції в порівнянні із звичайним холодильним зберіганням на 10...15%, зменшити втрати в 2...3 рази без помітного зниження якості плодів. Існуюча система зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем разом з достоїнствами характеризується і рядом недоліків. До основного недоліку слід віднести те, що надмірний зміст вуглекислого газу в атмосфері зберігання здатний викликати порушення обміну речовин і розвиток побуріння тканин перикарпія, навіть у сортів, стійких до цих захворювань. Із-за надмірного накопичення продуктів анаеробного обміну різко знижуються

смакові якості, підвищується чутливість до низькотемпературних ушкоджень, знижується стійкість до мікроорганізмів. Значна доля втрат плодів (до 30%) в період зберігання доводиться на поразку їх фізіологічними розладами і хворобами (пліснява, стрептококи, грибки, спорові бактерії та ін.). Літературний аналіз показує, що сучасна технологія зберігання плодів в газовому середовищі є не завжди ефективною і дороговартісною. У зв'язку з чим виникає необхідність в розробці нових, доступніших і менш витратних технологій зберігання. Ефективна, недорога і доступна технологія зберігання плодів може бути здійснена за допомогою використання низькоенергетичної електромагнітної технології і електронних систем для знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні для їх тривалого зберігання. Застосування низькоенергетичного електромагнітного випромінювання зв'язок з найменшими витратами енергії при максимальному впливі на процеси інгібування життєдіяльності біоб'єктів. Проте, знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні може бути отримане тільки при оптимальному поєднанні параметрів біотропів впливаючого ЕМП (частота випромінювання, щільність потоку потужності, експозиція та ін.).

Таким чином, дослідження і розробка низькоенергетичних електромагнітних методів і джерел електромагнітного випромінювання для знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні є актуальним завданням.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Електромагнітного випромінювання, яблуко, електромагнітні технології, зберігання плодів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗНИЩЕННЯ ГРИБКОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ ПЛОДОВО- ОВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ	14
1.1. Аналіз хвороби фруктів і овочів	14
1.2. Аналіз існуючих технологій для зберігання плодів насінних культур	23
1.3. Біофізичні передумови для знищення шкідливих мікроорганізмів на плодах яблунь електромагнітною енергією ...	29
1.4. Аналіз технічних засобів електромагнітного випромінювання в КВЧ діапазоні з урахуванням спектральних і енергетичних характеристик	31
Висновки по розділу	33
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИФРАКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА БІОЛОГІЧНОМУ ОБ'ЄКТІ З ШАРОМ МІКРООРГАНІЗМІВ	34
2.1. Постановка завдання дифракції електромагнітних хвиль на поверхні яблук	34
2.2. Алгоритм побудови рішення задачі дифракції	39
2.3. Розрахунок середнього електричного поля в шарі мікроорганізмів	46
Висновки по розділу	56

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПО СТВОРЕННЮ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗНЕЗАРА- ЖЕННЯ ЯБЛОК	57
3.1. Обґрунтування структурної схеми джерела електромагнітної енергії	57
3.2. Аналіз флуктуаційних характеристик вихідного сигналу високостабільних по частоті джерел НВЧ і КВЧ діапазонів.....	59
3.3. Аналіз характеристик генератора з двохкільцевою системою ФАПЧ в мм діапазоні довжин хвиль	72
3.4. Аналіз стійкості генераторної системи з ФАПЧ.....	75
3.5. Обґрунтування структурної схеми і елементів помножувачів частоти для генератора на основі ФАПЧ	77
Висновки по розділу	82
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІ- ДЖЕНЬ ПО ЗНИЩЕННЮ ГРИБКОВИХ МИКРООРГАНІЗМІВ НА ПОВЕРХНІ ЯБЛУК ДЛЯ ИХ ТРИВАЛОГО ЗБЕРЕГАННЯ...	83
4.1. Мета і завдання експериментальних досліджень	83
4.2. Розробка кварцового генератора і помножувально- підсилювальних пристроїв	83
4.3. Дослідження характеристик джерела міліметрового діапазону довжин хвиль	96
4.4. Експериментальні лабораторні дослідження по знищенню грибкових мікроорганізмів з поверхні яблук електромагнітним випромінюванням	107
4.5. Виробничі випробування електронної системи по знищенню мікроорганізмів на поверхні яблук електромагнітним випромінюванням	111
Висновки до розділу.....	115

ВИСНОВКИ.....	7 116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	118
ДОДАТОК.....	132
Додаток А.....	133
Додаток Б	135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕМП – електромагнітне поле;

мм – міліметри;

ЕМВ – електромагнітне випромінювання;

НВЧ – надвисока частота;

КВЧ – крайвисока частота;

ЕП – електричне поле;

РГС – регульоване газове середовище;

ФАПЧ - фазове автопідстроювання частоти;

КГ – кварцовий генератор;

ФНЧ – фільтр низьких частот;

ФВЧ – фільтр верхніх частот.

ВСТУП

Забезпечення населення плодовою продукцією визначається не тільки рівнем виробництва, а й ефективною організацією зберігання. Практичний досвід показує, що для зберігання плодово-ягідної продукції широкого поширення набув метод зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем (РГС). Застосування РГС дозволяє значно збільшити вихід стандартної продукції в порівнянні зі звичайним холодильним зберіганням на 10...15%, зменшити втрати в 2...3 рази без помітного зниження якості плодів. Існуюча система зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем поряд з перевагами характеризується і рядом недоліків. До основного недоліку слід віднести те, що надмірний вміст вуглекислого газу в атмосфері зберігання здатний викликати порушення обміну речовин і розвиток побуріння тканин – перикарпійх навіть у сортів стійких до цих захворювань. Через надмірне накопичення продуктів анаеробного обміну різко знижуються смакові якості, підвищується чутливість до низькотемпературних пошкоджень, знижується стійкість до мікроорганізмів. Значна частка втрат плодів (до 30%) в період зберігання припадає на поразку їх фізіологічними розладами і хворобами (цвіль, стрептококи, грибки, спорові бактерії і ін.). Літературний аналіз показує, що сучасна технологія зберігання плодів в газовому середовищі є не завжди ефективною та досить дорогою в цілому. В зв'язку з чим виникає необхідність в розробці нових, більш доступних і менш витратних технологій зберігання. Ефективна, недорога і доступна технологія зберігання плодів яблуні може бути здійснена за допомогою використання низькоенергетичної електромагнітної технології та електронних систем для знищення фізіологічних і грибкових хвороб. Застосування низькоенергетичного електромагнітного випромінювання пов'язане з найменшими витратами енергії при максимальному впливі на процеси інгібування життєдіяльності біоб'єктів. Однак, знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні може бути отримано тільки при оптимальному

поєднанні біотропних параметрів, що впливають на ЕМП (частота випромінювання, потужність, експозиція і ін.).

Таким чином, дослідження і розробка низькоенергетичних електромагнітних методів і джерел електромагнітного випромінювання для знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні є актуальною задачею. Встановити аспекти впливу електромагнітних полів, що пов'язані не з потужністю впливу і поглиненої енергією, а з інформацією закодованої в біотропних параметрах ЕМП, можливо на основі теоретичних досліджень, які на цей момент відсутні. Для визначення біотропних параметрів ЕМП (частота, потужність, експозиція), що викликають пригнічення патогенних мікроорганізмів на поверхні яблук, були проведені дослідження з розподілу електричного поля всередині тонкого сферичного шару з мікроорганізмами на основі моделі, яка представлена сферою, що наповнена ізотропним однорідним середовищем з діелектричною і магнітною проникністю. Для вирішення даної задачі були використані потенціали Дебая і метод розділення змінних в сферичній системі координат. Загальне рішення системи рівнянь з розподілу електричного поля всередині тонкого сферичного шару з мікроорганізмами було зведено до вирішення двох скалярних рівнянь Гельмгольца для електричного і магнітного потенціалів Дебая. Розглядаючи модель яблук як відкритий діелектричний резонатор, була отримана залежність середнього поля в шарі з мікроорганізмами від частоти збуджуючої електромагнітної хвилі, яка дозволила визначити резонансні частоти при яких середнє поле приймає максимальне значення. Інформація про резонансні частоти шару яблук з мікроорганізмами дозволила визначити необхідні біотропні параметри електромагнітного поля і потужність зовнішнього джерела для ефективного впливу електромагнітного випромінювання на мікроорганізми в поверхневому шарі яблук.

Теоретичний аналіз процесу взаємодії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з шаром мікроорганізмів на поверхні яблук показав, що для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук їх необхідно опромінювати ЕМІ в мм діапазоні. Таким чином, для виконання мети дисертаційної роботи необхідні

джерела ЕМВ в мм діапазоні з частотою перебудови 73...77 ГГц, які поряд з вихідною потужністю 650...750 мВт повинні задовольняти вимогам по нестабільності частоти 10^{-8} ... 10^{-7} , ступеню придушення дискретних складових в спектрі вихідного сигналу 40...50 дБ. Задачу зі створення генераторів в мм діапазоні можна вирішити на основі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) автогенератора по частоті високостабільного генератора радіодіапазону з наступним множенням частоти і виходом на систему випромінювання.

Аналіз високостабільної по частоті системи на основі ФАПЧ зводиться до визначення структурної схеми системи перенесення спектра від кварцового генератора (КГ), що задає з частотою 50 МГц в міліметровий діапазон, і алгоритму функціонування окремих елементів ФАПЧ, що забезпечують мінімальне значення дисперсії вихідного сигналу. Система ФАПЧ може розглядатися як фільтр низьких частот (ФНЧ) щодо шумів коливань опорної частоти і як фільтр верхніх частот (ФВЧ) щодо шумів налаштовуємого генератора. Причому постійна фільтра одна і та ж. Застосування системи ФАПЧ дозволить забезпечити необхідне відношення сигнал / шум на виході генератора при мінімальному значенні дисперсії фази вихідного сигналу. З розгляду структурної схеми генератора виходить, що показники системи перетворення частоти повністю визначаються показниками ФАПЧ: смугами захоплення і утримання, стійкістю, фільтруючою здатністю, числом кільць ФАПЧ.

В результаті досліджень було розроблено генератор для знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні яблук, що перебудовується за частотою з нестабільністю частоти 10^{-8} ... 10^{-7} на основі двох кільцевої фазової автопідстройки потужного синхронізованого генератора за частотою 73...77 ГГц за кварцовим генератором, який працює на частоті 50 МГц.

Помножувач частоти в першому кільці ФАПЧ було виконано на транзисторах з коефіцієнтом множення $N = 10$ ($n_1 = 5$; $n_2 = 2$) і вихідною частотою 500 МГц, а для формування гармоніки в діапазоні перебудови частоти 7,3...7,7 ГГц буде використовуватися діод типу ДЗ12 з накопиченням заряду і коефіцієнтом множення 15. Помножувач в другому кільці ФАПЧ генератора з

вихідною частотою 73...77 ГГц було виконано на лавино-пролітному діоді з кратністю множення 10 і вихідною потужністю 50 мВт. Як впливає з аналізу отриманих результатів найбільш прийнятними параметрами двох кільцевої системи ФАПЧ, при яких нестабільність частоти синхронізованого генератора складе 10^{-8} , будуть параметри: $T_y = 10^{-6}$ с; $T_{\text{фд}} = 10^{-3}$ с; $T_1 = 10^{-2}$ с; $T_2 = 10^{-3}$ с; $T_3 = 10^{-4}$ с; $T_4 = 10^{-5}$ с; $\omega_{y\partial} = 10^5$ рад; $N_1 = 150$; $N_2 = 10$; придушення побічних гармонік вхідної частоти не менше 60 дБ; рівень фазових шумів $W = 100 - 110$ дБ/Гц; відносна нестабільність частоти $10^{-7} \dots 10^{-8}$; а відношення потужності сигналу до потужності шумів $P/P_{\text{ш}}$ склало 67,3 дБ. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що для обробки яблук електромагнітним випромінюванням перед їх зберіганням слід використовувати джерело КВЧ випромінювання з параметрами: діапазон перебудови частоти 73...77 ГГц; вихідна потужність 650...750 мВт; придушення побічних гармонік в спектрі вихідного сигналу не менше 48 дБ; короткочасна відносна нестабільність частоти генератора 10^{-8} за 10^{-3} с.; електронна перебудова частоти 600 МГц/В.

Експериментальні дослідження показали, що для тривалого зберігання яблук їх слід опромінювати електромагнітним випромінюванням з параметрами: частота $75,8 \pm 0,1$ ГГц; потужність на поверхні яблук $650 \pm 0,5$ мВт; час експозиції $60 \pm 5,0$ с., температура навколишнього середовища $18 \dots 20^\circ\text{C}$. Застосування ЕМВ міліметрового діапазону для обробки яблук дозволить знищити мікроорганізми на їх поверхні і збільшити термін зберігання яблук до 120 діб при температурі $18 \dots 20^\circ\text{C}$ в умовах зовнішнього середовища. Економічна ефективність від застосування електромагнітної технології для тривалого зберігання яблук складе близько 10 000 грн. на 1 т продукції.

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

- на основі розробленої моделі вперше досліджено процес взаємодії низькоенергетичних ЕМП з мікроорганізмами, що визивають хвороби плодів яблуні під час їх тривалого зберігання;

- вперше, на основі теоретичних досліджень були визначені параметри низькоенергетичних ЕМВ для знищення грибною мікрофлори на поверхні плодах яблунь;

- отримала подальший розвиток теорія досліджень по розробці високостабільного генератора, що перебудовується за частотою, з метою знищення мікроорганізмів на поверхні плодів при їх тривалому зберіганні, яка відрізняється від відомих тим, що в ній СВЧ система побудована на основі ФАПЧ, а в вихідному каскаді використана система на основі відкритого бочкоподібного резонатора з лавино-пролітними діодами.

- вперше математично інтерпретовано вплив параметрів низькоенергетичного ЕМП зі знищення грибних мікроорганізмів на поверхні плодів при їх тривалому зберіганні.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних і експериментальних досліджень, розроблено низькоенергетичний електромагнітний метод і генераторну систему електромагнітних коливань для знищення грибних мікроорганізмів на поверхні плодів яблунь. Застосування даної технології дозволяє повністю зберегти якість і товарний вигляд плодів, знизити витрати на зберігання до 40% ... 60% в порівнянні з існуючою технологією зберігання плодів, збільшити тривалість зберігання до 5...6 місяців. Результати досліджень апробовані в 2017...2018 годах. Прибуток від застосування інформаційного електромагнітного методу склав 10 000 грн. на тонну яблук.

Ключові слова: електромагнітне поле; грибкові мікроорганізми; тривале зберігання яблук.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗНИЩЕННЯ
ГРИБКОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ ПЛОДОВООВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ

1.1. Аналіз хвороб фруктів і овочів

Основними втратами об'ємів фруктів при зберіганні є втрати, пов'язані з хворобами грибкового характеру; їх об'єм важко піддається прогнозам, але у разі масового поширення може досягати 100% [1 – 4]. До грибкових мікроорганізмів відносяться: плодова гнилизна, чорна гнилизна, пеницильоз, антрактоз, фузаріоз, ботритіоз, парша, альтернаріоз, кладоспоріоз, стемфіліоз та ін. [4 – 7].

Плодова гнилизна, моніліоз викликається грибом *Moniliafructigena*Pers.exFr. Поразка розпочинається з невеликої бурої плями, яка швидко розростається і охоплює усю поверхню плоду. М'якуш набуває буровато-коричневого кольору, розм'якшується, стає рихлим, губчастим і втрачає свої смакові якості. При зараженні плодів на їх поверхні утворюються жовтувато-бурі подушечки конидіального спороносіння гриба, розташовані правильними концентричними колами подушечки складаються з щільного сплетення гіф, від кінців яких відходять невеликі конидіеносці з розташованими на них ланцюжками, що галузяться, спор конидій. Конидії в ланцюжках майже округлі, лимоновидні або еліпсоїдні, розміром 17,5...25x11...15 мкм.

До основних заходів, обмежуючих виникнення і розвиток плодової гнилизни в період зберігання відноситься комплекс хімічних препаратів і інших заходів боротьби зі шкідниками і хворобами, що схильні до зараження плодів на дереві; ретельне відбракування хворих і пошкоджених яблук при сортуванні і упаковці.

Чорна чи чорноракова гнилизна, викликається грибом *Sphaeropsis malorum*, який є конидіальною стадією сумчастого гриба *Physalosporamalorum* (Arn). Цей гриб проявляється на плодах у вигляді чорної гнилизни. Поразка

розпочинається з бурої плями, що повільно збільшується у розмірі, на якій потім утворюються дрібні чорні горбки-пікніди гриба, що випинають з поли шкірки. З

часом плід чорніє і муміфікується, як і при плодової гнилизні, але без синюватого відтінку і з пошерхлою поверхнею із-за маси пікнід. Пікніди кулясті, іноді сочевицеподібні, іноді злегка плескаті, чорні, блискучі. Пікноспори овальні або еліпсоїдні, з розмірами 24...30x10...12 мкм, одноклітинні або з однією перегородкою, спочатку безбарвні, потім темно-бурі, з товстою оболонкою. Розвиток чорної гнилизни протікає значно повільніше, ніж плодової (моніліоза).

Сиза пліснявовидна гнилізна, сиза пліснява, пеницільоз. Викликається грибками роду *Penicillium*, частіше усього *P. expansum* (L.k.) Thom (syn. *P. glaucum* L.k., *P. crustaceum* Fr.), який окрім яблук може вражати і інші фрукти, а також овочі. Гнилізна розпочинається з невеликої водянистої світло-коричневої плями, яка у міру розростання злегка вдавлюється і набуває складчастості. При легкому натиску шкірка лопається і виділяються краплі вологи. Пляма покривається спочатку білим міцелієм, а потім спороносінням гриба у вигляді маси зеленувато-сизих або сіро-зелених подушечок, у зв'язку з чим гнилізну часто називають сизою пліснявовидною.

Конидієносці *P. expansum* мають гроновидну будову (кисті несиметричні) з мутовками на кінцях. Спори розташовані ланцюжками. За формою вони широко еліпсоїдні чи (пізніше) майже кулясті, гладкі, розміром від 2 до 4 мкм (в середньому 3...3,4 мкм), зеленуватого кольору. М'якуш, що загнив, має неприємний кислий смак і затхлий запах, який легко передається і здоровій частині плоду. Зараження пенициліумом відбувається зазвичай вже після прибирання плодів. Гриб впроваджується в плід через сочевички або головним чином через механічні ушкодження шкірки, нанесені при прибиранні, упаковці, транспортуванні. Розвиток гнилизни відбувається тим швидше, чим вище температурний режим в сховищі (гриб здатний розвиватися навіть при 0°C і спороносити при +2°C). Найбільш важливі запобіжні заходи – обережне поводження з плодами, підтримка чистоти в пакувальних приміщеннях і сховищі

(дезинфекція тари і фруктосховищ), дотримання необхідної температури при перевезеннях і зберіганні.

Гірка глеоспориозна гнилизна, або антракноз. Глеоспориозною гнилизною називають ураження плодів, що викликається грибами роду *Gloeosporium*. Залежно від виду гриба, що викликає ураження, як зовнішні симптоми прояву, так і діагностичні ознаки збудника можуть дещо розрізнятися. При ураженні *Gloeosporium album* Osterw. плями на плодах округлі, з різкими контурами, бурі, втиснуті, зі світлими подушечками спорносія, розташованими концентричними колами; ложа білуваті, діаметром 200...250 мкм. Конидії безбарвні, циліндричні, злегка зігнуті, на кінцях закруглені, 16...24x3,5 мкм. Конидієносії переважно короткі, іноді у основи розгалужені. Цей вид гриба вражає тільки яблуню та групу і розвивається при зберіганні головним чином на повністю дозрілих плодах. Здатний розвиватися в широких температурних межах, у тому числі і при низьких температурах.

Проникнення інфекції і розвиток гнилизни полегшується наявністю механічних ушкоджень на плодах, високою вологістю, підвищеними температурами. Важливе значення має зниження природних захисних властивостей у плодів при повному дозріванні.

У захисті від глеоспориозної гнилизни важливе значення мають заходи, що зменшують запас інфекції в саду, а також дотримання умов транспортування і зберігання, дбайливе поводження з плодами (не допускати ушкоджень шкірки). При появі захворювання усю партію плодів слід реалізовувати в найкоротші терміни.

Рожева пліснявовидна гнилизна, рожева цвіль, тріхотеціоз. Викликається грибом *Trichothecium roseum* Lk. Для поразки цим грибом характерна поява бурої гниючої плями, яка найчастіше розташовується на плоді довкола чашки або місця прикріплення до плодоніжки. Пляма, що розростається, покривається спочатку білим нальотом міцелія, а потім, у зв'язку з утворенням спорношення, набуває рожевого відтінку. У багатьох випадках поразка гіркою рожевою гнилизною виявляється лише при розрізанні плоду:

уражені насінні камери наповнені рожевим нальотом спороношення. Спори гриба безбарвні, грушовидні, двохклітинні, причому верхня клітка коротша і ширша. Розмір спор 12...18x8...10 мкм. Уражена тканина має різко виражений гіркий смак.

Фузаріозна гнилизна, фузаріоз. Збудниками можуть бути декілька видів грибів роду *Fusarium*-*F. culmorum* (Lib.) Sacc., *F. lateritium* Nees та ін. Проте найбільш поширеним вважається *F. avenaceum* (Fr.) Sacc. (syn. *F. purtefaciens* Osterw.) який здатний заражати багато видів сільськогосподарських рослин. При поразці яблук гриб розвивається в основному в насінних камерах, через що вони стають гіркими. Від серцевини, що загнила, гриб поширюється потім на увесь плід, який в результаті зсихається і покривається рожевуватими подушечками конидіального спороносіння. Конидії *F. avenaceum* безбарвні, серповидні зігнуті, з 3...5 поперечними перегордками.

Фузаріозна гнилизна проявляється, як правило, вже до кінця зберігання, хоча зараження плодів відбувається зазвичай ще на дереві, незадовго до прибирання. Найбільш сприйнятливі, як і до гіркої гнилизни, що викликається грибом *Trichothecium roseum*, сорти, що мають відкриту чашку (Голден Делишес та ін.). Проникненню інфекції в плід можуть сприяти також різні механічні ушкодження шкірки - тріщини від парші, ушкодження при прибиранні та ін. При загніванні, що почалося через ушкодження шкірки, поверхня плоду, ураженого фузаріозом, часто покривається білим, ватоподібним нальотом, що складається з міцелія гриба. При зберіганні чим вище температура і вологість в сховищі тим швидше розвивається гнилизна.

Сіра гнилизна, ботритіоз. Викликається тим же грибом *Botrytis cinerea* Pers. ex Fx., що і сіра гнилизна винограду, а також капусти, моркви і інших овочів. Хвороба проявляється у вигляді м'якої гнилизни плоду з утворенням на ній (в умовах високої вологості) сірого пухнастого нальоту, що складається з міцелія, конидієносців і конидій збудника. Конидієносці галузяться, з невеликими потовщеннями на кінцях. Спори (конидії) безбарвні або слабкодимчасті, яйцевидні, одноклітинні, 8...12x6...10 мкм, гронах. З часом на

плодах, що погнили, утворюються численні чорні склероції. Заражена тканина має кислий смак. Інфекція збудника сірої гнилизни може потрапити в плоди ще в саду або в період товарної обробки при підготовці до транспортування, але розвиток гнилизни і повторні зараження нею відбуваються вже під час зберігання. При цьому всяке порушення в режимі зберігання послабляють стійкість плодів до збудника сірої гнилизни і посилюють її розвиток. Зараження може статися і при спільному, навіть короткочасному, перебуванні плодів в тому ж приміщенні, де зберігаються виноград, морква або інші овочі, уражені цим же видом гнилизни, та як спори дуже легко поширюються по повітрю. Джерелами інфекції можуть служити також забруднена збудником тара або приміщення, якщо вони не були завчасно підготовлені - очищені і продезинфіковані.

Парша. Всюди поширене захворювання. У яблук його викликає гриб *Fusicladium dendriticum* (Wallr) pirinum Feki., а у груші *Fusicladium pirinum* Feki. В сумчастій стадії, яка викликає первинне зараження рослин в саду, збудник парші яблуні носить назву *Venturia innaequalis* (Cke.) Wint., груші - *Venturia pirima* (Bref.) Adeerh.

На уражених плодах з'являються округлі, різко обкреслені, темні плями з добре помітним нальотом спороносіння або згодом майже без нього. На межі здорової і ураженої тканин часто помітний світлий сіруватий обідок, що виник в результаті розриву тканини. Під плямами утворюється бурий пробковий шар, глибше за який гриб не проникає. Наліт, що розвивається на плямах, складається з конидієносців і конидій гриба. Конидієносці бурі або оливкові, прямостоячі, гладкі, прямі, рідко викривлені, зазвичай одноклітинні, іноді у підстави роздуті. Конидії (по одній на конидієносці) оливкові, оберненогрушоподібні, одноклітинні або рідше з однією перегородкою, до конидієносця прикріплені широким кінцем. Розміри конидій у збудника парші яблуні 13...30×6...12 мкм, у парші груші 13...30×5...9 мкм. Зараження паршею відбувається завжди в саду, подальшого поширення (нових перезаражень) при зберіганні не буває. Для захисту від захворювань треба в саду, в період вегетації, проводити комплекс

санітарно-профілактичних і хімічних заходів, оскільки окрім плодів паршею вражається також листя, а іноді і пагони, особливо у груш.

Сажистий наліт (сажистий грибок). Під цією назвою відома поразка плодів, що проявляється у вигляді темних сажистих плям найрізноманітнішої величини і форми. Дуже часто ці плями зливаються в один загальний суцільний наліт. Поразка пов'язана з поселенням недосоналого пикнідіального гриба *Gloeodes pomigena* (Schw.) Colby. Сам наліт є поверхнево розташованим (променисто-волокнистим або комірчастим по будові) багатоклітинним міцелієм гриба, а також його пикнідіальним спороносінням. Пікноспори довгасті 3... 3,5×2 мкм, одноклітинні, безбарвні. Пікніди на грибниці утворюються рідко, а якщо і утворюються, то дозрівають зазвичай лише до березня-квітня наступного року і повторного зараження плодів в сховищі не відбувається.

Захворювання починається в саду, не задовго до збирання врожаю, зараженню сприяє висока вологість і слабка освітленість дерев, тому в загущених і розташованих на низинах ділянках сада нальоту сажі на плодах буває більше. Гриб не викликає загнивання, але при сильному ураженні знижується товарний вид плодів.

Мухосід. Шкідливість цих захворювань незначна, оскільки ні смакові якості, ні лежкість плодів не знижується, але зовнішній вигляд значно псується. Утворення численних темних точок на поверхні плоду, схожих на екскременти мух, обумовлено скупченням зібраних в групи дрібних, дуже численних, плескатої форми блискучих пікнід гриба *Leptotrhyrium poti* (Mont. etFr.) Sacc. Спори в пікнідах безбарвні, округлі, 7 мкм в діаметрі, частіше зустрічаються в незрілому стані.

Оливкова пліснявовидна гнилизна, оливкова пліснява, альтернаріоз. Викликається грибами роду *Alternaria*, переважно *A. tenuis* Nees (syn. *Alternaria alternata* Fr.). Захворювання проявляється зазвичай в другій половині або до кінця зберігання, коли яблука починають перезрівати. Проникненню інфекції і зараженню сприяють різні механічні ушкодження на шкірці. На ураженій поверхні утворюється спочатку міцелій, а потім темний оливково-зелений наліт

спорносілля гриба. Спори (конидії) зібрані в коло, обертабулавидної форми, з короткою ніжкою, 3...5 поперецними і 1...3 подовжніми перегородками, оливково-коричневі. Тканина під плямою (нальотом) темнофарбована (темнокоричнева або майже чорна), різко обмежена здоровою. Части гнилизни зазвичай сухі, тверді і неглибокі. Основні заходи, що обмежують поразки яблук альтернаріозною гнилизною: обережне поводження з плодами при прибиранні, упаковці, транспортуванні, дотримання правильного режиму зберігання, дезинфекція тари і приміщення для зберігання і інші профілактичні заходи.

Стемфіліоз. Гриб *Stemphylium* Wallr. (по сумчастій стадії - *Pleosporaherbarum* (Pers. ex Fr.) Rbnh.) що викликає це захворювання, здатний розвиватися на багатьох видах рослин. По симптомах поразка схожа з альтернаріозом. На плоді утворюються темно-бурі, частково чорні ділянки тканини, що загнила, без поглиблень. Поверхня їх з часом покривається чорно-зеленим нальотом, що складається з міцелія і конидіального спорносілля гриба.

Спори *St. botryosum* багатоклітинні, з 3...10 поперецними і декількома подовжніми перегородками, сильно перешнуровані, темно-оливкові або бурі, розміром 13,5...66×7...28,5 мкм. Зараження плодів стемфіліумом відбувається зазвичай на дереві, але активний розвиток збудника починається лише в сховищі. Максимальна кількість хворих яблук виявляється до кінця зберігання, коли гриб може поширюватися і на інші плоди, що є у контакті з тими, що загнили.

Фомоз. Викликається грибами роду *Phoma*, в основному *Phoma rotogum* Thuem. Плями на плодах більш менш округлі, втиснуті, зазвичай темно-коричневі, різко обмежені від здорової тканини ясною пурпурно-чорною вузькою облямівкою. Пікніди нечисленні, що наполовину виступають, кулясті або злегка плескаті, чорні, такі, що виступають з-під кутикули. Пікноспори еліпсоїдно-кулясті, сіруваті, без крапель олії, діаметром 5...7 мкм.

Зараження фомозом відбувається під час вегетації (через відкриття сочевички, чашку, а також неушкоджену кутикулу), але симптоми захворювання з'являються лише через декілька місяців зберігання. Більше інших схильні до

фомозної гнилизни сорти Джонатан, Клівія, Ауралія (ГДР). Перезаражень під час зберігання не відбувається.

Фацидієзна гнилизна, фацидієльоз. Збудник – гриб *Phacidioruncismalorum* Poteb., що є конідіальною стадією сумчастого гриба *Potebniamyces discolor* (Mont. et Sacc.) Smerlis (syn. *Phacideiia discolor* (Mont. et Sacc.) Poteb.

На уражених плодах виявляються зеленувато-бурі або бурі ділянки, що загнили, які досить швидко збільшуються і незабаром охоплюють увесь плід. Яблуко, що загнило, стає зморщеним, сухим, шкірястим. З часом на поверхні виходить спороложка конідіального спороносіння гриба у вигляді невеликих, спочатку попелясто-сірих, а потім майже чорних неправильношаровидних ущільнень, утворених пікнідами гриба. Пікноспори безбарвні, двох типів: мікроконидії дрібні, еліпсоїдальні, з двома краплями олії, 5×2 мкм, макроконидії більші, короткояйцевидні, з однією або декількома дрібними краплями олії, 12×8 мкм. Гнилизна з'являється зазвичай другій половині зберігання і може легко поширюватися на сусідні плоди. Особливо сприйнятливий сорт Голден Делишес. Джерело первинної інфекції - уражений фацидієлою плодів дерева, у яких гриб викликає виразковий некроз кори.

Фітофторозна гнилизна, фітофтороз. Викликає грибок *Phytophthora cactorum* (Leb. et Cohn) Schroett (syn. *Phytophthora omnivora* Dyb.), здатним вражати багато видів сільськогосподарських і інших рослин.

При зараженні плодів яблуні на шкірці утворюється нерівномірні ділянки, що загнили, різко відмежовані від здорової частини. У сортів з жовтим забарвленням шкірки уражені ділянки бувають шоколадно-бурого або бурочервоного кольору, у сортів із зеленим забарвленням плями виглядають дещо світліше, ніж увесь плід. Уражена фітофторозом тканина стає губчастою, але залишається твердою, і навіть яблука, що повністю погнили, довго зберігають форму. При розрізі плоду виявляється інтенсивне побуріння судин.

В умовах дуже високої вологості і температури не нижче 10 С на поверхні плодів можуть утворюватися міцелій і спороносіння гриба у вигляді

слаборозвиненого білуватого нальоту. Зооспорангії майже безбарвні, великі, 20...55×17...40 мкм, овальні або лимоновидні, часто оберненогрушеподібні, з сосочками на вершині. Гіфи міцелія ниткоподібні, іноді вузлуваті, такі, що галузяться під прямим кутом. Зооспорангієносці також тонкі, слаборозгалужені, що майже не відрізняються від гіф, на кінцях бульбашковидні роздуті. Зараження плодів фітофторозом відбувається ще в саду, в період вегетації. При цьому в першу чергу вражаються плоди опалі або такі, що низько висять, розташовані ближче до ґрунту.

Цитоспороз зустрічається частіше в південний районах країни на незрілих плодах. Збудники – гриби роду *Cytospora* (на плодах яблуні і груші — *C. schulzeri* Sacc. et Syd., syn. *C. capitata* Sacc. et Schulz., на плодах айви – *C. cydoniae* Bub. et Kab.). Вони розвиваються в основному на гілках плодових дерев. На заражених плодах утворюються плями неправильної форми, досить великі, сухі, світло-коричневі, з чітко вираженим пурпуровим обідком. На плямах формуються пікніди – багатоканальні, коничні або плескаті, їх гирла виступають на поверхню і добре помітні неозброєним оком. Конидії (пікноспори) безбарвні, злегка зігнуті, 5...8×1...1,5 мкм. При транспортуванні або зберіганні зараження плодів не відбувається.

Гнилизна нектриальна. Збудник – *Cytindrocarpon mali* (Allesch.) Wr., що є конидіальною стадією гриба *Nectriagalligena* Bres. (syn. *Dialonectriagailigeeena* (Bres.) Petch). Гриб викликає звичайний рак плодових дерев, який називають також західним, або європейським. Спороносіння збудника, що розвивається на уражених гілках, служить джерелом зараження плодів. Проникнення гриба в плод відбувається зазвичай через поглиблення у плодоніжки, де переважно і виявляють перші симптоми захворювання. Уражені ділянки бурого або темно-бурого кольору, глибоко западають в тканину. До кінця зберігання яблуко може бути повністю охоплене гнилизною, воно покривається «подушечками» кремового кольору, що є конидіальним спороносінням збудника.

Конидії циліндричні або булавоподібні, прямі, рідше зігнуті, на кінцях притуплені, зазвичай мають 5, рідше 3 – 4 або 6 – 7 перегородок, розміром в

середньому 54...62×3...6 мкм. Конидієносці прості, рідше кільчасто розгалужені. Повітряний міцелій пухнастий, що розвивається навколо строми, зазвичай білий, іноді лимонно-жовтий. Зараженню плодів сприяють затяжні періоди випадання опадів під час збору урожаю. В період зберігання можливі перезараження. Проведений аналіз хвороб плодів показує, що для підвищення стійкості плодів до хвороб їх необхідно обробляти перед зберіганням біологічно активними речовинами (солі кальцію, етилен-продуценти, інгібітори) або знищувати грибкові мікроорганізми низькоенергетичним електромагнітним випромінюванням з певними біотропними параметрами.

1.2. Аналіз існуючих технологій для зберігання плодів насінних культур

Забезпечення населення плодовою продукцією визначається не лише рівнем виробництва, але і ефективною організацією зберігання. Значний вклад в дослідження по зберігання плодів і овочів внесли учені: Гудковський В. А., Балакірев А. Е., Мамедов Р. К. та ін. Нині розрізняють декілька технологій зберігання: короткочасне зберігання в неохолоджуваних сховищах, зберігання в звичайній атмосфері (ЗА), регульованій атмосфері (РА), модифікованій атмосфері (МА) [8...14].

Успіх зберігання плодоовочевої продукції залежить від того, які умови будуть створені для зберігання. Основні чинники успішного зберігання в холодильних камерах, складах і сховищах – це температура, вологість і склад газового середовища [10, 15 – 17]. Зберігання плодів в звичайній атмосфері допускає повітряне середовище з сумарним вмістом кисню і вуглекислого газу близько 21%. При зберіганні плодів яблунь в звичайній атмосфері через тричотири місяці відбувається збільшення втрат товарних якостей, погіршення зовнішнього вигляду, розвиток фізіологічних захворювань. Ці втрати таких плодів можуть досягати до 40...50% [18 – 20]. Практичний досвід показує, що

для зберігання плодово-ягідної продукції широке поширення отримав метод зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем (РГС) [18, 21, 22]. Цей метод, ґрунтований на підвищеному утриманні двоокису вуглецю і зниженому кисню в повітрі, дістав назву зберігання плодів в регульованому газовому середовищі [15, 16, 23]. Усі режими регульованого газового середовища в залежності від співвідношення кисню, вуглекислого газу і азоту діляться на три типи:

- нормальна атмосфера, в якій сума концентрацій CO_2 і O_2 рівна 21%; при цьому кількість CO_2 коливається в межах 5...10%, а O_2 в межах 11...16% і N_2 – 79%. Це середовище чинить інгібувальну дію на життєдіяльність плодів і вражаючих їх мікроорганізмів;

- субнормальна атмосфера, що містить помірну кількість CO_2 , але значно збіднена киснем. Сумарна кількість CO_2 і кисню не перевищує 10%, наприклад, 3 – 5% CO_2 , 3... 5% O_2 і 90...94% N_2 . У такому середовищі процеси старіння і дозрівання плодів сповільнюється найбільшою мірою, обмежується і розвиток фітопатогенних захворювань;

- субнормальна атмосфера з низьким вмістом O_2 (2 – 3%) і CO_2 (не більше 1%), рекомендована для сортів, які не виносять CO_2 в атмосфері зберігання. У такому середовищі інтенсивно протікає дозрівання продукції [19, 23, 24 – 27]. Слід уточнити, що склад середовища при зберіганні яблук має бути строго диференційований, з урахуванням зони зростання, сорту, агротехнічних прийомів [28 – 32].

В умовах регульованої атмосфери гальмується гідроліз полісахаридів, що перешкоджає розм'якшенню плодів, пригніченню розпаду хлорофілу. Підвищені концентрації CO_2 , етилену, що є конкурентним інгібітором, знижують біологічну активність останнього, уповільнюючи дозрівання плодів. Зменшення концентрації кисню в регульованій атмосфері сприяє кращому збереженню Р і С – вітамінної активності, уповільнює синтез етилену в плодах яблук [19, 24 – 26]. Застосування РГС дозволяє значно збільшити вихід стандартної продукції в порівнянні із звичайним холодильним зберіганням на 10...15%, зменшити

втрати в 2...3 рази без помітного зниження якості плодів, збільшити лежкоздатність багатьох сортів до чотирьох місяців в порівнянні із звичайним зберіганням. Економічний ефект від зберігання плодів в РГС в порівнянні із звичайним зберіганням складає додатковий дохід до 60% [15, 17 – 19]. Існуюча система зберігання плодів разом з достоїнствами характеризується і рядом недоліків. З проведеного аналізу виходить, що надмірний зміст вуглекислого газу в атмосфері зберігання здатний викликати порушення обміну речовин і розвиток побуріння тканин перикарпія, навіть у сортів, стійких до цих захворювань. Із-за надмірного накопичення продуктів анаеробного обміну різко знижуються смакові якості, підвищується чутливість до низькотемпературних ушкоджень, знижується стійкість до мікроорганізмів. У деяких сортів яблук низькі концентрації кисню в атмосфері сховища посилюють негативну дію CO_2 , погіршуючи якість плодів, які набувають спиртового присмаку. Зовнішні ушкодження від низького вмісту кисню можуть проявлятися у вигляді почервоніння, можливе червоне забарвлення шкірки [19, 24 – 26, 33, 34]. Зберігання плодів яблук в модифікованій атмосфері полягає у використанні полімерних плівок. У пакунках з яблуками з поліетилену природним чином створюється певне газове середовище. У пакунках збільшується концентрація вуглекислого газу і знижується вміст кисню за рахунок дихання самих плодів. Через плівку відбувається дифузія газів: вуглекислий газ дифундує в довкілля зі швидкістю, величина якої визначається різницею між концентраціями вуглекислого газу усередині і зовні плівкової упаковки. Дифузія кисню всередину пакету зростає у міру споживання його плодами в процесі дихання. Зазвичай проникність плівки для вуглекислого газу в 2...5 разів вище, ніж для кисню. Міру випару вологи можна регулювати перфорацією плівки, причому кількість і розміри осередків обумовлюються видом плодів і умовами їх зберігання [8, 26, 35...39]. Зберігання плодів в поліетиленових пакетах може бути рекомендоване для сортів, які стійкі до зовнішніх і внутрішніх ушкоджень від вуглекислого газу, коли його концентрація досягне 5...6% [8, 40].

У деяких роботах [25, 26] повідомляється про ефективність попередньої

обробки плодів підвищеними концентраціями вуглекислого газу близько 10... 15% впродовж декількох днів і навіть 1...2 тижнів. Обробка плодів підвищеними концентраціями вуглекислого газу покращує результати подальшого зберігання як в охолоджуваних, так і неохолоджуваних сховищах.

При зниженні концентрації кисню в газовому середовищі зменшується інтенсивність дихання і інших окислювальних процесів в плодах в ході зберігання, пригнічується синтез летких речовин, а також гормону дозрівання (етилену). Кисень стабілізує структуру клітини, сприяє зниженню рівня розвитку як фізіологічних, так і мікробіологічних хвороб [23, 24]. Окрім кисню і вуглекислого газу у складі атмосфери знаходиться інертний газ азот. Введенням азоту в атмосферу призводить до уповільнення процесу дозрівання плодів, а терміни зберігання їх подовжуються [23, 25, 26]. Дослідження по застосуванню озону для успішного і якісного зберігання плодів показали, що озонування повітря знижує його мікробіологічну забрудненість. Проте короткочасна обробка повітря при малих концентраціях може стимулювати зростання мікроорганізмів, а при зберіганні плодів з концентрацією озону від 2 до 10 ррш викликати їх загибель. Експерименти показали, що при озоновій концентрації 2 ррш якість більшості видів не погіршується навіть після холодного зберігання впродовж п'яти місяців. Зменшення концентрації не робило ніякого впливу на норму дихання плодів [41...43]. Одна з головних причин зниження якості і розвитку багатьох захворювань плодів і овочів при зберіганні – надмірне накопичення етилену. Етилен синтезується плодами і овочами, активізує їх дозрівання. Накопичення етилену в камерах з регульованою атмосферою робить вплив на окремі процеси обміну речовин, підвищуючи активність деяких ферментів вуглеводного, жирового і білкового обмінів, збільшує інтенсивність дихання, викликає розвиток загару, підшкірної плямистості, мокрого опіку, внутрішнього і зовнішнього побуріння плодів від старіння [8, 23, 25]. Нейтралізація дії етилену можлива в результаті ефективного інгібування етилену і його біологічної дії хімічними препаратами. У Російському хіміко-технологічному університеті ім. Д. І. Менделєєва синтезовано речовину 1-

метилциклопропен (Фітомаг). Дослідження показали, що це з'єднання ефективно інгібує біосинтез етилену і забезпечує захист багатьох видів плодів від передчасного їх дозрівання, старіння, ураження фізіологічними і грибними хворобами, сприяє продовженню термінів зберігання [8, 26, 35, 44]. Механізм дії полягає в тому, що 1 – метилциклопропен міцно приєднується до рецепторів етилену на клітинній мембрані, тому етилен вже не здатний приєднуватися до рецепторів і утворювати активні комплекси.

В цьому випадку запобігається дія етилену не лише того, що виділяється плодами (ендогенного), але і екзогенного, біологічного і небіологічного походження. Обробку плодів газоподібним Фітомагом проводять в герметичних камерах протягом доби в укрій низьких концентраціях (0,5...1 ppm).

Застосування Фітомага знижує втрати від загару, розпаду від старіння, мокрого опіку, водянистої серцевини, внутрішнього побуріння тканин. Терміни зберігання подовжуються на 2...2,5 місяця [8, 26, 34, 35, 41, 44...48].

Нині у багатьох країнах світу для зберігання плодовоовочевої продукції використовують спосіб швидкого заморожування [49, 50]. Спосіб швидкого заморожування ґрунтований на обезводненні тканин плодів і овочів шляхом перетворенні вологи, яка міститься в них, в лід. Висока швидкість охолодження, що забезпечується шоковою температурою в камері $-30...-35^{\circ}\text{C}$ і інтенсивним обдуванням плодів, дозволяє прискорено пройти перехід з рідкої в тверду фазу.

При цьому кристали льоду формуються значно менших розмірів і практично одночасно в клітині і міжклітинних перегородках (клітини залишаються неушкодженими) [51, 52]. Технологія шокового заморожування плодів відкриває зовсім нові можливості. Швидке заморожування дозволяє відстрочити реалізацію продукції в часі і перенести місце реалізації в просторі. При заморожуванні плоди і овочі охолоджують нижче температури, яка призводить до їх замерзання. Точка замерзання залежить від сорту, різновиду і складу. Якщо заморожування не відбувається досить швидко, то в плодах утворюються кристали, які руйнують їх клітини і тканини. Аналогічні зміни призводять до витікання соку. Розморожені плоди дуже швидко псуються.

Підготовлені з урахуванням специфіки сировини плоди перед заморожуванням піддають додатковій обробці антиокисниками. Обробка плодів антиокисниками (аскорбіною, лимонною і дегідрооксималеїною кислотами) дозволяє зберегти натуральний колір і смак плодів при тривалому зберіганні і після дефростації, а також зберегти вітамін С [53, 54]. Після обробки плодів антиокисниками їх укладають в картонні коробки, які застелені целофаном, а також в поліетиленові пакети і направляють на заморожування при температурі -36°C . При замерзанні плодів лід утворюється не в самих клітинах, а в міжклітинних просторах. У початковій стадії процес заморожування відбувається швидше, ніж надалі. При температурі -15°C на лід перетворюється близько 80% води, що міститься в плодах. У заморожених плодах зберігаються усі харчові якості. У них лише інвертується сахароза, а в деяких випадках збільшується кислотність. Зберігають заморожену продукцію при температурі не вище -18°C , а в деяких випадках при температурі -20°C і нижче в спеціальних низькотемпературних камерах при вологості 96...98%. Оптимальний режим зберігання замороженої продукції підтримується увесь період: від виходу з швидко заморожувального апарату до реалізації [55]. За рахунок швидкості заморожування скорочуються і періоди активності бактеріологічного середовища. Бактерії різних типів мають різні (у тому числі і нижче 0°C) температурні зони життєдіяльності. При повільному заморожуванні в плодах з'являються і залишаються сліди життєдіяльності кожного їх цих типів бактерій. При шоківому заморожуванні ряд типів не устигає розвинути [56]. Втрати маси продукту, які утворюються в результаті випару рідини при заморожуванні, представляють в звичайному режимі до 5...10%. Форсований режим заморожування скорочує втрати маси до 0,8%, що дає значний економічний ефект. Із-за запобігання усихання при швидкому заморожуванні ароматичні і поживні речовини не встигають вийти з продукту, що зберігає його якості [54]. Ця технологія призначена в основному для заморожування дрібноштучного плодовоовочевої сировини: плодів (слива, персик, абрикоса); ягід (суниця, смородина та ін.) [55]. Проведений аналіз існуючих технологій зберігання плодів

показує, що вони не забезпечують надійний захист від поразки фізіологічними і мікробіологічними захворюваннями. В окремих випадках втрати можуть досягати до 30%, а вимогам вищого і першого сортів задовольняють не більше 60% плодів. У зв'язку з чим виникає необхідність в розробці менш витратної технології зберігання на основі низькоенергетичних електромагнітних випромінювань з певними біотропними параметрами.

1.3. Біофізичні передумови для знищення шкідливих мікроорганізмів на плодах яблунь електромагнітною енергією

Практичні результати показують, що електромагнітна енергія може змінювати метаболічні і біосинтетичні процеси і при певних параметрах імпульсного ЕМП (частота дотримання імпульсів, скаженості, потужність, експозиція) може уповільнювати і пригноблювати клітинне зростання. Опромінення в мм діапазоні РНК і ДНК – що містить вірус призводить до зниження їх інфекційності [57]. Пригноблення зростання культур бактерій, зміна фагоцитарної активності, біосинтезу білків, ультраструктурні зміни в клітинах при дії ЕМП КВЧ діапазону відміченою в роботах [58....60].

У досліджах з мікроорганізмами було встановлено, що біологічний ефект від дії ЕМП на мікроорганізми носив резонансний характер [61...71]. В якості одного з основних механізмів гнітючої дії КВЧ випромінювання на шкідливі мікроорганізми являється роль біологічних мембран в реакціях мікроорганізмів на ЕМВ [72....74]. Електричні явища, що відбуваються у біомембранах, грають виключно важливу роль. Утворення трансмембранної різниці потенціалів обумовлене виборчою іонною провідністю мембран в цілому, що є відмінним діелектриком, так біошари електроізолюючих ліпідних молекул здатні витримувати напруженість ЕП близько 10^5 В/см Величина електричного

потенціалу на мембрані надзвичайно важлива. По сучасній теорії трансмембранного транспорту [75] саме ЕП усередині мембрани створює потоки необхідних речовин із зовнішнього середовища всередину клітини і з клітини в зовнішнє середовище через спеціальні гідрофільні канали, найімовірніше, ліпопротеїнової природи. Швидкість проникнення іонів через мембрану визначається такими властивостями, як товщина, значення діелектричної проникності, наявність фіксованих електричних зарядів на мембрані, розміри і число пір в мембрані, наявність фіксованих зарядів в порах і деякими іншими [75...78]. Вочевидь, посилення дії КВЧ випромінювання відбуватиметься зі збільшенням розмірів клітки або в результаті кооперативної взаємодії декількох клітин. Механізм кооперативної взаємодії може бути обумовлений іонами, що оточують мембрану і слабо пов'язаними з її поверхнею. Дію низькоенергетичних випромінювань спричиняє за собою перерозподіл електричних сил, що беруть участь у функціонуванні мембрани. В результаті міняється міра зв'язування K^+ , Ca^{2+} і інших іонів в мембрані (у тому числі і іонних каналах), а також виникають локальні зміни фізико-хімічних властивостей поверхні мембрани (мікрор'язкість, рН, поверхневе натягнення, ефективний заряд) [79, 80]. Можна припустити, що процес, що протікає в позаклітинному середовищі, включає механізми, здатні інтегрувати слабкі поля на деякій відстані і розвивається швидше по поверхні мембрани, чим по її поперечній осі. З приведених вище даних можна зробити висновок, що доки не існує універсальних моделей при дії низькоенергетичного ЕМП на мікроорганізми. Важлива особливість практично усіх моделей полягає в тому, що поверхня клітинних мембран розглядається в якості найбільш вірогідного місця здійснення даних дій. Слід припустити, що відхилення мембран від рівноваги може статися під дією низькоенергетичного ЕМП за рахунок локального стискування в подовжньому або поперечному напрямі. Зменшення товщини мембрани може носити різко виражений локальний характер, що слід розглядати як початковий етап формування локального поглиблення.

Проведений аналіз показав, що для пригноблення шкідливих

мікроорганізмів на плодах яблунь для їх тривалого зберігання потрібне проведення досліджень по встановленню первинних, фізично обґрунтованих механізмів дії низькоенергетичних ЕМП на мембрани клітин мікроорганізмів.

1.4. Аналіз технічних засобів електромагнітного випромінювання в КВЧ діапазоні з урахуванням спектральних і енергетичних характеристик

Аналіз літературних джерел [81...83] показав, що хімічні і фізіологічні зміни в грибкових мікроорганізмах, що викликаються низькоенергетичним електромагнітним випромінюванням з певними біотропними параметрами, можуть спостерігатися тільки в межах частотних та енергетичних вікон. Це обумовлює високі вимоги по стабільності частоти і міри пригнічення побічних дискретних складових у вихідному сигналі генератора. Експериментальні результати показують, що із-за низької стабільності частоти генераторів час взаємодії ЕМВ з біооб'єктами зменшується на 6...7 порядків [84, 85]. Оцінні розрахунки показують, що опромінення біологічних об'єктів необхідно робити ЕМВ, в якості джерел якого слід використати високостабільні генератори монохроматичних коливань КВЧ діапазону, що дозволяють здійснити точне налаштування (10^{-3} ... 10^{-4}) на контур лінії біологічного об'єкту і забезпечити повну (~95%) передачу енергії опромінення біологічній структурі, істотно зменшити час синхронізації і загальний необхідний час декілька порядків [84...87]. Таким чином, для знищення грибкових мікроорганізмів необхідно створити спеціалізоване високостабільне джерело коливань з відносною нестабільністю частоти в межах 10^{-6} ... 10^{-7} , що дозволить час взаємодії зменшити до десятків секунд.

Для генерування і посилення електромагнітних коливань в КВЧ діапазоні довжин хвиль застосовуються електровакуумні електронні прилади *O* і *M*-типів, які можуть забезпечити вихідну потужність 30...100 Вт. До приладів *O*-типу

відносяться лампи бігучої і зворотної хвилі (ЛБВ, ЛОВ), клінорони і клістри. До цього класу можна віднести і генератор дифракційного випромінювання (ГДИ) [88...90]. До приладів М-типу слід віднести магнетрони. Відмітною особливістю приладів О-типу в генераторних режимах є низький ККД, при вихідній потужності десятки мВт, напругою 2...10 кВ і відносною нестабільністю частоти 10^{-3} [88, 89]. Рівень вихідної потужності ГДИ у безперервному режимі складає порядком 30...100 Вт при прискорюючій напрузі 6 кВ і нестабільністю частоти 10^{-3} [90]. Максимально досяжний коефіцієнт корисної дії магнетрона в КВЧ діапазоні складає 10...15%, при робочій напрузі 2,5 кВ. Магнетроний генератор має рідинне охолодження і забезпечує вихідну потужність 30 Вт [91]. Проведений аналіз показує, що пристроям з електровакуумними електронними приладами властиві істотні недоліки: великі об'ємно-масові характеристики, вони вимагають для своєї роботи високовольтні джерела напруги, системи рідинного охолодження і не забезпечують необхідних параметрів по спектрально-флуктуаційним характеристикам.

Аналіз джерел мм діапазону показав, що нині для потреб біології і медицини серійно випускаються генератори «ЯВЪ-1», «ЯВЪ-1-КЭ», «ЯВЪ-1-2М», «ЯВЪ-103», які перекривають діапазон частот 25...100 ГГц при вихідній потужності 3...5 мВт і нестабільності частоти 10^{-3} [92]. Генератори Г4-115, Г4-185, Г4-186, Г4-178, що випускаються в Росії і Литві, можуть працювати в діапазоні частот 20...80 ГГц, але мають високу відносну нестабільність частоти 10^{-3} ... 10^{-4} , високою погрішністю частоти 20...900 МГц, низькою монохроматичністю сигналу і малою вихідною потужністю 4...5 мВт [93, 94].

Генератори НР83556А, НР83557А, УН83554А, УН83555А, що випускаються за кордоном, перекривають діапазон частот 26...75 ГГц, мають нестабільність частоти 10^{-5} і величиною вихідної потужності до 5 мВт [95...98]. Високі вимоги до стабільності частоти 10^{-6} ... 10^{-7} , спектру вихідних сигналів примушують при розробці джерел міліметрового діапазону звертати особливу увагу на амплітудні і фазові флуктуації. Певно, що перспектива поліпшення спектральних характеристик генераторів мм діапазону пов'язані як з

вдосконаленням теоретичних методів розрахунку, так і з вдосконаленням схем і конструкцій відповідних пристроїв і їх елементів. Для підвищення стабільності частоти генераторів найбільш перспективними є схемні методи [96]. Ці методи дозволяють створити умови, при яких нестабільність параметрів елементів в найменшій мірі впливає на стабільність частоти сигналу. В той же час схемні методи в принциповому відношенні відрізняються найбільшою складністю із-за різноманіття можливих рішень, що значною мірою ускладнює їх розробку і практичне використання. Виходячи з результатів аналізу публікацій з питання високостабільних генераторів з перебудовою в діапазоні частот [84, 99, 100], можна рекомендувати для побудови джерел міліметрового діапазону ($\lambda = 1...4$ мм) систему фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), яка може розглядатися як фільтр низьких частот (ФНЧ) відносно шумів коливань еталонного генератора і як фільтр верхніх частот (ФВЧ) відносно шумів генератора, що синхронізується. При цьому слід зазначити, що створення стабілізованих джерел електромагнітних коливань в короткохвильовій частині міліметрового діапазону, частот, що перекривають діапазон, з високою стабільністю частоти, є досить складним науково-технічним завданням. При рішенні цієї задачі необхідно проводити теоретичний аналіз короткочасної нестабільності частоти залежно від флуктуацій параметрів еталонного генератора, в якості якого вибирається кварцовий генератор, і тракту помножувача частоти [99...101]

Висновки до розділу

1. На підставі узагальнення фактичного матеріалу вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій слід зробити висновок, що для знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні плодів яблунь їх необхідно обробляти низькоенергетичними (інформаційними) ЕМВ міліметрового діапазону, які

дозволяють створити ефективну, енергозберігаючу і екологічно чисту електромагнітну технологію для тривалого зберігання плодів.

2. Для визначення біотропних параметрів ЕМП (частота, щільність потоку потужності, нестабільність частоти, експозиція), що викликають знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні плодів яблунь, потрібні теоретичні дослідження моделей з урахуванням розмірів і діелектричних параметрів грибкових мікроорганізмів.

3. Аналіз біофізичної дії ЕМП показав, що для знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні плодів яблунь потрібні джерела електромагнітної енергії з відносною нестабільністю частоти $10^{-6} \dots 10^{-7}$, працюючих в діапазоні частот до 100 ГГц з вихідною потужністю 600...800 мВт.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИФРАКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА БІОЛОГІЧНОМУ ОБ'ЄКТІ З ШАРОМ МІКРООРГАНІЗМІВ

2.1. Постановка завдання дифракції хвиль на поверхні яблук

В якості електродинамічної моделі біологічного об'єкту (яблук) розглядатимемо кулю радіусом R заповнений ізотропним однорідним середовищем з діелектричною проникністю $\epsilon_1 \epsilon_0$ і магнітною проникністю $\mu_1 \mu_0$ (ϵ_1 і μ_1 – діелектрична і магнітна проникність вакууму). Біооб'єкт покритий тонким сферичним шаром завтовшки h , який моделює шар мікроорганізмів. Вважатимемо, що шар має діелектричну проникність – $\epsilon_2 \epsilon_0$, а магнітну проникність – $\mu_2 \mu_0$.

Процес дифракції монохроматичного електромагнітного випромінювання на біооб'єкті описується наступним крайовим завданням для рівнянь Максвелла. Нехай електромагнітне поле випромінювання має напруженості E^0 і H^0 , які гармонійно залежать від часу ($\sim e^{it}$, ω — кругова частота). Це поле випромінюється антенною, що знаходиться на відстані від біооб'єкту. Для досить великої відстані поле випромінювання є сферичною хвилею [102, 103, 104].

Надалі, не обмежуючи спільності, вважатимемо, що поле випромінювання поблизу біооб'єкту співпадає з сферичною хвилею, що породжується електричним диполем, розташованим на відстані d від об'єкту дифракції.

В результаті дифракції цієї хвилі на біооб'єкті виникає вторинне електромагнітне поле (поле дифракції) з напруженостями E^1 і H^1 . Завдання полягає у визначенні цього поля як усередині так і поза біооб'єктом. Шукане поле дифракції повинне задовольняти усередині поверхні біооб'єкту з шаром мікроорганізмів рівнянням Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E}^1 &= ik \vec{H}^1, & \operatorname{rot} \vec{H}^1 &= -ik \vec{E}^1, \\ \operatorname{div} \vec{E}^1 &= 0, & \operatorname{div} \vec{H}^1 &= 0, \end{aligned} \quad (2.1)$$

а не рівнянням

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E}^1 &= ik \vec{H}^1, & \operatorname{rot} \vec{H}^1 &= -ik \vec{E}^1, \\ \operatorname{div} \vec{E}^1 &= 0, & \operatorname{div} \vec{H}^1 &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Де, k

– χ^2_0 вилеве число, а величина χ^2 набуває значення усередині біооб'єкту і усередині шару мікроорганізмів. У (2.2) передбачається, що

2

зовнішнє середовище, де знаходиться біооб'єкт, має відносні діелектричну і магнітну проникності рівні одиниці. Крім того, на межах розділу середовищ мають бути безперервні тангенціальні компоненти напруженості електричного і магнітного полів.

На великих відстанях від біооб'єкту поле дифракції повинне задовольняти умові випромінювання [102]:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\vec{E}}{R} - ik \vec{E} = 0, \quad \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\vec{H}}{R} - ik \vec{H} = 0, \quad (2.3)$$

де R – відстань від біооб'єкту до точки, де обчислюється

З фізичної точки зору умови (2.3) означають, що на великих відстанях від біооб'єкту поле дифракції є минаючою сферичною хвилею.

Оскільки біооб'єкт має сферичну симетрію, то розглядатимемо задачу (2.1) – (2.3) в сферичній системі координат з початком в центрі біооб'єкту (див. рис. 2.1).

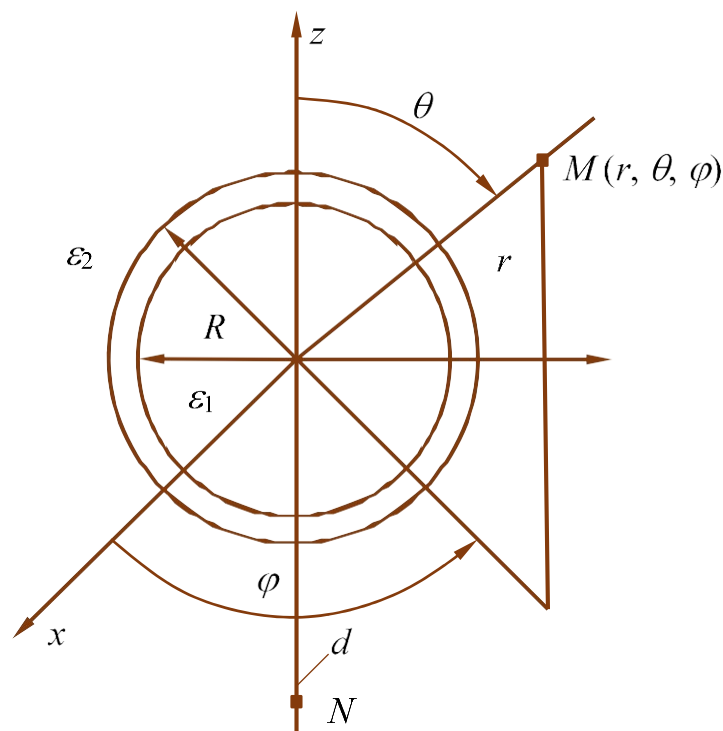


Рис. 2.1. Електродинамічна модель біооб'єкту з шаром мікроорганізмів

Далі, представимо векторні рівняння (2.1), (2.2) в термінах компонент векторів \mathbf{E} і \mathbf{H} в сферичній системі координат r, θ, ϕ :

$$\mathbf{E}_r e_r + \mathbf{E}_\theta e_\theta + \mathbf{E}_\phi e_\phi, \quad \mathbf{H}_r e_r + \mathbf{H}_\theta e_\theta + \mathbf{H}_\phi e_\phi. \quad (2.3)$$

Де e_r, e_θ, e_ϕ – одиничні вектори сферичної системи координат.

Використовуючи представлення для диференціального оператора rot [105] у сферичній системі координат, рівняння (2.1) перетворяться до виду:

$$\begin{aligned} & -ik \sqrt{\frac{0}{0}} \mathbf{E} \frac{1}{r \sin \theta} \mathbf{H} \sin \theta, \\ & -ik \sqrt{\frac{0}{0}} \mathbf{E} \frac{1}{r \sin \theta} \mathbf{H}_r \frac{r \mathbf{H}}{r}, \\ & -ik \sqrt{\frac{0}{0}} \frac{1}{r} \frac{r}{r} \frac{r}{r} \frac{r}{r}, \\ & ik \sqrt{\frac{0}{0}} \frac{1}{r \sin \theta} \sin \theta, \\ & ik \sqrt{\frac{0}{0}} \mathbf{H} \frac{1}{r \sin \theta} \mathbf{E} \frac{r \mathbf{E}}{r}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

—————
r

(2.6)

$$\sqrt{\frac{ik - 0}{r}} = \frac{1}{r} \frac{r}{r}, \quad \text{---}$$

$$\frac{r^2}{r} = \frac{r}{r} \quad r \sin$$

$$r \sin \frac{\pi}{2} = \frac{r}{\sin \frac{\pi}{2}} = 0,$$

$$\frac{r^2}{r} \frac{r}{\sin} - \frac{r}{\sin} \frac{\sin}{r} = 0.$$

Рівняння (2.2) мають вигляд (2.5), (2.6) якщо в них покласти 1.

Для формулювання умов безперервності тангенціальних компонент поля на межах розділу середовищ введемо позначення:

$1, 1$ – електромагнітне поле усередині біооб'єкту;

$2, 2$ – електромагнітне поле в шарі мікроорганізмів;

$3, 3$ – електромагнітне поле поза біооб'єктом з шаром мікроорганізмів. Тоді умова безперервності на межі розділу середовищ прийме вигляд:

$$\begin{matrix} 1 & 2 \\ \left| \right. & \left| \right. \\ r & R \end{matrix} \begin{matrix} 0, & 0, \end{matrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{matrix} 1 & 2 \\ \left| \right. & \left| \right. \\ r & R \end{matrix} \begin{matrix} 0, & 0, \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 2 & 3 & b \\ \left| \right. & \left| \right. & \\ r & R & h \end{matrix} \begin{matrix} 0, & 0, \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 2 & 3 & b \\ \left| \right. & \left| \right. & \\ r & R & h \end{matrix} \begin{matrix} 0, & 0, \end{matrix} \quad (2.8)$$

де b, b, b, b – компоненти збуджуючого поля b, b .

Умови випромінювання (2.3) можна представити в наступній формі [102], справедливою при kr :

$$\begin{matrix} 3 \\ \sqrt{\frac{0}{0}} \end{matrix} F_1, \quad e^{ikr} \frac{1}{kr} \approx \frac{1}{kr},$$

(2.9)

$$F_2 = \frac{e^{ikr}}{kr} \sim O\left(\frac{1}{kr}\right)$$

Де символ $O\left(\frac{1}{kr}\right)$ означає величину меншу $1/k$ або того ж порядку. Таким чином, завдання дифракції хвиль на біооб'єкті полягає у визначенні електромагнітного поля, компоненти якого задовольняють системі рівнянь (2.5), (2.6), граничним умовам (2.7), (2.8) і умові випромінювання (2.9).

2.2. Алгоритм побудови рішення задачі дифракції

Для побудови рішення задачі (2.5) – (2.9) використовуватимемо потенціали Дебая [106, 107] і метод розділення змінних в сферичній системі координат [108]. Як показано в [106, 103], загальне рішення системи рівнянь (2.5), (2.6) можна звести до рішення двох скалярних рівнянь Гельмгольца для електричного U і магнітного V потенціалів Дебая. Зокрема для електромагнітного поля, що породжується електричним диполем, розташованим на відстані від центру сферичної системи координат електричний потенціал Дебая (магнітний потенціал Дебая дорівнює нулю) має вигляд [106, 103]:

$$U^b = \frac{E_0}{k^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{2} \frac{j_n(kr)}{j_n(kd)} P_n(\cos \theta) \quad (2.10)$$

Де введені позначення: $j_n(kr) = \sqrt{\frac{kr}{2}} J_{n+1/2}(kr)$, $j_n(kd) = \sqrt{\frac{kr}{2}} J_{n+1/2}(kd)$,

$J_{n+1/2}$ – відповідно до функції Бесселя і Ханкеля першого роду напівцілого індексу, $P_n(\cos \theta)$ – ортонормовані поліноми Лежандра [105].

За допомогою (2.10) компоненти збудливого ЕМП виражаються через скалярну функцію U^b за формулами:

$$\begin{aligned} E_r^b &= -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 U^b) = -\frac{2}{r} U^b - \frac{\partial U^b}{\partial r}, & E_\theta^b &= \frac{1}{kr} \frac{\partial^2 U^b}{\partial r^2}, \\ E_\phi^b &= 0, & E_z^b &= \frac{1}{r} \frac{\partial U^b}{\partial r}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

У (2.11) враховано, що функція U^b не залежить від змінної θ (електричний диполь породжує осесиметричне електромагнітне поле).

Природно припустити, що електричний потенціал Дебая поля дифракції теж не залежить від змінної θ (оскільки біоб'єкт має азимутну симетрію), а магнітний потенціал дорівнює нулю. У цій ситуації компоненти поля дифракції виражаються по формулах аналогічним формулам (2.11). Перш ніж приводити ці формули відмітимо наступне. Оскільки діелектрична проникність є кусочно-постійною функцією змінної r , то слід ввести три електричні потенціали Дебая: U_1 – описує поле дифракції усередині біоб'єкту при $r < R$; U_2 – описує поле дифракції усередині шару мікроорганізмів при $R < r < R+h$; U_3 описує поле дифракції поза біоб'єктом і шаром мікроорганізмів при $r > R+h$. Тоді компоненти поля дифракції в цих трьох областях простору можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} E_r^1 &= -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 U_1) = -\frac{2}{r} U_1 - \frac{\partial U_1}{\partial r}, & E_\theta^1 &= \frac{1}{kr} \frac{\partial^2 U_1}{\partial r^2}, \\ E_\phi^1 &= 0, & E_z^1 &= \frac{1}{r} \frac{\partial U_1}{\partial r}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\Delta \frac{1}{r} \frac{\partial^2 rU_2}{\partial r^2} = k_2^2 rU_2, \quad \Delta \frac{1}{k_2 r} \frac{\partial^2 rU_2}{\partial r^2},$$

при $R < r < R+h$

(2.13)

$$\Delta^2 0, \quad \Delta^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 rU_2}{\partial r^2} = 0, \quad \Delta^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 rU_2}{\partial r^2},$$

$$\Delta \frac{1}{k} \frac{\partial^2 rU_3}{\partial r^2} = k^2 rU_3, \quad \Delta \frac{1}{k r} \frac{\partial^2 rU_3}{\partial r^2},$$

при $r < R < h$

(2.14)

$$\Delta^3 0, \quad \Delta^3 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 rU_3}{\partial r^2} = 0, \quad \Delta^3 \frac{1}{r} \frac{\partial^2 rU_3}{\partial r^2},$$

де $k_1 = k \sqrt{1}$, $k_2 = k \sqrt{2}$.

Потенціали U_1, U_2, U_3 повинні задовольняти скалярним рівнянням Гельмгольца:

$$\Delta U_1 - k^2 U_1 = 0, \quad \Delta U_2 - k^2 U_2 = 0,$$
(2.15)

$$\Delta U_3 - k^2 U_3 = 0.$$

Тут Δ – оператор Лапласа в сферичній системі координат:

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2},$$

де враховано, що відсутня залежність від координати φ .

Окрім рівнянь (2.15), потенціали повинні задовольняти певним умовам на межах розділу середовищ. Ці умови виходять з умов (2.11) і формул (2.12) – (2.14) для компонент поля дифракції і полягають в наступному:

$$U_1 = U_2 \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} \frac{rU_1}{r} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} \frac{rU_2}{r} \Big|_{r=R} = 0, \quad (2.16)$$

$$\frac{U_2}{r} - \frac{U_3}{r} \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} \frac{rU_2}{r} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_3}} \frac{rU_3}{r} \Big|_{r=R} = 0. \quad (2.17)$$

Потенціал U_3 повинен задовольняти умові випромінювання

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{U_3}{r} = ikU_3 = 0. \quad (2.18)$$

Отже, початкове векторне завдання дифракції зведене до скалярного завдання для потенціалів Дебая. Рішення цієї задачі можна побудувати за допомогою методу розділення змінних. Цей метод полягає в тому, що спочатку будуються приватні рішення рівнянь (2.15) що є добутком функцій, кожна з яких залежить тільки від однієї змінної (r чи φ). Такі рішення добре відомі [109] і мають вигляд:

$$V_n(r) = P_n(\cos \varphi) R_{n,1/2}(kr), \quad (2.19)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, \quad p = 1, 2,$$

де $P_n(\cos \varphi)$ – ортонормовані поліноми Лежандра,

$R_{n,1/2}(kr) = \dots$ – циліндричні функції напівцілого індексу.

За допомогою цих приватних рішень (2.19) можна побудувати загальні рішення рівнянь (2.15) у вигляді нескінченних рядів по поліномах Лежандра. Ці рішення для кожної з трьох областей $r \in [0, R]$, $R < r < R+h$, $0 < r < R+h$ можна представити у вигляді:

область $r \in [0, R]$:

$$U_1 = \frac{1}{kr} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} a_n k_1 r P_n \cos \theta, \quad (2.20)$$

область $R < r < R+h$:

$$U_2 = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \left[b_n \frac{k_1 r}{n} + c_n \frac{k_1 r}{n} \right] P_n \cos \theta, \quad (2.21)$$

область $0 < r < R$:

$$U_3 = \frac{1}{kr} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} d_n k_1 r P_n \cos \theta. \quad (2.22)$$

У (2.20) – (2.22) a_n, b_n, c_n, d_n – невідомі коефіцієнти підлягають визначенню. Функції $P_n \dots, P_n \dots$ виражаються через циліндричні функції напівцілого індексу і мають вигляд:

$$P_n = \sqrt{\frac{z}{2}} J_{n+1/2}(z), \quad P_n = \sqrt{\frac{z}{2}} Y_{n+1/2}(z).$$

У (2.20) – (2.22) враховано, що потенціал U_1 має бути обмежений усередині біооб'єкту, а потенціал U_3

повинен задовольняти умові

випромінювання (2.18). Для визначення коефіцієнтів a_n, b_n, c_n і d_n слід

скористатися крайовими умовами (2.16), (2.17). Підставимо (2.20) – (2.22) в (2.16) і (2.17) і враховуючи ортогональність поліномів Лежандра $P_n(\cos \theta)$ на інтервалі $[-1, 1]$, після ряду перетворень отримуємо:

$$\sqrt{\frac{2}{1-n^2}} a_n k_{1R} + b_n k_{2R} + c_n k_{2R} = d_n, \quad (2.23)$$

$$a_n k_{1R} + b_n k_{2R} + c_n k_{2R} = d_n, \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} b_n k_{1R} + c_n k_{2R} + d_n k_{2R} = k_{2R} d_n, \quad (2.25)$$

$$b_n k_{1R} + c_n k_{2R} + d_n k_{2R} = k_{2R} d_n, \quad (2.26)$$

де $\bar{R} = R + h$, а точка означає диференціювання за аргументом.

Формули (2.23) – (2.26) є системою лінійних рівнянь відносно коефіцієнтів $a_n, b_n, c_n, d_n, n = 0, 1, 2, \dots$.

З рівнянь (2.23), (2.24) визначимо b_n, c_n , через a_n маємо:

$$b_n = a_n \frac{\sqrt{\frac{2}{1-n^2}} k_{1R} + k_{2R} + k_{2R}}{k_{1R} + k_{2R}}, \quad (2.27)$$

$$c_n = a_n \frac{k_{2R} + k_{1R} + \sqrt{\frac{2}{1-n^2}} k_{2R}}{k_{1R} + k_{2R}}, \quad (2.28)$$

$${}_n k_2 R \sqcup_n k_2 R \sqcup_n k_2 R \sqcup_n k_2 R .$$

$${}^2 \int_n k_2 R_n k_1 R_n, \quad (2.32) \quad \sqrt{\frac{1}{1}}$$

$$b_{1n} \quad 0 \quad kR \quad kd, \quad b_{2n} \quad 0 \int_n kR \quad kd. \quad (2.33)$$

3 (2.30)
знаходимо

a_n і d_n :

$$a_n = 4i_{0n} kd ,$$

(2.34)

 n_3

$$d_n = \frac{0 \ n \ kd}{n^3} \ n_1 \frac{1}{\sqrt{2}} \ n \ k_2 \bar{R} \ \parallel_n \ k \bar{R} \ \parallel_n \ k_2 \bar{R} \ \parallel_n \ k \bar{R}$$

$$n_2 \frac{1}{\sqrt{2}} \ \parallel_n \ k \bar{R} \ \parallel_n \ k \bar{R} \ \parallel_n \ k \bar{R} \ \parallel_n \ k \bar{R}, \quad (2.35)$$

$$n_3 \ \parallel_n \ k \bar{R} \ \parallel_n \ k_2 \bar{R} \ \parallel_n \ \parallel_n \ k_2 \bar{R} \ \parallel_n$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \ \parallel_n \ k \bar{R} \ \parallel_n \ k_2 \bar{R} \ \parallel_n \ \parallel_n \ k_2 \bar{R} \ \parallel_n .$$

Таким чином, формули (2.27), (2.28) і (2.34), (2.35) дозволяють розраховувати коефіцієнти a_n, b_n, c_n і d_n отже, з урахуванням (2.20) - (2.22) і потенціали U_1, U_2 и U_3 .

2.3. Розрахунок середнього електричного поля в шарі мікроорганізмів

При дії збудливого електромагнітного поля (2.11) на шар мікроорганізмів і біооб'єкт виникає електромагнітне поле дифракції, напруженість електричного поля якого в кожній точці можна визначити за допомогою формул (2.12) – (2.14), (2.20) - (2.22) і (2.27), (2.28), (2.34), (2.25). Проте, інтегральний ефект від дії збудливого поля на шар мікроорганізмів можна оцінити за допомогою усередненої за об'ємом шару напруженості електричного поля. Отримаємо

формулу для розрахунку середнього електричного поля. Величина середнього поля за визначенням має вигляд:

$$\vec{E}_{\text{сеп}} = \frac{2}{V} \int_R^{Rh} r^2 dr \vec{e}_r \sin d, \quad (2.36)$$

де $V = \frac{4}{3}\pi h^2 (3R^2 + 3Rh + h^2)$ – об'єм шару мікроорганізмів,

ϵ_2 – напруженість електричного поля, яка виражається через потенціал U_2 по формулах (2.12):

$$\vec{E}_2 = -\text{grad} U_2 = -\frac{1}{k_2} \frac{\partial U_2}{\partial r} \vec{e}_r = -\frac{1}{k_2 r^2} \frac{\partial U_2}{\partial r} r \vec{e}_r \quad (2.37)$$

З (2.37) з урахуванням (2.38) маємо:

$$\vec{E}_{\text{сеп}} = \frac{2}{Vk_2} \int_R^{Rh} r^2 dr \vec{e}_r \sin d + \frac{2}{k_2} \frac{\partial U_2}{\partial r} r \vec{e}_r \sin d, \quad (2.38)$$

$$\vec{E}_{\text{сеп}} = \frac{2}{Vk_2} \int_R^{Rh} r^2 dr \vec{e}_r \sin d + \frac{2}{k_2} \frac{\partial U_2}{\partial r} r \vec{e}_r \sin d. \quad (2.39)$$

Підставимо в (2.38) вираження (2.21) для потенціалу і скористаємося властивістю поліномів Лежандра [105]:

$$\int_{-1}^1 x^n dx = 0, \quad \text{якщо } n \text{ – непарне,}$$

Тоді отримаємо:

$$E^{cep} = 2 \frac{R h}{k} \int_0^R k r \Phi k r r^2 dr, \tag{2.40}$$

де $\Phi = k_2 r^2 + b_0 + c_0$, а дві точки означають другу похідну по аргументу.

З (2.40) використовуючи формулу інтеграції по частинах [105] маємо:

$$E^{cep} = \frac{2 R h^2}{k} \int_0^R k_2 R h \frac{R^2}{k_2} \int_0^R k_2 R h \frac{R h}{2} \int_0^R k_2 R h \frac{R}{k^2} \int_0^R k_2 R h \frac{R h}{2} \int_0^R k_2 r r dr . \tag{2.41}$$

Оскільки товщина h шару мікроорганізмів мала в порівнянні з величиною R , то інтеграл в (2.41) можна з прийнятною для практичних розрахунків точністю розрахувати по наближеній формулі трапецій:

$$\int_0^R k_2 r r^2 dr \approx \frac{h}{2} (k_2 R h + k_2 R^2) ..$$

Тоді остаточно отримуємо:

$$E^{cep} = \frac{2 R h^2}{k} \int_0^R k_2 R h \frac{R^2}{2} \int_0^R k_2 R h \frac{h R h}{2} \int_0^R k_2 R R \frac{h R}{2} \int_0^R k_2 R R \frac{1}{2} . \tag{2.42}$$

Розглянемо тепер інтеграл (2.39). З (2.39) з урахуванням (2.21) маємо

$$E_{\text{сеп}} = \frac{2}{\sqrt{k}} \int_0^R \int_0^h \Phi_n(k_2 r) \frac{d P_n \cos}{d} \sin d \cdot \quad (2.43)$$

З (2.43) отримаємо:

$$\int_0^R \Phi_n(k_2 r) r dr \frac{R h /'}{k_2} \Phi_n(k_2 R h) \Phi_n(k_2 R) \cdot \quad (2.44)$$

У (2.44) використана наближена формула трапецій. Далі для інтеграла з (2.43), використавши формулу диференціювання поліномів Лежандра [109]:

$$\frac{d P_n(x)}{dx} = \frac{n-1}{2} x^{n-1},$$

було отримано вираз (2.45):

$$\frac{d P_n \cos}{d} - \sin d \int_0^{n-1} P_n \cos d \int_0^n P_n \cos \cos d \cdot \quad (2.45)$$

Як показано в [110], перший інтеграл в (2.45) дорівнює нулю, а другий інтеграл обчислюється в явному вигляді:

$$P_n \cos \cos d \int_0^n \frac{2m! 2m-2!}{4^{2m-1} m!^2 (m-1)!^2}, n=2m-1 \quad (2.46)$$

Підставляючи (2.44) і (2.46) в (2.43), остаточно маємо:

$$E_{\text{сеп}} = \frac{2^2 R h^2}{V k^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4m^3 2m! 2m^2!}{4^{2m+1} m!^2 m^2!^2} \Phi_{2m+1}(k_2 R) h \Phi_{2m+1}(k_2 R). \quad (2.47)$$

Як показали чисельні розрахунки за формулою (2.47), для обчислення $E_{\text{сеп}}$ з відносною погрішністю менше 5% досить обмежитися першим членом ряду в (2.47):

$$E_{\text{сеп}} \approx \frac{2^2 R h^2}{V k^2} \frac{\Phi_{12}(k_2 R) h \Phi_{12}(k_2 R)}{V k^2}. \quad (2.48)$$

Функції $\Phi_n(z)$, що фігурують в (2.42) і (2.48) представлені в наступному вигляді:

$$\Phi_n(z) = \frac{R^2}{h^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{0^n k d}{n^3} \Phi_{n-2k}(z) \quad n = 0, 1, \quad (2.49)$$

де величини n_1, n_2, n_3 визначаються відповідно до формул (2.31), (2.32), (2.35). Таким чином, для розрахунку компонент середнього поля отримані формули (2.42), (2.48) і (2.49). Ці формули можна спростити, використовуючи той факт, що товщина шару мікроорганізмів значно менше радіусу кулі моделюючої біооб'єкт. Якщо у формулах (2.41) і (2.48) нехтувати членами порядку h/R , то після ряду перетворень ці формули набудуть вигляду:

$$E_{\text{сеп}} \approx \frac{\Phi_{10}^2(k_2 R) k_2 R \Phi_{10}^2(k_2 R)}{R^2}. \quad (2.50)$$

$$E_{\text{сеп}} \approx \frac{\Phi_{11}^2(k_2 R)}{4k_2 R}. \quad (2.51)$$

Далі, згідно з формулою (2.49) маємо:

$$\Phi_0^{(0)} k_2 R = \frac{E_0^{(0)} kd}{A_0} \left[k_2 R D_0^{(0)} k_2 R \right], \quad (2.52)$$

$$\Phi_0^{(2)} k R = \frac{E_0^{(0)} kd}{0} \left[k R D_0^{(0)} k R \right], \quad (2.53)$$

$$\Phi_1^{(2)} k R = \frac{E_0^{(1)} kd}{1} \left[k R D_1^{(1)} k R \right], \quad (2.54)$$

де

$$A_n = kR \left[kR \frac{1}{\sqrt{2}} \right] kR \quad (2.55)$$

$$D_n = n kR \left[k_2 R \right] - \frac{1}{\sqrt{2}} \left[kR \right] n k_2 R,$$

$$D_n = \frac{k_{n2n1} R \left[k R \right] \sqrt{\frac{2}{1}} \left[k_{n2n1} R \right] k R}{\sqrt{1} \left[k_{n1n2} R \right] \left[k R \right] \left[k_{n1n2} R \right] k R}, n = 0, 1. \quad (2.56)$$

Підставимо (2.52) – (2.56) в (2.50), (2.51), тоді компоненти середньої напруженості електричного поля можна представити у вигляді:

$$E_{\text{сеп}}^{(0)} = \frac{E_0^{(0)} kd}{2 R A_0} \left[k R \right] k R \left[k R \right] \left[k R \right] \left[k R \right] \left[k R \right], \quad (2.57)$$

$$E_{\text{сеп}}^{(1)} = \frac{E_0^{(1)} kd}{4k R A_1} \left[k R \right] k R \left[k R \right]. \quad (2.58)$$

Тепер скористаємося представленнями для функцій $J_n z$ і $H_n^{(1)} z$ через циліндричні функції напівцілого індексу [109]:

$$J_n z = \sqrt{\frac{z}{2}} J_{n+1/2} z, \quad H_n^{(1)} z = \sqrt{\frac{z}{2}} H_{n+1/2}^{(1)} z. \quad (2.59)$$

За допомогою (2.59) формули (2.57), (2.58) перетворюються до наступної формули:

$$E_{\text{сеп}} = \frac{E_0 e^{ik d R h}}{2RA_0} D \left[1 - ikR \cos k_2 R - \frac{k_2 R \sin k_2 R}{2} \right], \quad (2.60)$$

$$E_{\text{сеп}} = \frac{E e^{ik d R h}}{4k RA_1} \sin k_1 R - iD. \quad (2.61)$$

Де величини A_0, D_0, A_1, D_1 визначаються за формулами:

$$D = \frac{\sin k_2 R \cos k_1 R - \sqrt{\frac{2}{1}} \cos k_2 R \sin k_1 R}{\sqrt{\frac{2}{1}} \sin k_1 R - i \cos k_1 R}, \quad (2.62)$$

$$\bar{D} = \frac{\sqrt{\frac{2}{1}} \cos k_1 R \sin k_2 R - \cos k_2 R \sin k_1 R}{i \sqrt{\frac{2}{1}} \cos k_1 R - \sin k_1 R}, \quad (2.63)$$

$$A_0 = iD_0 e^{ik^2 h} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 - i \cos k_2 R - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin k_2 R \right], \quad (2.64)$$

$$A_1 = i \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}} e^{ik^2 h} D_1 \sin k_2 R - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos k_2 R \right]. \quad (2.65)$$

Таким чином, формули (2.60)...(2.65) дозволяють розрахувати компонент $E_{\text{сеп}}$, усередненої за об'ємом шару мікроорганізмів напруженості ЕП. За допомогою цих компонент величина середньої напруженості ЕМП в шарі мікроорганізмів визначається по формулі:

$$E_{\text{сеп}} = \sqrt{|E_{\text{сеп}}^r|^2 + |E_{\text{сеп}}^z|^2} \quad (2.66)$$

На основі (2.66) були проведені чисельні розрахунки величини $E_{\text{сеп}}$ нормованої на E_0 – величину напруженості ЕП збудливої сферичної хвилі (2.10), (2.11). В якості геометричних і електродинамічних параметрів, характеризуючи біооб'єкт і шар мікроорганізмів були вибрані: $\epsilon_1 = 1$, $i_1 = 0$, $\epsilon_2 = 20$, $i_2 = 5$ – реальна і уявна частини відносної діелектричної проникності біооб'єкту; $\epsilon_2 = 2$, $i_2 = 10$, $\epsilon_3 = 3$ – реальна і уявна частини відносної діелектричної проникності шару мікроорганізмів; $R = 30$ мм і $h = 10^4$ мм – відповідно, радіус кулі моделюючої біооб'єкт і товщина шару мікроорганізмів.

Розрахунки проводилися в діапазоні частот $50 \text{ ГГц} \leq f \leq 90 \text{ ГГц}$. Вибір цього діапазону частот обумовлений тим, що при таких частотах електромагнітне поле збудливої хвилі практично не проникає у біооб'єкт. Вибір верхньої межі діапазону пов'язаний з тим, що, як випливає з (2.60), (2.61), величина середнього поля убуває із зростанням частоти. Так вже при $f = 90 \text{ ГГц}$ величина $E_{\text{сеп}}$ складає менше 2% від E_0 .

На рис. 2.2. приведені результати розрахунків залежності величини $E_{\text{сеп}}/E_0$

від частоти збудливої електромагнітної хвилі. Як видно, існує оптимальне значення частоти, при якій величина напруженості середнього поля в шарі мікроорганізмів досягає максимального значення. Як показав аналіз чисельних

результатів, це значення частоти $f = 75$ ГГц практично не залежить від величини уявних частин (тангенса кута втрат) відносної діелектричної проникності

біоб'єкту і шару мікроорганізмів. Зі збільшенням втрат електромагнітної енергії в шарі мікроорганізмів величина максимального значення $E_{ср} / E_0$ убуває.

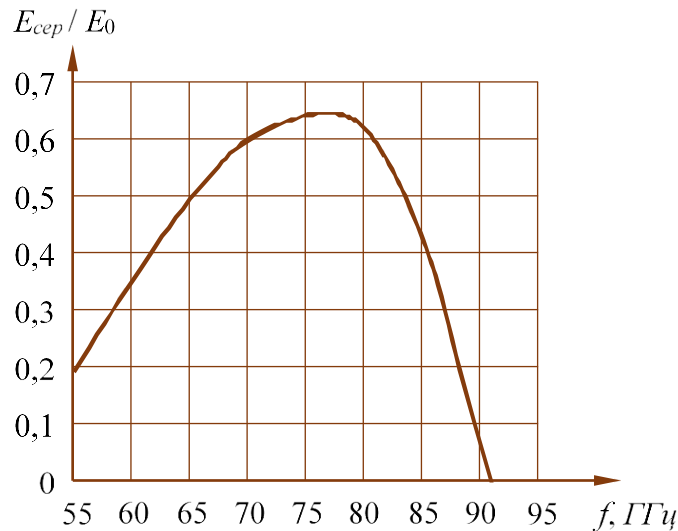


Рис. 2.2. Залежність нормованої середньої напруженості електричного поля від частоти збудливої хвилі

Таким чином, на основі математичного моделювання процесу дифракції збудливої електромагнітної хвилі на біоб'єкті з шаром мікроорганізмів визначено оптимальне значення частоти цієї хвилі, при якій електромагнітне поле практично не проникає у біоб'єкт, а величина напруженості електричного поля, усереднена за об'ємом шару мікроорганізмів, досягає максимального значення.

Для знищення шкідливих мікроорганізмів на поверхні яблук необхідними параметрами не лише частота ЕМІ, але і наведений потенціал на мембрані клітин [75]. Величина наведеної ЕМВ потенціалу має бути більший 110 мВ, що приведе до руйнування мембран клітин мікроорганізмів. Для визначення наведеного потенціалу на мембрані клітин, який залежить від напруженості електричного поля, експозиції і частоти ЕМВ, скористаємося виразом [72]:

$$\varphi_{ав} = \frac{RT}{4} \left(\frac{C_0 V_0 g^2 C_s}{m_0 h^2} e^{-\frac{F_0 \varphi}{RT}} - P \frac{g C_s}{4 m_0} E_{cp} \cos t \right) \quad (2.67)$$

де φ_0 – потенціал на мембрані в початковий момент часу;

P – проникність мембрани;

t – час експозиції;

C_0, C_s – концентрації іонів усередині і поза клітиною;

V_0 – об'єм клітини в початковий момент часу;

g – заряд іона;

F – число Фарадея;

R – газова постійна;

T – абсолютна температура;

e – заряд електрона;

E_{cp} – електрична напруженість поля;

N_A – постійна Авогадро;

h – товщина мембрани;

ω – кругова частота ЕМВ опромінення поверхні яблук.

Для розрахунків були використані дані, узяті з літературних джерел [75, 77, 111–113]:

$$h = 10^{-8} \text{ м}; \quad m = 2,1; \quad \epsilon = 8,854 \cdot 10^{12} \text{ Ф/м}; \quad N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1};$$

$$\kappa_p = 110 \text{ мВ}; \quad \epsilon_{cp} = 60 \text{ мВ}; \quad P = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с/м}^3; \quad C_0 = 0,4 \frac{\text{мк моль}}{\text{м}^3}; \quad C_s = 8,6 \text{ мк моль/м}^3;$$

$$V_0 = 2,0 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3; \quad g = 3 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}; \quad F = 96484,56 \text{ Кл/моль}; \quad R = 8,314 \text{ Дж/Кл} \cdot \text{моль};$$

$$T = 300^{\circ}\text{К}; \quad f = 75 \text{ ГГц}.$$

В результаті розрахунків було встановлено, що експозиція складає $t = 78$ с, напруженість $E_{cp} = 10,56$ В/м, наведений потенціал $\varphi_{ав} = 185$ мВ, а $E_0 = 16$ В/м.

Результати чисельного аналізу показали, що для знищення шкідливих мікроорганізмів на половині поверхні яблук слід використати джерело електромагнітного випромінювання в КВЧ діапазоні з потужністю 0,7 Вт.

Висновки по розділу

1. Для встановлення діапазону змін біотропних параметрів ЕМП (частота, потужність, експозиція) необхідних для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук слід використати модель у вигляді кулі, яка покрита тонким сферичним шаром з мікроорганізмами.

2. Для руйнування мембрани патогенних мікроорганізмів на поверхні яблук потрібний потенціал на мембрані не менше 185 мВ, наведений зовнішнім електромагнітним джерелом потужністю 650...750 мВт.

3. Знищення мікроорганізмів на поверхні яблук слід проводити з використанням ЕМВ в діапазоні частот 73...77 ГГц з експозицією 60...80 с.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПО СТВОРЕННЮ ДЖЕРЕЛА
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ЯБЛУК

3.1. Обґрунтування структурної схеми джерела електромагнітної енергії

Теоретичний аналіз показав, що для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук слід проводити з використанням електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 73...77 ГГц, експозицією 60...80 с., потужністю 650...750 мВт і відносною нестабільністю частоти 10^{-7} ... 10^{-8} .

Аналіз апаратури, що серійно випускається, в міліметровому діапазоні довжин хвиль показав, що ця апаратура не задовольняє вимогам для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук [91, 96, 99].

Створення стабілізованого по частоті джерела, що перебудовується в діапазоні частот 73...77 ГГц, є важким науково-технічним завданням [84]. Як показав аналіз, це завдання можна вирішити на основі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) автогенератора по частоті кварцового генератора [99].

Рішення задачі, пов'язане з визначенням структурної схеми високостабільного електромагнітного джерела в діапазоні частот на основі ФАПЧ, зводиться до визначення елементів системи перенесення спектру від кварцового генератора в міліметровий діапазон [100, 101]. Застосування системи ФАПЧ дозволить забезпечити необхідне відношення сигнал/шум на виході генератора при мінімальному значенні дисперсії фази вихідного сигналу [101].

Функціональна схема з одним кільцем ФАПЧ показана на рис. 3.1 [100].

Рис. 3.1. Схема високостабільного за частотою генератора з однокільцевою системою ФАПЧ

У схемі (рис. 3.1) напруга синхронізуемого генератора (СГ), високостабільного генератора (ВГ), перетворюється в змішувачі (ЗМ) на проміжну фазу. На фазовий детектор (ФД) поступає напруга синтезатора (СИН) і напруга проміжної фази сигналу. За наявності фазового неузгодження між цими напругами на виході ФД з'являється управляюча напруга, яка через фільтр нижніх частот (ФНЧ) і підсилювач постійного струму (ППТ) змінює частоту стабілізуемого генератора. В результаті роботи системи автопідстроювання фаза перетвореного змішувачем сигналу підтримується рівній фазі синтезатора.

Частота синхронізуемого генератора $\omega_{СГ}$ при цьому дорівнює різниці частот кварцового генератора з виходу помножувача (ПМ) і синтезатора, тобто

$$\omega_{СГ} = N_{КГ} \cdot \omega_{СИН}$$

Вихідною напругою системи є напруга синхронізуемого генератора. Перебудова його частоти здійснюється зміною частоти синтезатора. Величина останньої вибирається значно меншою, ніж частота високостабільного генератора. Тому відносна нестабільність частоти сформованих системою коливань визначається в основному нестабільністю частоти кварцового генератора і помножувача.

3.2. Аналіз флуктуаційних характеристик вихідного сигналу високостабільних по частоті джерел НВЧ і КВЧ діапазонів

Знайдемо математичний опис процесу синхронізації генератора в схемі, зображеній на рис. 3.1. [100, 114, 115]. У цій схемі на змішувач поступає напруга від високостабільного генератора (ВГ) і синхронізуемого генератора:

$$\begin{aligned} U_{ВГ}(t) &= U_{ВГ} \sin_{ВГ}(t); \\ U_{СГ}(t) &= U_{СГ} \sin_{СГ}(t), \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $\varphi_{ВГ}(t) = \varphi_{ОВГ} + \int_0^t \omega_{ВГ}(t) dt$;

$\varphi_{ОВГ}$ – початкова фаза високостабільного генератора;

$\omega_{ВГ}(t)$ – частота високостабільного генератора;

$\varphi_{СГ}(t) = \varphi_{ОСГ} + \int_0^t \omega_{СГ}(t) dt$ – фаза синхронізуемого генератора.

На виході змішувача формується напруга, залежна від різниці фаз, яка рівна:

$$U_{ПР}(t) = U_{ВГ}(t) - U_{СГ}(t) \quad (3.2)$$

Напруга від підсилювача проміжної частоти і синтезатора подаються на вхід фазового детектора (ФД), на виході якого різниця фаз $\varphi(t)$ рівна:

$$\varphi(t) = \varphi_{ПР}(t) - \varphi_{СИН}(t). \quad (3.3)$$

Рівність (3.3) справедлива у тому випадку, якщо смуга пропускання УПЧ значно перевищує смугу пропускання ФНЧ [116, 117]. Управляюча напруга $U_{\phi}(t)$ знімаємо з фільтру низької частоти (ФНЧ), пов'язано з напругою на

виході фазового детектора $U_d(t)$ за допомогою лінійного диференціального оператора $K_\phi(p)$:

$$U_\phi(t) = K_\phi(p) U_d(t) \quad (3.4)$$

Структурна схема ФАПЧ, поведінка якої описується рівняннями (3.1) – (3.4), приведена на рис. 3.2.

Рис. 3.2. Структурна однокільцева схема ФАПЧ

У цій схемі блок $1/p$ відображає операцію інтеграції, що відповідає інтегралу $\int_0^t \omega_{CG}(t) dt$, а S_y є крутизною регульовальної характеристики синхронізованого генератора; $K_U(p)$, $K_{УПЧ}$, K_{CG} – коефіцієнти передачі УПЧ, ППТ и СГ.

З розгляду структурної схеми (рис.3.2) виходить, що показники системи перетворення частоти цілком визначаються показниками ФАПЧ: смугами захоплення і утримання, стійкістю, фільтруючою здатністю, числом кільць ФАПЧ. На характеристики ФАПЧ роблять великий вплив: коефіцієнт множення частоти $N_{ном}$, запізнювання в трактах підсилювача, помножувача і синтезатора частот, застосування пропорційно-інтегруючого фільтру після фазового

детектора. У реальних схемах вказані особливості обумовлюють високий порядок нелінійного диференціального рівняння, що точно описує поведінку подібної системи, і складність його дослідження. Строгим дослідженням нелінійного диференціального стохастичного рівняння зі змінними коефіцієнтами і випадковими впливами представляють собою практично нерозв'язне завдання [117, 118]. При малих випадкових діях, коли нелінійними властивостями ФАПЧ можна нехтувати, аналіз може бути проведений за допомогою методу лінеаризації [101, 118].

Вважаючи, що система ФАПЧ знаходиться в стані синхронізму, запишемо миттєву різницю фаз сигналів на входах фазового детектора таким чином:

$$\varphi(t) - \bar{\varphi}, \quad (3.5)$$

де $\bar{\varphi}$ – середнє значення різниці фаз;

$\varphi(t) - \bar{\varphi}$ – відхилення миттєвої різниці фаз від середнього значення під дією перешкод.

Розкладаючи нелінійну характеристику ФД в ряд Тейлора навколо точки, фази, що відповідає середньому значенню, і обмежуючись лінійними членами розкладання, напругу на виході ФД можна представити таким чином:

$$U_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД max}} \cos \varphi(t) - U_{\text{ФД max}} \sin \varphi(t), \quad (3.6)$$

де $U_{\text{ФД max}} = K_{\text{Д}} U_{\text{ВГ}} U_{\text{СГ}}$; $K_{\text{Д}}$ – коефіцієнт детектування.

У виразі (3.6) перший член є постійною складовою, компенсуючою початковий розлад генераторів по частоті, другий член – змінну що становить, пропорційну миттєвому відхиленню різниці фаз від її стаціонарного значення, а третій член – паразитну амплітудну модуляцію вихідного сигналу ФД, обумовлену варіаціями амплітуд вхідних сигналів. Остання складова призводить

до паразитної фазової модуляції СГ. З виразу (3.6) виходить, що при малих відхиленнях фази від середнього значення $\bar{\omega}$ приріст напруги на виході ФД визначатиметься наступним вираженням [118]:

$$U_{\text{ФД}} = K_{\text{ФД}} \cdot \sin \varphi, \quad (3.7)$$

де
 $K_{\text{ФД}} = K_d \sin$

– коефіцієнт \bar{K} передачі ФД, у кращому разі рівний 1.

Якщо врахувати інерційність випрямлячів, то передатна функція ФД визначатиметься рівнянням:

$$K_{\text{ФД}}(p) = \frac{K_{\text{ФД}}}{1 + pT_{\text{ФД}}}, \quad (3.8)$$

де $4C_n(R_n + R_i)$ – постійна часу ФД;

$T_{\text{ФД}}$

R_i – внутрішній опір діода.

Вважаючи, що усе запізнювання зосереджене в УПЧ, і лініаризуя характеристику фазового детектора поблизу точки рівноваги, можна процеси в системі з ФАПЧ описати за допомогою лінійного операторного рівняння [119... 120]:

$$p \Omega_y K(p) F(\cdot) \Omega_n, \quad (3.9)$$

де Ω_y – миттєва різниця фаз на виході фазового детектора;

Ω_y – смуга утримання системи ФАПЧ;

Ω_n – початковий круговий розлад;

$K(p)$ – коефіцієнт передачі розімкненої системи в операторній формі.

Для аналізу цієї лінійної системи можна використати добре розроблені методи з теорії автоматичного регулювання [119].

Оптимальні параметри схеми генератора КВЧ діапазону визначаються за критерієм мінімуму дисперсії частоти (фази) коливань вихідного сигналу генератора, що синхронізується, з урахуванням характерних особливостей спектрів усіх елементів схеми [117, 120, 121]:

$$S_0(\Omega) = \frac{1}{1 + (0,5\Omega)^2} d\Omega, \quad (3.10)$$

де $S_0(\Omega)$ – енергетичний спектр зміни частоти виходу генератора, що стабілізується;

Δt – інтервал часу виміру;

σ_{Ω}^2 – дисперсія відхилень частоти генератора, що стабілізується.

З метою визначення спектральної потужності (СПМ) $S_0(\Omega)$ розглянемо фільтруючу дію ФАПЧ на спектр вихідного коливання, вважаючи, що в якості фільтру низьких частот використовуємо пропорційно-інтегруючий фільтр з функцією передачі [120].

$$K(p) = \frac{(1 - pT_2)(1 - pT_3)}{(1 - pT_1)(1 - pT_4)} \quad (3.11)$$

де T_1, T_2, T_3, T_4 – постійні часу фільтру.

Схема пропорційно-інтегруючого фільтру приведена на рис. 3.3.

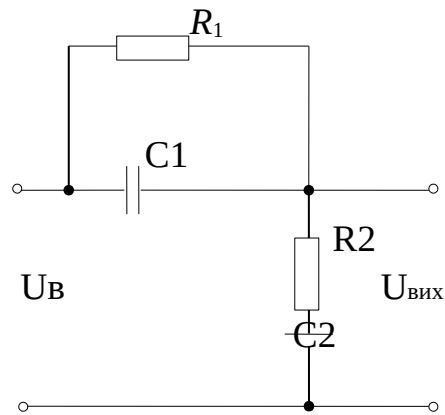


Рис. 3.3. Схема пропорційно-інтегруючого фільтру

В даній схемі $T_1 = \frac{R_1 C_1}{R_1}$, $T_2 = \frac{R_2 C_2}{R_2}$, $T_3 = \frac{R_1 C_1}{R_1}$, $T_4 = \frac{R_1 C_1 R_2}{R_1 R_2}$,

T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , C_2 , C_1 и R_1 , R_2 .

$S_0(\omega)$ може бути представлено виразом [101]:

$$S_{\Omega} = S_{\Omega_{\text{ГГ}}} + S_{\Omega_{\text{СПЧ}}} \left| \frac{W(j\Omega)}{1 - W_p(j\Omega)} \right|^2, \quad (3.12)$$

де $S_{\Omega_{\text{ГГ}}}(\omega)$ – енергетичний спектр генератора, що синхронізується;

$S_{\Omega_{\text{СПЧ}}}(\omega)$ – енергетичний спектр усіх джерел флуктуацій, вважаючи, що вони некорельовані між собою;

$W_p(j)$ – передатна функція розімкненої системи ФАПЧ.

З метою спрощення математичних викладень зневагою запізнюванням в трактах помножувача і УПЧ, і рахуватимемо коефіцієнти передачі усіх ланок, окрім УПЧ, ФД і ФНЧ, незалежними від частоти в смузі пропускання системи. Крім того, нехтуватимемо впливом гілки синтезатора на передатну функцію

системи і обмежимося обліком власних шумів генератора, що синхронізується, і високостабільного генератора (ВГ).

З розгляду структурної схеми (рис. 3.2) виходить, що передаточна функція розімкненої системи визначатиметься виразом [101, 114]:

$$\begin{aligned}
 W_p(j\Omega) = & \frac{\Omega^{-1} (j\Omega)T_1^{-1} (j\Omega)T_3^{-1}}{1 (j\Omega)T_y^{-1} 1 (j\Omega)T_{\Phi D}^{-1} 1 (j\Omega)T_1^{-1} 1 (j\Omega)T_4^{-1} j\Omega} \\
 & \Omega^{-1} (j\Omega)T_{уд}^{-1} (j\Omega)T_2^{-1} (j\Omega)T_3^{-1} j\Omega (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) \\
 & + (j\Omega)^2 (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_y^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) \\
 & (j\Omega)^3 (T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_1^{-1} T_y^{-1} T_4^{-1} T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) (j\Omega)^4 (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) j\Omega^{-1},
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

де

$$\Omega_{УД} = \frac{K_y K_{\Phi D} K_{УПТ}}{K_{СГ}} S_y \quad \text{— смуга утримання системи ФАПЧ.}$$

Тоді, відповідно до (3.12), енергетичний спектр генератора, що синхронізується, матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 S(\omega) = & S_{СГ}(\omega) \\
 & \left| \frac{1}{j\Omega} j(T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) \right. \\
 & (j\Omega)^2 (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_y^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) \\
 & (j\Omega)^3 (T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_1^{-1} T_y^{-1} T_4^{-1} T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) (j\Omega)^4 (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) j^{-2} \\
 & \left. \left| \frac{1}{j\Omega} j(T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) (j\Omega)^2 (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_y^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) \right. \right. \\
 & (j\Omega)^3 (T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_1^{-1} T_y^{-1} T_4^{-1} T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_4^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) (j\Omega)^4 (T_y^{-1} T_{\Phi D}^{-1} T_1^{-1} T_4^{-1}) j \\
 & \left. \left. \frac{1}{j\Omega} (j\Omega)T_2^{-1} \frac{1}{j\Omega} (j\Omega)T_3^{-2} \right| \right.
 \end{aligned}$$

$$S_{\text{фВГ}}(\omega) = \frac{1}{\Delta} (1 - jT_2)(1 - jT_3) \frac{1 - j(T_y T_{\text{фД}} T_1 T_4)}{(j)^2 (T T_{\text{фД}} T_1 T_y T_4 T_{\text{фД}} T_4 T_1 T_4)} \quad (3.14)$$

$$(j)^3 (T T_{\text{фД}} T_1 T_1 T_y T_4 T_y T_{\text{фД}} T_4 T_{\text{ф}} T_1 T_4) \frac{(j)^4 (T T_{\text{фД}} T_1 T_4) j}{\Delta}$$

$$\frac{1}{\Delta} |1 - jT_1 - jT_2|^2.$$

Згідно [101,114,118] СПМ флуктуацій високостабільного генератора (ВГ) складається з кварцового генератора і малoshумливого помножувача частоти. Кварцовий генератор складається зі збудника, в якому як селективний елемент

використовується кварцовий резонатор, і буферного підсилювача, призначеного для розв'язки і посилення вихідного сигналу кварцового генератора. У кварцовому генераторі частота залежить від рівня потужності, що розсіюється на кварцовому резонаторі, причому зміни частоти ростуть при збільшенні цієї потужності. Тому генератор видає сигнал малої потужності (десятки мкВт), який потім посилюється за допомогою буферного підсилювача. СПМ флуктуацій високостабільного генератора (ВГ) може бути приблизно описана наступним виразом [101, 114, 122]:

$$S_{\text{ВГ}}(\Omega) = \frac{A_1}{A} \frac{\Omega^2}{N^2}, \quad (3.15)$$

де A_1 – коефіцієнт, що характеризує дію фліккер-шумів, рівний 10^{-10} Гц²;

A_2 – коефіцієнт, що характеризує дію адитивного шуму, рівний 10^{-13} Гц⁻¹.

Спектральна щільність флуктуацій фази синхронізованого генератора приблизно може бути описана наступним виразом [101, 122,]:

$$S_{\text{сГ}}(\Omega) = \frac{c_{\text{Г}}}{\Omega^2}, \quad (3.16)$$

де $c_{\text{Г}}$ – коефіцієнт, що характеризує рівень шуму генератора, що синхронізується, залежний від режиму роботи активних елементів генератора і навантаженої добротності коливальної системи; Ω – коефіцієнт, що враховує частотну залежність шуму.

З метою спрощення дисперсії вважаємо $\Omega = 2$. Тоді, вираження для спектральної щільності фазових флуктуацій генератора, що синхронізується, може бути записане у виді:

$$S_{\text{сГ}}(\Omega) = \frac{c_{\text{Г}}}{\Omega^4}, \quad (3.17)$$

а спектральна щільність частотних флуктуацій матиме наступне вираження [101]:

$$S_{CF}(\Omega) = \dots ,$$

 Ω^2

(3.18)

де $\sigma \approx 10^4 \text{ Гц}^3$.

Для оцінки можливої мінімальної дисперсії фази (частоти) однокільцевої системи ФАПЧ визначимо максимальне і мінімальне можливе значення смуги утримання. Максимально можливе значення смуги утримання визначатиметься значенням постійної часу підсилювача проміжної частоти T_y з умови стійкості системи:

$$\Omega_{уд} = \frac{1}{2 T_y}. \quad (3.19)$$

Постійну часу підсилювача проміжної частоти T_y можна визначити з виразу [114]:

$$T_y = n \frac{1}{f}, \quad (3.20)$$

де n – число каскадів;

f – функція, залежна від типу каскадів підсилювача;

f – смуга пропускання підсилювача.
Зазвичай $n = 3, 1 \dots 2$.

Вважаючи, що $f = 1 \text{ МГц}$, величина T_y буде рівна:

$$T_y \approx \frac{1}{3,1} \frac{1}{10^6} \approx 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ с,}$$

$\omega_{уд}$ буде менше $0,1 \cdot 10^6$ рад. Мінімально допустиме значення $\omega_{уд}$

визначатиметься смугою захоплення ($F_{сх}$) ФАПЧ:

$$\Omega_{уд} \approx 2 F_{сх}, \quad (3.21)$$

де $N = \frac{f_{сг}}{f_{кг}}$.

$F_{сх}$

Припустимо, що $f_{кг} = 50$ МГц, $N = \frac{f_{\max}}{f_{кг}} = \frac{76,5}{0,05} = 1530$; $f_{сг} = 10^{10}$;

$f_{сг} = 10^8$ при $T_u = 100$ с. При таких даних $F_{сх} = 7,65 \cdot 10^2$ Гц, а $\omega_{уд} = 48,04 \cdot 10^2$

рад. Отже, $\omega_{уд}$ лежить в межах:

$$5 \cdot 10^3 \text{ рад} > \omega_{уд} > 0,1 \cdot 10^6 \text{ рад.} \quad (3.22)$$

Аналіз систем з ФАПЧ показує, що чим менше смуги утримання, тим більше запас стійкості системи [101]. Підставляючи (3.15) і (3.18) в (3.14), отримаємо енергетичний спектр на виході генератора, що синхронізується, в наступному вигляді:

$$(1 - j\Omega T)(1 - j\Omega T)^2$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} 1 & j\Omega(T_2 & T_3 & | & | & T & T) \\ \text{yД} & & & & & \text{y} & \text{ФД} & 1 & 4 \end{matrix} \\
 & (j\Omega)^2 (T_3 T_4 \quad T_y T_{\Phi Д} \quad T_{\Phi Д} T_1 \quad T_y T_4 \quad T_{\Phi Д} T_4 \quad T_1 T_4) \quad \begin{matrix} 4 \\ | \end{matrix} \quad (3.25) \\
 & (j\Omega) (T_y T_{\Phi Д} T_1 \quad T_1 T_y T_4 \quad T_y T_{\Phi Д} T_4 \quad T_{\Phi Д} T_1 T_4) (j\Omega) (T_y T_{\Phi Д} T_1 T_4) j\Omega \\
 & \Omega_{\text{yД}} \quad 1 \quad j\Omega T_2 \quad 1 \quad j\Omega T_3 \quad |_2 \quad .
 \end{aligned}$$

Залежність квадрата модуля замкнутої системи від частоти при різних параметрах пропорційно-інтегруючого фільтру приведена на рис. 3.4. При виборі постійної фільтру T потрібно прагнути до того, щоб виконувалося

співвідношення $T = \frac{1}{\Omega_{\text{АПЧ}}}$, де $\Omega_{\text{АПЧ}}$ – смуга пропускання системи. В цьому випадку не відбувається погіршення стійкості системи при необхідній смузі пропускання $\Omega_{\text{АПЧ}} = \text{УД}$.

З рис. 3.4 випливає, що оптимальними параметрами пропорційно-інтегруючого фільтру будуть $T = 10^2$ с, $T = 10^3$ с, $T = 10^4$ с, $T = 10^5$ с при смузі пропускання системи $\Omega_{\text{АПЧ}} = 10^4$ рад.

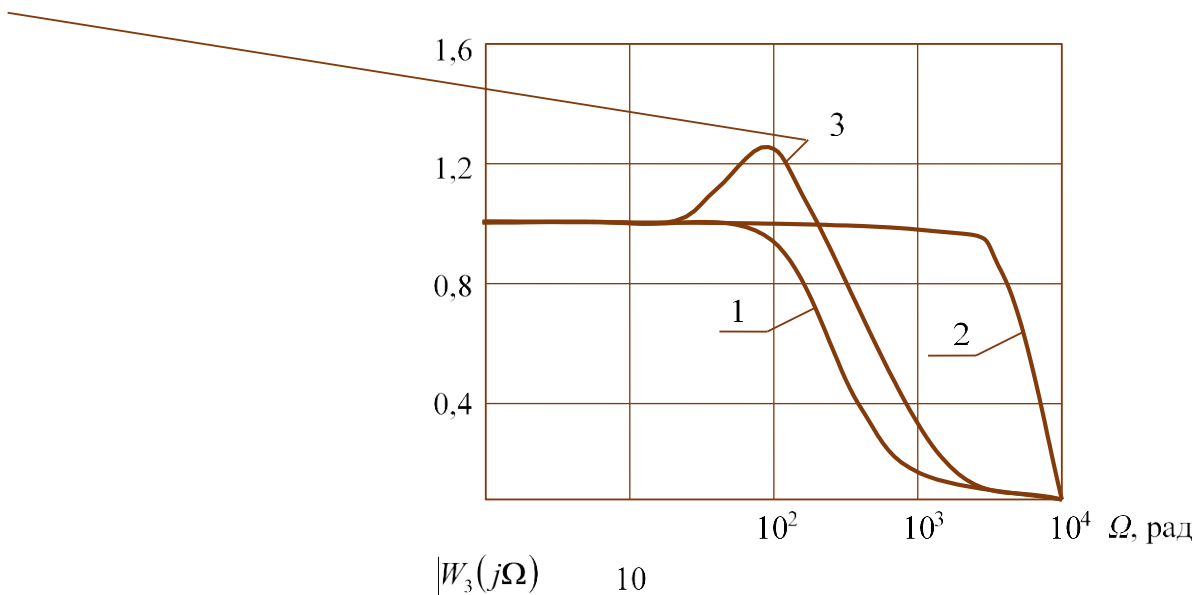


Рис. 3.4. Амплітудно-частотна характеристика замкнутої системи ФАПЧ:

1 – $T_y = 10^{-6}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_1 = 10^{-3}$ с; $T_2 = 10^{-4}$ с; $T_3 = 10^{-5}$ с; $T_4 = 10^{-6}$ с; $\Omega_{\text{УД}} = 10^4$ рад; 2 – $T_y = 10^{-6}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_1 = 10^{-2}$ с; $T_2 = 10^{-3}$ с; $T_3 = 10^{-4}$ с; $T_4 = 10^{-5}$ с; $\Omega_{\text{УД}} = 10^4$ рад; 3 – $T_y = 10^{-6}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_1 = 10^{-1}$ с; $T_2 = 10^{-2}$ с; $T_3 = 10^{-3}$ с; $T_4 = 10^{-4}$ с; $\Omega_{\text{УД}} = 10^4$ рад.

З урахуванням отриманих даних ($T_y = 10^{-6}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_1 = 10^{-2}$ с; $T_2 = 10^{-3}$

с; $T_3 = 10^{-4}$ с; $T_4 = 10^{-5}$ с; $\Omega_{уд} = 10^4$ рад; $N = 1530$) відносна

середньоквадратична варіація частоти генератора, що синхронізується, за інтервал виміру τ визначатиметься виразом [101, 123]:

$$\frac{(\Delta f)_{\text{ср}}}{f} = \frac{1}{\sqrt{2}} S_{\text{ш}} \int_{\Omega} \frac{1}{1 + (0,5\Omega)^2} d\Omega, \quad (3.26)$$

Аналіз показує, що інтеграл у вираженні (3.26) розходиться, тому межі інтеграції необхідно обмежити [123]: нижня межа – відношенням τ (час

T

виміру нестабільності частоти сигналу). Якщо протягом часу T ділиться на M вимірів за час τ , то T буде рівне $M \tau$.

Приймаючи $M = 20$ за час 10^3 с, нижня межа буде рівна 10^2 рад. Верхня межа інтеграла у виразі (3.26) визначатиметься смугою пропускання системи – 10^4 рад.

Чисельний аналіз показав, що відносна нестабільність частоти генератора, що синхронізується, для однокільцевої системи ФАПЧ складає $3,1 \cdot 10^3$ с, а відношення потужності сигналу до потужності шумів було рівне 5 дБ.

Аналіз отриманих даних показує, що однокільцева схема ФАПЧ не може бути використана для створення стабільного по частоті генератора перебудованого в діапазоні частот міліметрового діапазону з коефіцієнтом множення 1500 одиниць. Ці результати підтверджують відомі положення про те, що при коефіцієнті множення $N = 1 \cdot 10^4$ спектр сигналу розсипається [16, 114]. Тому слід розглянути систему з двома кільцями ФАПЧ.

3.3. Аналіз характеристик генератора з двохкільцевою системою ФАПЧ в мм діапазоні довжин хвиль

Введення другого кільця фазового автопідстроювання частоти генератора, що стабілізується, еквівалентно введенню другого стежучого фільтру і, отже, повинно сприяти підвищенню фільтруючих властивостей системи: поліпшенню відношення сигнал/шум на виході і підвищенню короткочасної стабільності частоти вихідного сигналу. Функціональна схема двохкільцевої системи фазового автопідстроювання частоти вихідного автогенератора, що стабілізується, представлена на рис. 3.5.

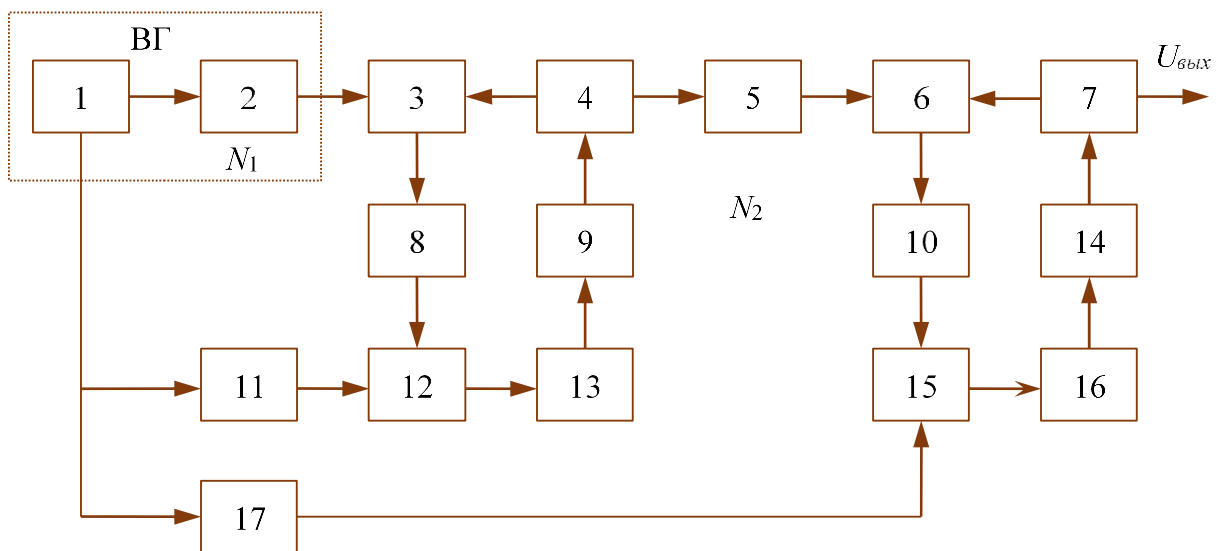


Рис. 3.5. Структурна схема генератора з двома кільцями ФАПЧ:

- 1 – кварцовий генератор;
- 2, 5 – помножувачі частоти;
- 3, 6 – змішувачі;
- 4 – підлаштовуваний проміжний генератор;
- 8, 10 – підсилювачі проміжної частоти;
- 12, 15 – ФД;
- 11, 17 – синтезатори;
- 13, 16 – ФПЧ;
- 9, 14, 16 – УПТ.

Відповідно до функціональної схеми (рис. 3.5) спектральна потужність фазових флуктуацій на виході двохкільцевої системи визначатиметься виразом:

$$S_{\Gamma}(\Omega) = S_0(\Omega) \left| \frac{1}{1 - W_2(j\Omega)} \right|^2 + S_{OC}(\Omega) \left| \frac{W_2(j\Omega)}{1 - W_2(j\Omega)} \right|^2, \quad (3.24)$$

$S_0(\Omega)$ – спектральна потужність фазових флуктуацій вихідного автогенератора;

$W_2(j)$ – передатна функція розімкненого другого кільця системи ФАПЧ.

$$S_{OC}(\Omega) = S(\Omega) S_{\text{УМ2}}(\Omega) N^2 \quad (3.28)$$

спектральна потужність фазових флуктуацій сигналу зовнішнього кільця ФАПЧ;
 S_0 – спектральна потужність фазових флуктуацій першого кільця, визначувана виразом (3.14); $S_{\text{УМ2}}$ – спектральна потужність фазових флуктуацій помножувача частоти другого кільця ФАПЧ, визначувана виразом [16, 101]:

$$S_{\text{УМ2}}(\Omega) = B$$

(3.

де B $10^{10} \dots 10^{13}$, параметр, залежний від типу помножувача, інтенсивності шуму, режиму роботи активних елементів і добротності контурів. Коефіцієнт множення УМ2 визначається співвідношенням $N_2 \frac{N}{1}$, де N – коефіцієнт множення частоти системи перенесення спектру. Визначимо смугу утримання в першому і другому кільцях системи ФАПЧ:

$$F_{CX} = \frac{1}{T_{y1}} \cdot \Omega_{уд} \cdot N_1 \cdot f_{ЭГ} \cdot \dots \quad (3.30)$$

де $F_{CX} = \dots$

T_{y1} – постійна часу підсилювача, визначувана виразом (3.20).

У зовнішньому (другому) кільці ФАПЧ смуга захоплення F_{CX2} визначатиметься виразом:

$$F_{CX} = N_2 \cdot f_{ПГ} \cdot \dots \quad (3.31)$$

Враховуючи, що $N = \frac{N_2}{N_1}$, отримаємо:

$$F_{CX} = N \cdot f_{ЭГ} \cdot \dots \quad (3.32)$$

Таким чином, вираження для спектральної потужності фазових флуктуацій генератора КВЧ діапазону 73...77 ГГц визначатиметься виразом:

$$S_{Г}(\Omega) = S^0(\Omega) \left| \frac{1}{1 - W_2(j\Omega)} \right|^2 + S_{ум2}(\Omega) N^2 \left| \frac{W_2(j\Omega)}{1 - W_2(j\Omega)} \right|^2 \quad (3.33)$$

Підставивши вираз (3.33) в рівняння (3.26), оптимізуємо нестабільність частоти генератора по коефіцієнту множення N_1 і N_2 . Підсумки оптимізації представлені в таблиці 3.1.

Підсумки оптимізації відносної нестабільності частоти генератора для діапазону
частот 73...77 ГГц

N_1	N_2	$\frac{P_c}{P_u}$, дБ	σ_y , 10^{-3} с
150	10	67,3	$1,2 \cdot 10^{-7}$

На рис. 3.6 представлена залежність нестабільності частоти генератора від часу виміру для джерела в КВЧ діапазоні 73...77 ГГц.

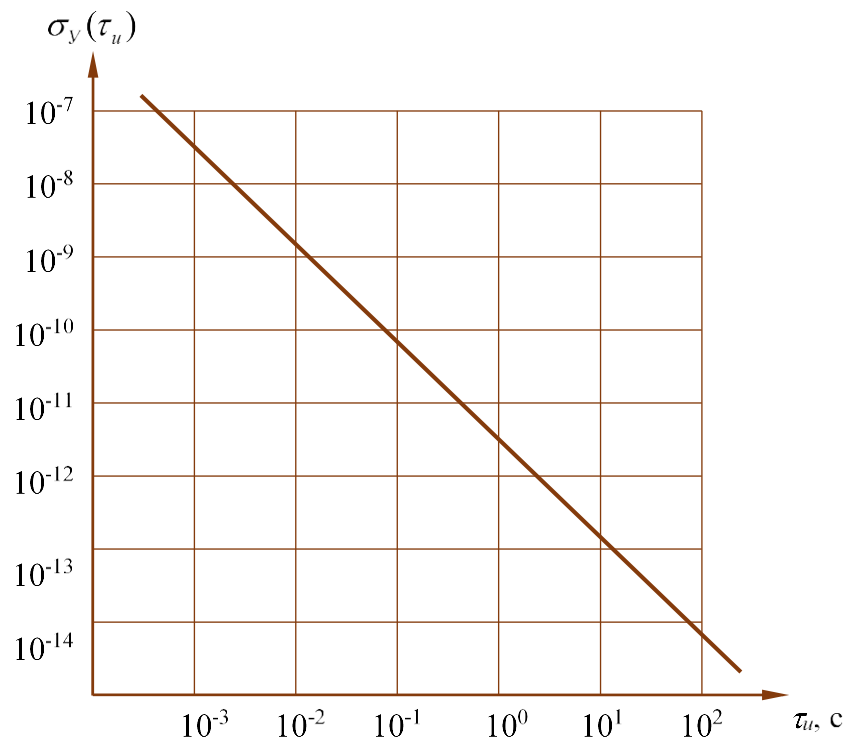


Рис. 3.6. Відносна нестабільність частоти генератора КВЧ діапазону 73...77 ГГц

3.4. Аналіз стійкості генераторної системи з ФАПЧ

Стійкість лінійної системи визначається її характеристиками і не залежить від діючих впливів [120, 121]. Процеси в системі з ФАПЧ описуються диференціальним рівнянням [120].

$$\begin{aligned}
 & P^5 \begin{matrix} T & T_\Phi & T_1 & T \\ \text{д} & & & 4 \end{matrix} \quad P^4 \begin{matrix} T & T_{\Phi Д} T_1 & T_1 T_y T & T_y T_{\Phi Д} T \\ & & 4 & 4 \end{matrix} \quad T_\Phi T_1 T_4 \\
 & P^3 \begin{matrix} (T & T & T_y T_\Phi & T_{\Phi Д} T_1 & T_y T_4 & T_{\Phi Д} T_4 & T_1 T_4) \\ & & \text{д} & & & & \end{matrix} \\
 & P^2 \begin{matrix} T & T_{\Phi Д} & T_1 & T_4 & \Omega_{уд} T \\ & & & & 2 T_3 \end{matrix} \quad P(1 \quad \Omega \quad T_2 \quad \Omega_{уд} T_3) \quad \Omega_{уд}.
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Для оцінки стійкості системи з ФАПЧ за критерієм Гурвіця з коефіцієнтів рівняння (3.34) необхідно скласти матрицю Гурвіця. З цією метою рівняння (3.34) запишемо в наступному вигляді:

$$a P^n + a P^{n-1} + a P^{n-2} + a P^{n-3} + a P^{n-4} + 0 \tag{3.35}$$

где

$$\begin{aligned}
 a_n &= T_y T_{\Phi Д} T_1 T_4; \quad a_{n-1} = T_y T_{\Phi Д} T_1 T_1 T_y T_4 T_y T_{\Phi Д} T_4 T_{\Phi Д} T_1 T_4; \\
 a_{n-2} &= T_1 T_y T_y T_{\Phi Д} T_{\Phi Д} T_1 T_y T_4 T_{\Phi Д} T_4 T_1 T_4; \\
 a_{n-3} &= T_y T_{\Phi Д} T_1 T_4 \Omega_{уд} (T_2 T_3); \quad a_{n-4} = 1 \Omega_{уд} T_2 \Omega_{уд} T_3; \\
 a_0 &= \Omega_{уд}.
 \end{aligned}$$

На підставі рівняння (3.35) була складена матриця Гурвіця [120].

$$\begin{vmatrix}
 a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & 0 & 0 \\
 a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & 0 & 0 \\
 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & 0 & 0 \\
 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & 0 \\
 0 & 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_0
 \end{vmatrix} \tag{3.36}$$

Для оцінки стійкості системи необхідно вчислити визначників Гурвіця, які виходять з матриці (3.36):

$$\Delta_1 = a_{n-1}$$

$$\left| \begin{matrix} a_{n-1} \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{matrix} \right|$$

$$a_n$$

a

n

3

a

n

2

$$^3 \begin{vmatrix} a_{n1} & a_{n3} & a_{n5} \\ a_n & a_{n2} & a_{n4} \\ 0 & a_{n1} & a_{n3} \end{vmatrix}$$

Система генератора з ФАПЧ стійка, якщо $a_n > 0$,
при

$$\Delta_3 > 0, \dots, \Delta_n > 0. \quad (3.37)$$

Величина визначника Δ_n визначається залежністю [120]:

$$\Delta_n = a_0 \Delta_{n1}. \quad (3.38)$$

Оскільки $a_0 > 0$, то для перевірки стійкості системи досить уточнити знаки до Δ_{n1} визначника.

Підставивши дані системи з ФАПЧ $T = 10^6$ с; $T_{\text{фд}} = 10^3$ с; $T = 10^2$ с;
 $T = 10^3$ с; $T = 10^4$ с; $T = 10^5$ с; $\omega_{\text{уд}} = 10^4$ рад у визначники $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$,
переконаємося, що система має запас стійкості.

3.5. Обґрунтування структурної схеми і елементів помножувачів частоти для генератора на основі ФАПЧ

Теоретичний аналіз біофізичної дії електромагнітних випромінювань в міліметровому діапазоні довжин хвиль показав, що для знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні плодів яблунь потрібні джерела, що забезпечують в діапазоні частот 73 – 77 ГГц потужність вихідного сигналу 700 – 800 мВт з відносною нестабільністю частоти $10^{-7} \dots 10^{-8}$ і рівнем фазових шумів 90 – 100 дБ/Гц на частоті настроєна від несучої $F = 10$ кГц. Для зменшення фазових

шумів і підвищення короткочасної стабільності частоти була застосована двохкільцева система ФАПЧ, яка дозволяє досягти рівня, визначуваного шумами кварцового генератора [16, 114].

На основі проведених досліджень було встановлено, що для першого кільця потрібний помножувач з коефіцієнтом множення $N_1 = 150$, а для другого кільця з коефіцієнтом множення $N_2 = 10$. Множення частоти в першому кільці джерела здійснюється від кварцового генератора з частотою 50 МГц і відносною нестабільністю частоти $10^{-7} \dots 10^{-8}$.

З усіх каскадів множення в сумарну спектральну щільність потужності фазових шумів найбільший вклад вносить перший каскад, оскільки його власні шуми множаться подальшими каскадами. Тому вхідний каскад помножувача з $n = 5$ повинен поміщатися першим [124 – 126]. На відміну від вхідних каскадів, що визначають фазові флуктуації, подальші підсилювально-помножувальні каскади окрім множення частоти повинні посилити вихідний сигнал до рівня необхідного для нормальної роботи помножувачів на діодах з накопиченням заряду ДНЗ [127].

Для кращої фільтрації паразитних гармонік і забезпечення стикування з діодом з накопиченням заряду (ДНЗ) слідє, щоб крайовий каскад працював в режимі посилення, а для забезпечення стійкої роботи необхідно чергувати каскади посилення і множення [125 – 129]. Для орієнтовного встановлення числа каскадів підсилювачів і помножувачів необхідно визначати загальні коефіцієнти посилення по потужності K_p і множення по частоті K_f

$$K_p = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \quad \text{і} \quad K_f = \frac{f_{\text{вих}}}{f_{\text{вх}}}$$

Вибір транзисторів і визначення основних характеристик необхідно розпочинати з крайового каскаду. Транзистор вихідного каскаду в режимі посилення повинен віддавати потужність $P_{\text{вих}}$ зі значенням $K_p \geq 3$. Якщо один транзистор не забезпечує потрібної потужності, то можна використати декілька транзисторів, зібраних за балансною схемою, яка має переваги в порівнянні із звичайними одинарними підсилювачами. До їх числа відносяться: зменшення взаємної модуляції; поліпшення лінійності фазової характеристики; висока

надійність; при виході з ладу одного з транзисторів загальний коефіцієнт посилення знижується приблизно на 6 дБ [130]. Використовуючи відомий ККД транзистора η , можна визначити втрати потужності на колекторі:

$$P_p = P_{\text{вих}} (1 - \eta) \quad (3.38)$$

Знаючи орієнтовне значення коефіцієнта посилення по потужності потужного каскаду, можна оцінити потужність, необхідну для його збудження:

$$P_{\text{в}} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta} \quad (3.40)$$

З урахуванням ККД міжкаскадному зв'язку транзистор передкрайового каскаду повинен віддати потужність більшу, ніж $P_{\text{в}}$, тобто:

$$P_1 = \frac{P_{\text{в}}}{K_p} \quad (3.41)$$

Вибір типу транзистора передкрайового каскаду визначається не лише необхідною величиною P_1 , але і величиною K_p цього транзистора і даними живлення колекторного кола. Слід зазначити, що якщо передкрайовий каскад працює в режимі множення, то ККД колекторного контуру має бути невисоким, інакше із-за поганої фільтрації з'явиться паразитна модуляція. Тому передкрайові каскади, працюючі в помножуючому режимі, повинні мати кратність множення $n = 2 \dots 3$ в кожному каскаді. Орієнтовно можна вважати, що

при частоті збудження $0,3 \frac{m}{0}$ – вихідна потужність і коефіцієнт посилення

по потужності падають в n раз [128, 129]:

$$P_n = \frac{P_1}{n^n} K_{pn} = \frac{K_p^n}{n^n} \quad (3.42)$$

Помножувачі частоти на серійних транзисторах можна використати на частотах до 10 ГГц [130]. Такі схеми, незважаючи на малу ефективність, надійніші і простіші в налаштуванні, оскільки на відміну від варакторних не вимагають більшого числа контурів. Основні дані вживаних транзисторів приведені в табл.3.2 .

Таблиця 3.2

Параметри вживаних транзисторів

Тип транзистора	Електричні параметри в режимі посилення				Максимально допустимі електричні параметри				
	f , МГц	$P_{вих}$, Вт	K_p , дБ	E_k , В	$P_{к макс}$, Вт	R_{th} , °С	$t_{п макс}$, °С/Вт	$U_{ебо макс}$, В	$J_{к макс}$, А
2Т918А	3000	0,25	3	20	2,5	150	50	2,5	0,2
2Т918Б	3000	0,5	3	20	2,5	150	50	2,5	0,2
2Т919А	2300	4,4	4	28	10	150	12,5	3,5	0,7
2Т919В	2300	1	4	28	3	150	40	3,5	0,2
2Т963А	10000	1	1	15	3	150	50	3,0	0,2

Для першого кільця генератора на основі ФАПЧ помножувач частоти доцільно розділити на дві частини: помножувач частоти на транзисторах до частот 500 МГц і на діоді з накопиченням заряду (ДНЗ) на вихідну частоту 7,3 – 7,7 МГц.

Транзисторна частина помножувача для першого кільця повинна відповідати наступним параметрам:

- частота генератора $f_{кг} = 50$ МГц;
- вихідна частота 500 МГц;
- коефіцієнт множення $N_1 = n_1 n_2 = 52 = 10$;
- пригнічення побічних гармонік вхідної частоти не менше 60 дБ;
- рівень фазових шумів $W = 100 - 110$ дБ/Гц;
- відносна нестабільність частоти $10^{-7} \dots 10^{-8}$.

Обґрунтування структурної схеми помножувача першого кільця необхідно розпочинати з визначення потужності на вході ДНЗ. Для спрощення структури

другого кільця ФАПЧ слід прагнути до отримання максимальної потужності на виході ДНЗ. Слід враховувати, що потужність гармонік на виході ДНЗ зменшується $1/n^2$ [126].

В якості ДНЗ вибираємо діод типу Д-312, який на частоті 7,3...7,7 МГц забезпечує вихідну потужність 10 мВт при входній 2 Вт. Для отримання потужності 2 Вт на вході ДНЗ слід застосовувати підсилювач на транзисторах зібраний за балансною схемою. Застосування балансної схеми дозволяє в помножувачі зменшити взаємну модуляцію, поліпшити лінійність фазової характеристики, підвищити надійність [130].

На рис. 3.7 приведена розроблена схема помножувачів частоти для 1-го кільця ФАП.

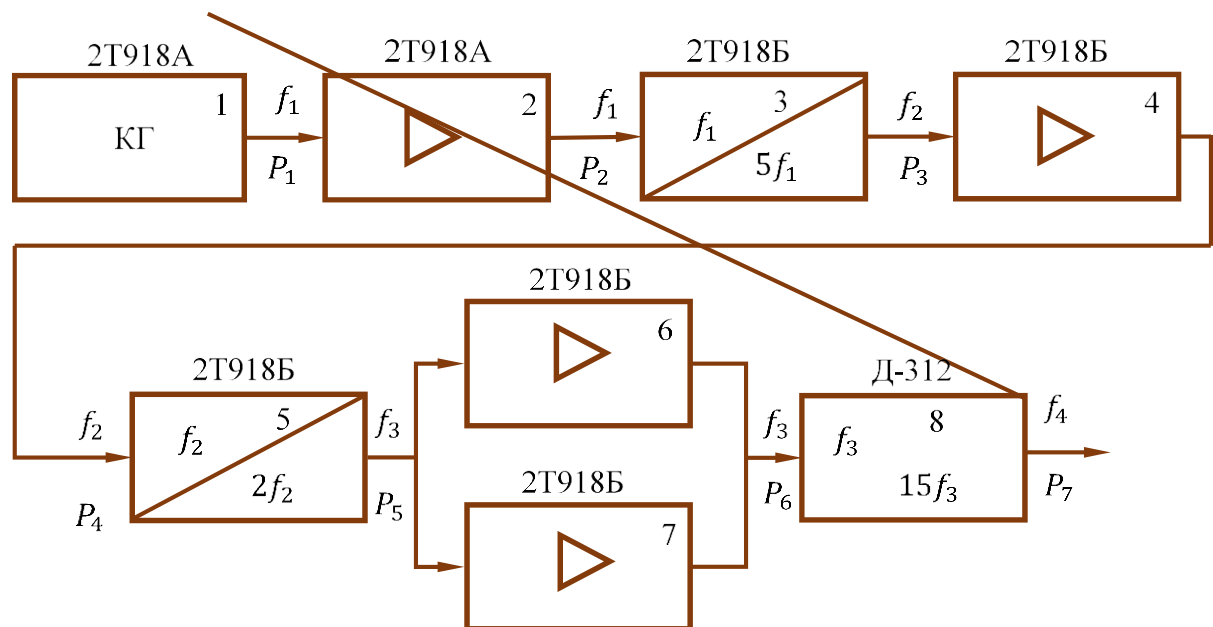


Рис. 3.7. Структурна схема помножувачів частоти системи ФАПЧ: $f_1 = 50$ МГц; $f_2 = 250$ МГц; $f_3 = 500$ МГц; $f_4 = 7,3...7,7$ ГГц; $P_1 = 25$ мВт; $P_2 = 100$ мВт; $P_3 = 100$ мВт; $P_4 = 500$ мВт; $P_5 = 500$ мВт; $P_6 = 2$ Вт; $P_7 = 10$ мВт.

Аналіз причин і методів боротьби з паразитною фазовою модуляцією, а також можливостей сучасної елементної бази (табл. 3.2) показує, що помножувач з кратністю 5 доцільно виконувати на безкорпусних транзисторах типу 2Т918Б з фільтром зосередженої селекції в якості частотно-виборчих

ланцюгів. Помножувач другого кільця ФАПЧ джерела КВЧ діапазону з вихідною частотою 73...77 ГГц може бути виконаний на лавино-пролітному діоді з кратністю множення 10 і вихідною потужністю 50 мВт. Потужність на вході помножувача має бути не менше 250 мВт.

Висновки по розділу

1. Для знищення грибкових мікроорганізмів потрібна розробка перебудованого по частоті джерела КВЧ коливань з нестабільністю частоти $10^{-8} \dots 10^{-7}$ на основі двохкільцевого фазового автопідстроювання частоти потужного генератора, що синхронізується, частотою 73...77 ГГц по кварцовому генератору, який працює на частоті 50 МГц.

2. Встановлено, що помножувач частоти в першому кільці ФАПЧ може бути виконаний на транзисторах з коефіцієнтом множення $N = 10$ ($n_1 = 5$; $n_2 = 2$) і вихідною частотою 500 МГц, а для формування гармоніки в діапазоні перебудови частоти 7,3...7,7 ГГц повинен використовуватися діод з накопиченням заряду з коефіцієнтом множення 15.

3. Помножувач в другому кільці ФАПЧ джерела КВЧ діапазону з вихідною частотою 73...77 ГГц може бути виконаний на лавино-пролітному діоді з кратністю множення 10 і вихідною потужністю 50 мВт.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ЗНИЩЕННЮ
ГРИБКОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ НА ПОВЕРХНІ ЯБЛУК ДЛЯ ЇХ
ТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ

4.1. Мета і завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень було підтвердження біотропні параметри ЕМВ для знищення грибкових мікроорганізмів отриманих теоретичним шляхом; розробка елементів і систем високостабільного по частоті джерела з вихідною частотою 73...77 ГГц і потужністю 750 мВт.

Для виконання поставленої мети були визначені завдання досліджень:

- розробка, макетування і налагодження елементів і систем високостабільного джерела з вихідною частотою 73...77 ГГц;
- розробка помножувально-підсилювальних пристроїв в сантиметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль;
- проведення багатофакторного експерименту в лабораторних умовах по знищенню грибкових мікроорганізмів з поверхні яблук;
- виробничий досвід зберігання яблук оброблених електромагнітним випромінюванням з біотропними параметрами.

4.2. Розробка кварцового генератора і помножувально-підсилювальних пристроїв

На високих частотах найбільше застосування для побудови кварцових генераторів на транзисторах знаходить ємнісна трьохкрапка з кварцовим

резонатором в ланцюзі зворотного зв'язку [101]. При виборі схеми і розрахунках кварцового генератора необхідно враховувати, що генерована частота є нелінійною функцією режиму роботи генератора (напруга живлення, величини навантаження, коефіцієнта зворотного зв'язку) і величини реактивностей, що входять в схему [133]. На рис. 4.1 приведена принципова електрична схема генератора з кварцом серії КХ-9В в ланцюзі зворотного зв'язку.

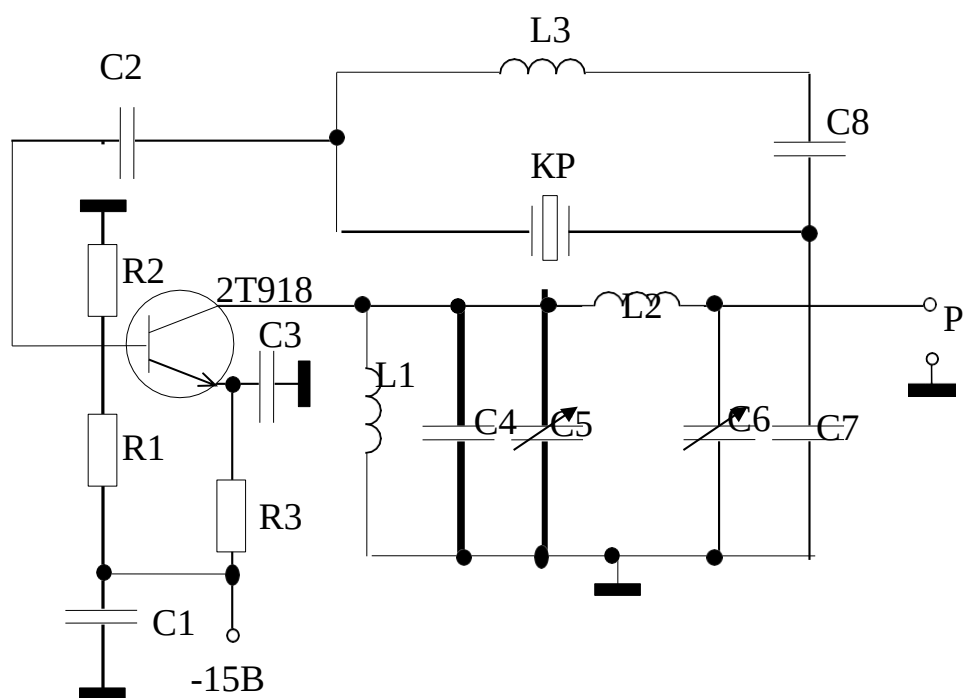


Рис. 4.1. Принципова електрична схема кварцового генератора

Кварцовий резонатор працює на першій механічній гармоніці з частотою 50 МГц. Генератор збуджується на частоті 50 МГц при зміні котушок індуктивності $L1$, $L2$ величиною 0,5 ... 0,8 мГн.

Загальний вигляд конструкції кварцового генератора приведений на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Зовнішній вигляд конструкції кварцового генератора

Структурна схема виміру параметрів кварцового генератора НВЧ діапазону приведена на рис. 4.3.

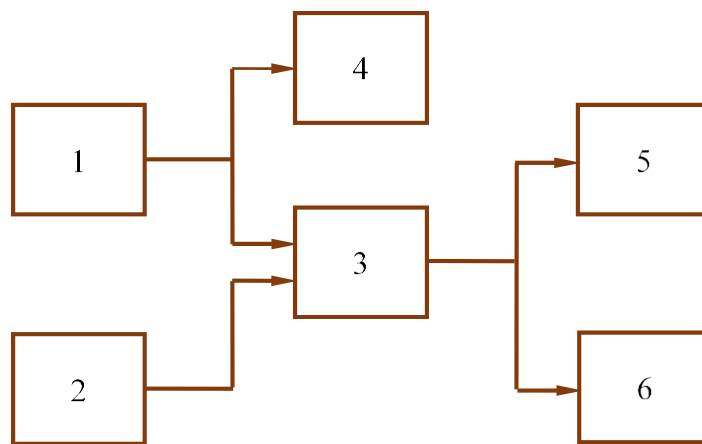


Рис. 4.3. Функціональна схема виміру параметрів кварцового генератора:
 1 – розроблений генератор на частоту 50 МГц; 2 – опорний кварцовий генератор;
 3 – компаратор фазовий (Ч7-42); 4 – вимірник потужності МЗ-11А;
 5 – аналізатори спектру СЧ-45, СЧ-73; 6 – частотомір ЧЗ-19.

Як випливає з схеми, сигнали від обох кварцових генераторів поступають на входи 1 і 2 компаратори Ч7-42. Компаратор Ч7-42 вимірює як стабільність

частоти, так і за допомогою зовнішнього аналізатора спектральну щільність флуктуацій фази (СПМФФ) [101].

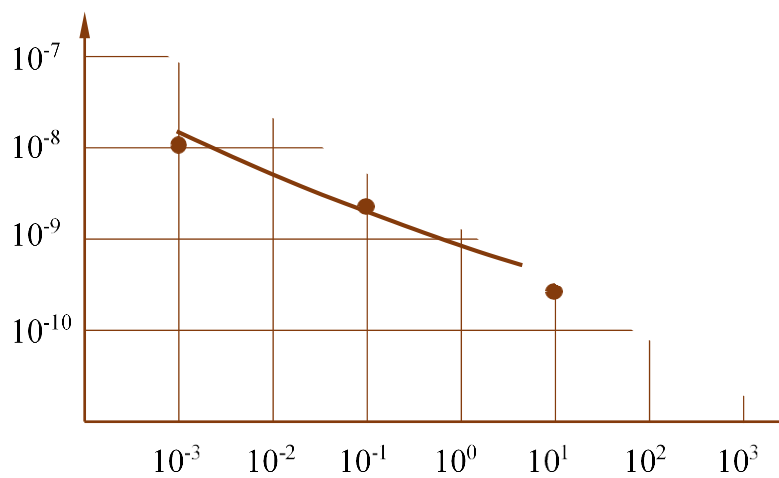


Рис. 4.4. Залежність нестабільності частоти кварцового генератора від часу виміру

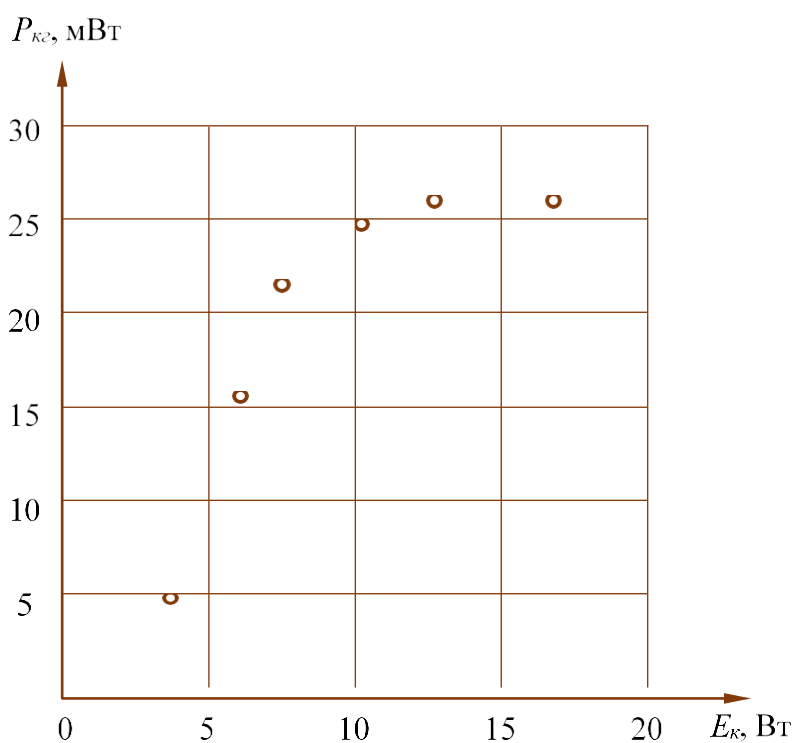


Рис. 4.5. Залежність вихідної потужності P_k кварцового генератора від напруги E_k

З отриманих залежностей виходить, що потужність на виході генератора складає 25...28 мВт, а нестабільність частоти за 10^3 с рівна 10^{-8} .

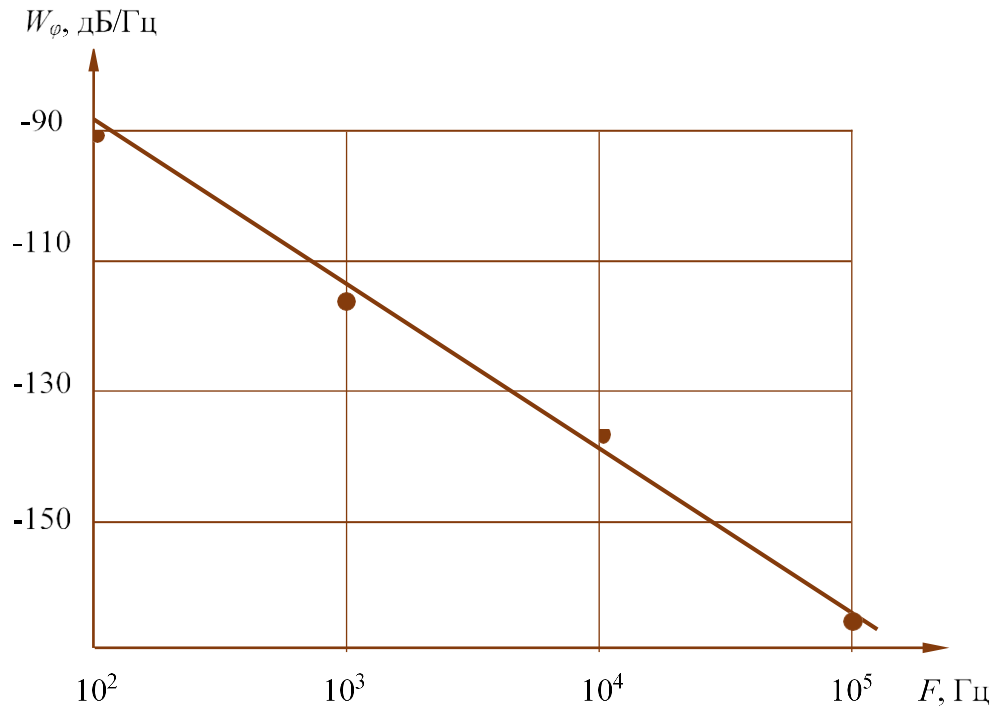


Рис. 4.6. Залежність фазових шумів кварцового генератора $f = 50\text{МГц}$ від частоти настроєння від несучої

З рис. 4.4 витікає, що спектральна потужність фазових шумів сигналу на виході кварцового генератора складає -134 дБ/Гц при частоті настроєння $F = 10$ кГц. При частоті настроєння від несучої 100 Гц спектральна потужність фазових шумів збільшується до -90 дБ/Гц. Далі розглянемо питання схемного рішення помножувачів і підсилювачів на транзисторах і діодах в кільцях ФАПЧ генератора.

Схемне рішення помножувачів розглянемо згідно структурної системи приведеної на рис. 3.7. Аналізу і розрахунку однокаскадних підсилювачів і помножувачів частоти в діапазоні до 300 МГц присвячені багато робіт [126, 132, 133], тому були розглянуті в процесі виготовлення і наладки помножувача зверху 300 МГц і широкосмугові підсилювачі балансного типу і їх енергетичні характеристики.

На рис. 4.6 показана принципова електрична схема помножувача частоти (250 МГц $\times 2$) на транзисторі 2Т918Б (№5, схема на рис. 3.7), використовуваного за схемою включення із загальною базою (кільце ФАПЧ-1). Включення

транзисторів за схемою із загальною базою пов'язане з хорошою стабільністю параметрів помножувача незалежно від і стійкістю [126, 133].

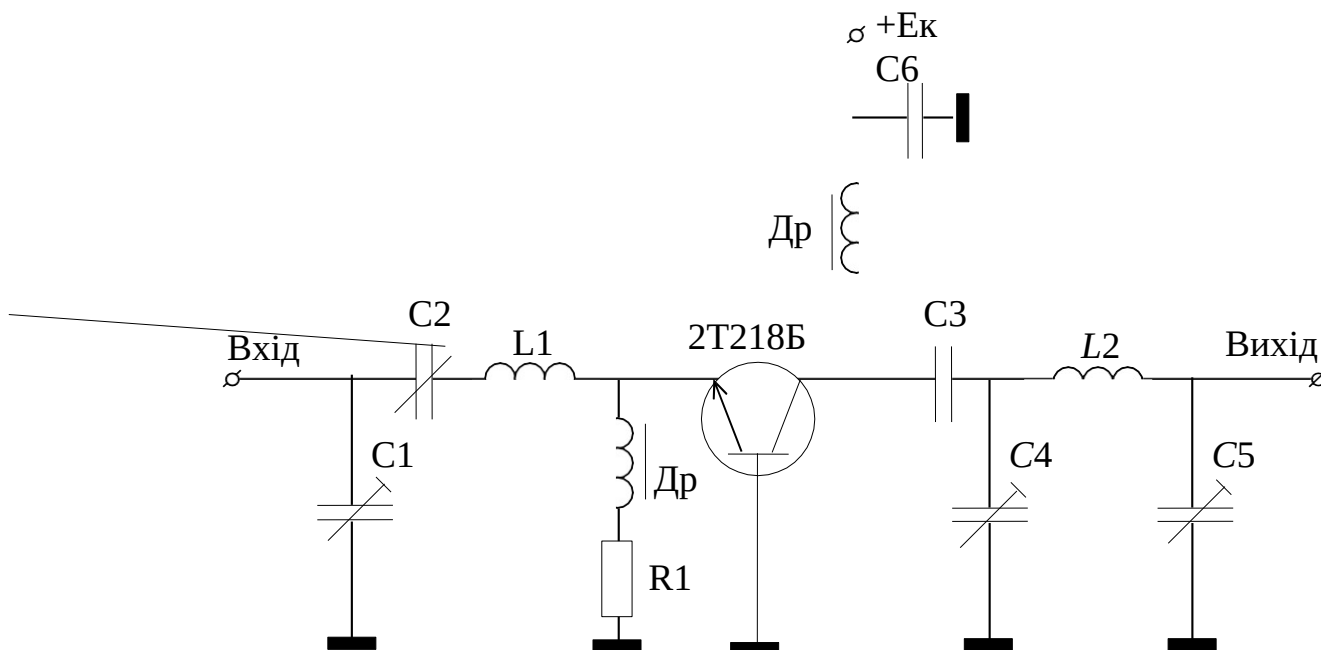


Рис. 4.6. Схема помножувача частоти (250 МГц x 2) з вихідною частотою 500 МГц

Індуктивність L_1 вхідного кола служить для компенсації реактивною складовою вхідного опору транзистора 2Т918Б. Ємності C_1 і C_2 виконують роль трансформатора для узгодження водного опору транзистора 2Т918Б з вихідним опором підсилувача на 250 МГц. У вихідному ланцюзі використовується фільтр з трансформуючими властивостями для поліпшення фільтруючих властивостей вищих гармонік. Основні вирази для розрахунку елементної бази помножувачів приведені в літературі [134, 135].

Для виміру амплітудно-частотних і спектральних характеристик був розроблений стенд (рис. 4.7).

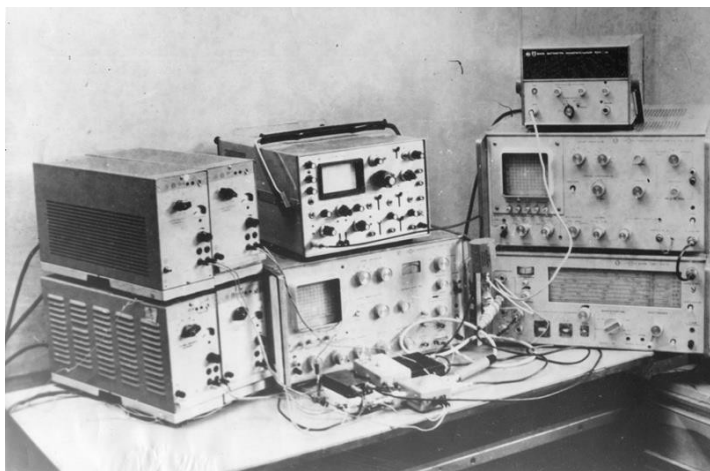
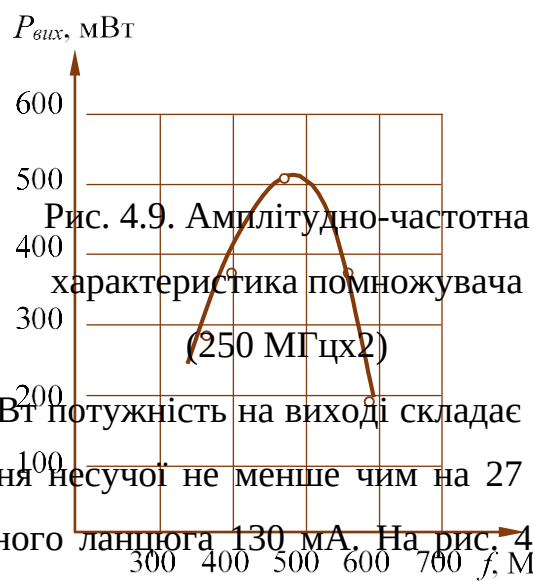
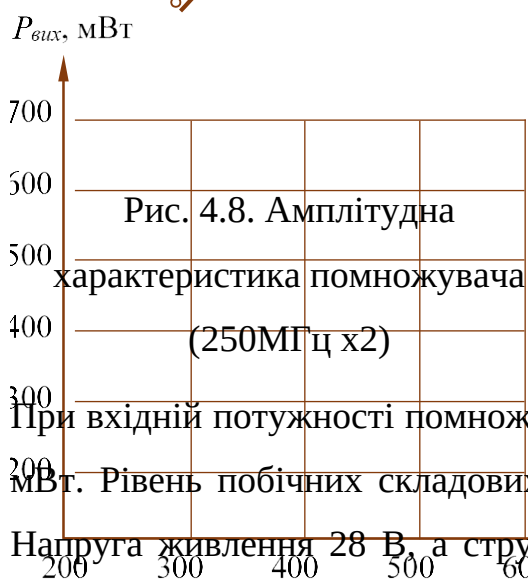


Рис. 4.7. Загальний вигляд стенду для виміру характеристик помножувачів

На рис. 4.7 і 4.8 приведені, відповідно, амплітудна і частотна характеристики помножувача (250 МГц × 2).



При вхідній потужності помножувача 500 мВт потужність на виході складає 500 мВт. Рівень побічних складових нижче рівня несучої не менше чим на 27 дБ.

Напруга живлення 28 В, а струм колекторного ланцюга 130 мА. На рис. 4.10. приведена залежність КСВ помножувача від частоти входу і виходу.

Рис. 4.10. Залежність КСВ помножувача (250 МГц × 2) з боку входу і виходу

Як впливає з отриманих залежностей КСВ по входу складає 2 одиниці, а по виходу не більше 2,5. ККД помножувача у вказаному режимі складає 23... 25%. Для отримання максимальної потужності на виході ДНЗ було застосовано підсилювач зібраний за балансною схемою. Спрощена схема балансного підсилювача показана на рис. 4.11.

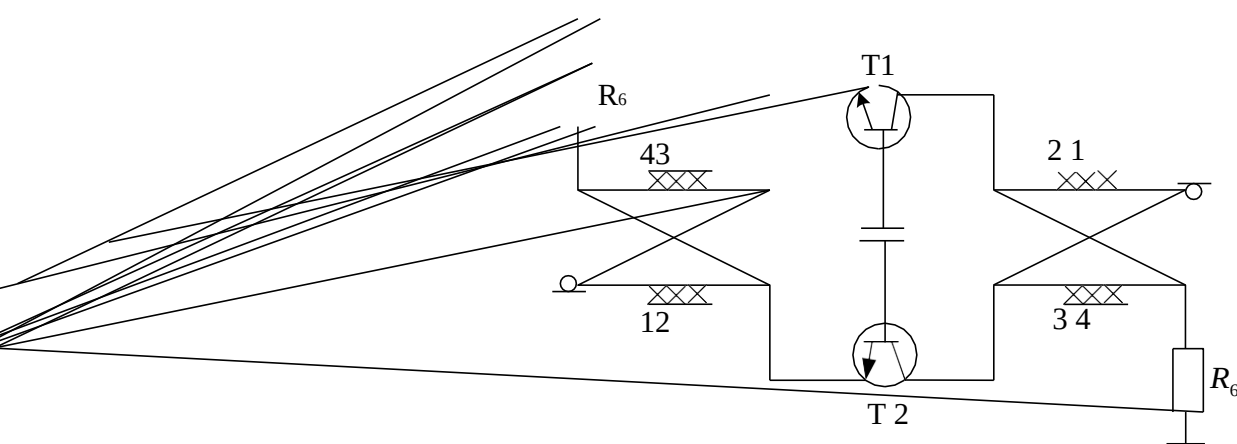


Рис. 4.11. Спрощена схема балансного підсилювача

Два мости навантаження на колі зв'язку транзисторів. Потужність збудження, що входить в плече 1, розгалужується на два сигнали рівної

амплітуди $P_n = P_{\text{возб}} / 2$. $P_{\text{вх}} = P_n + P_0$, де P_0 – відбита потужність, і,

Оскільки

враховуючи, що коефіцієнт посилення транзистора

зменшується з частотою зі швидкістю приблизно 6 дБ / октаву, можна записати, що:

$$\frac{P_{вх}}{P_n} = \frac{1}{v^2} \tag{4.1}$$

З цього виразу слідує:

$$P_{вх} = P_n \cdot 1 \tag{4.2}$$

звідки

$$\Gamma_{вх.треб}^2 = 1 / v^2 \tag{4.3}$$

де $\Gamma_{вх.треб}$ – коефіцієнт відображення на вході кола зв'язку кожного транзистора, що забезпечує необхідну залежність $P_{вх} / P_n$.

Необхідна залежність $K_{СВН}$ визначається виразом:

$$K_{СВН} = \frac{1 + \sqrt{1 / v^2}}{1 + \sqrt{1 / v^2}} \tag{4.4}$$

Оскільки квадратурні мости дозволяють істотно збільшити якісні показники підсилювачів, то коротко зупинимося на вимогах, що пред'являються до них, і перерахуємо основні типи.

До основних вимог відносяться:

- рівне ділення потужності між плечима підсилювача і фазове зрушення в робочій смузі частот;
- можливість спільної конструктивно-технологічної реалізації з погоджуючи ми ланцюгами.

До основних типів квадратурних мостів на МПЛ слід віднести:

- на основі 3-х дБ шлейфових спрямованих відгалужень (СВ);
- спрямованих дільників з фазозсувним ланцюгом в одному плечі;
- НО з електромагнітним зв'язком.

У свою чергу, за способом отримання 3-х дБ зв'язку останні можна розділити:

- по виду включення на тандемні і каскадно-включені;
- по конструктивному виконанню сильних електромагнітних зв'язків на: гребінчасті НО, НО на двох МПЛ з екраном, гребінчасті МПЛ з екраном.

На рис. 4.12 представлений зовнішній вигляд балансного підсилювача, об'єднаного на вході і виході квадратурними НВЧ мостами, на транзисторах 2Т918Б.

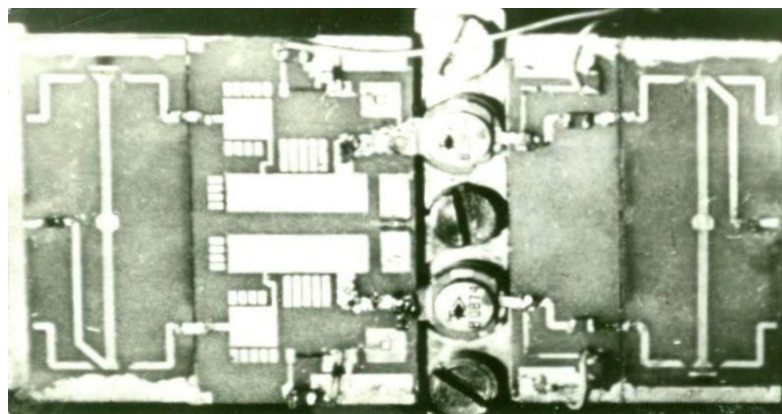


Рис. 4.12. Зовнішній вигляд балансного підсилювача

Конструктивно підсилювач складається з двох НВЧ плат, між якими встановлені транзистори 2Т918Б. Вхідна плата містить СВ на гребінчастих МПЛ з проміжним екраном і вхідні погоджувальні кола, що складаються з двох ланок полоскових трансформаторів активних опорів і місткостей, що входять в кола зв'язку. Вихідна плата містить ланцюги погоджені з навантаженням до СВ, який стимулює потужності транзисторів на виході. Причому, вихідні ланцюги налаштовувалися на отримання $P_{вих.макс}$ на частоті 500 МГц, вхідні – на максимальне узгодження $\Gamma_{вх.мін}$ на частоті 500 МГц. При налаштуванні також додалася рівність струмів транзисторів і мінімального $K_{СВН}$ на вході модуля. На рис. 4.13. приведений $K_{СВН}$ на вході підсилювача від частоти ($P_{над} = 0,5$ Вт).

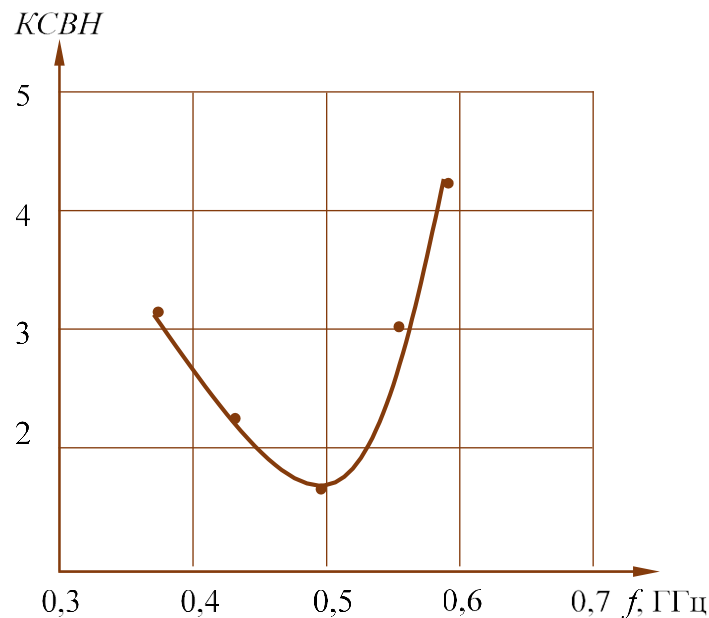


Рис. 4.13. $K_{СВН}$ на вході підсилювача від частоти $P_{над} = 0,5$ Вт

При $P_{вх} = 250$ мВт (одно плече модуля) на частоті 500 МГц підсилювальний каскад на виході має $P_{вих} = 1$ Вт, $K_p = 4$, ККД = 28%.

Експериментально досліджені помножувачі частоти високої кратності на ЛПД, які виконані на основі хвилеводно-коаксіальної конструкції (рис. 4.14) і (рис. 4.15). Особливістю помножувачів частоти на ЛПД є відносно слабка залежність коефіцієнта перетворення від кратності множення. Зміна коефіцієнта множення забезпечувалася зміною частоти вхідного сигналу [136]. При малій кратності множення помножувачі частоти на ЛПД не мають переваг в порівнянні з варакторними. Ці переваги стають очевидними при $nx10$.

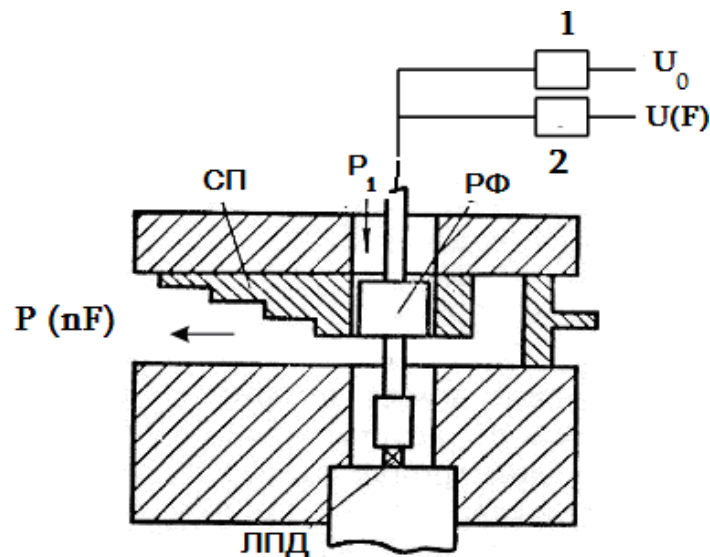


Рис. 4.14. Конструктивна схема побудови помножувача частоти високої кратності на ЛПД



Рис. 4.15. Зовнішній вигляд помножувача частоти високої кратності на ЛПД

Діод встановлений у кінці низькоомної коаксимальної лінії, що проходить через центр широкої стінки хвилеводу. Ця лінія служить для подання на діод постійного струму живлення і потужності вхідного сигналу P_1 . Узгодження низькоомного імпедансу діода з високоомним імпедансом хвилеводу забезпечується ступінчастим переходом (СП) і коаксимальним переходом, включеним послідовно з діодом. Режекторний (смуговий) фільтр (РФ) в ланцюзі живлення служить для розв'язки трактів вхідного і вихідного сигналів.

Постійний струм живлення і змінна напруга на частоті F підводиться до діода за допомогою провідника коаксимальної лінії і фільтрів живлення.

Узгодження з навантаженням і оптимізація коефіцієнта перетворення досягаються налаштуванням поршня в хвилеводі і регульованим положенням діода в хвилеводі.

На рис. 4.16 і 4.17 приведені, відповідно, амплітуда і частотна характеристика помножувача на ЛПД високої кратності.

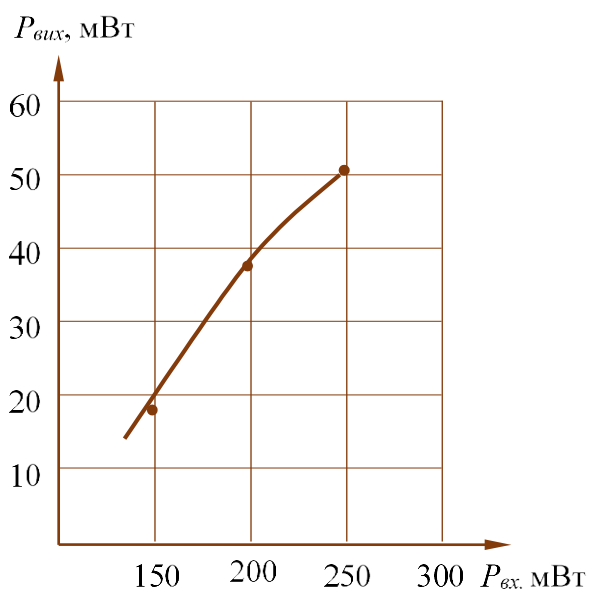


Рис. 4.16. Амплітудна характеристика помножувача на ЛПД с кратністю 10

При вхідній потужності помножувача 250 мВт потужність на виході складає 50 мВт. Рівень побічних складових нижче рівня несе не менше чим 22 дБ.

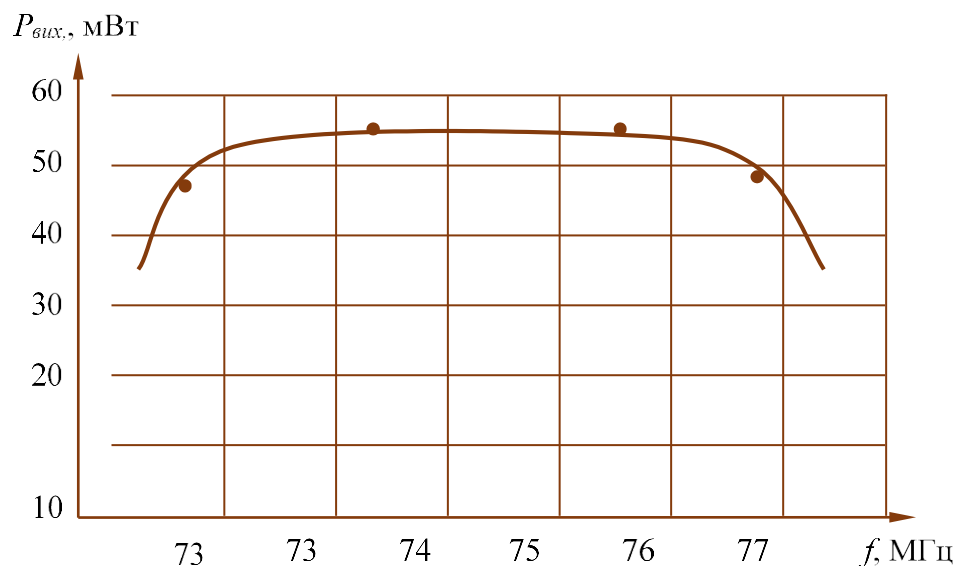


Рис.4.17. Амплітудно-частотна характеристика помножувача на ЛПД з кратністю 10

Загальний вигляд помножувальної і підсилювальної системи приведений на рис. 4.18.

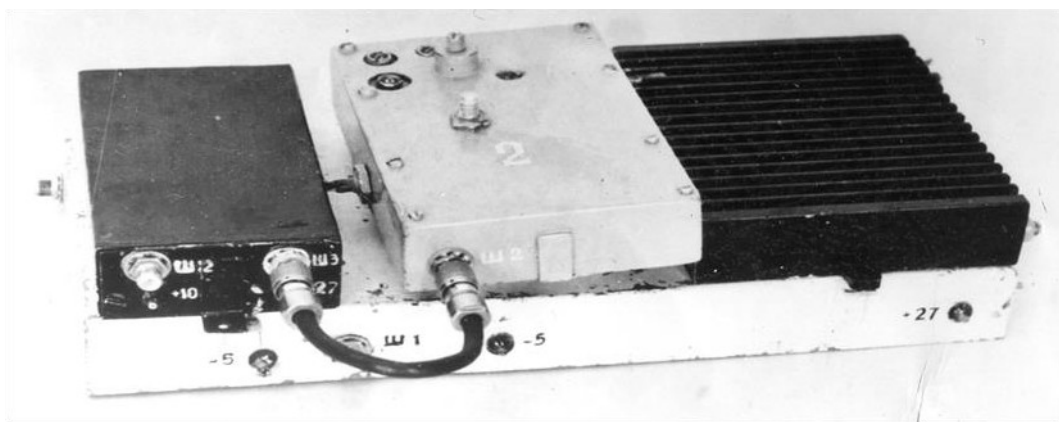


Рис. 4.18. Загальний вигляд помножувальної і підсилювальної системи

4.3. Дослідження джерела міліметрового діапазону довжин хвиль

Структурна схема розробленого джерела представлена на рис. 4.19, а загальний вигляд на рис. 4.20. У схемі представлено джерела з виходу кварцового генератора частотою 50 МГц поступає на підсилювально-

помножувальний каскад на транзисторах, на виході якого стоїть діод з накопиченням заряду Д-312.

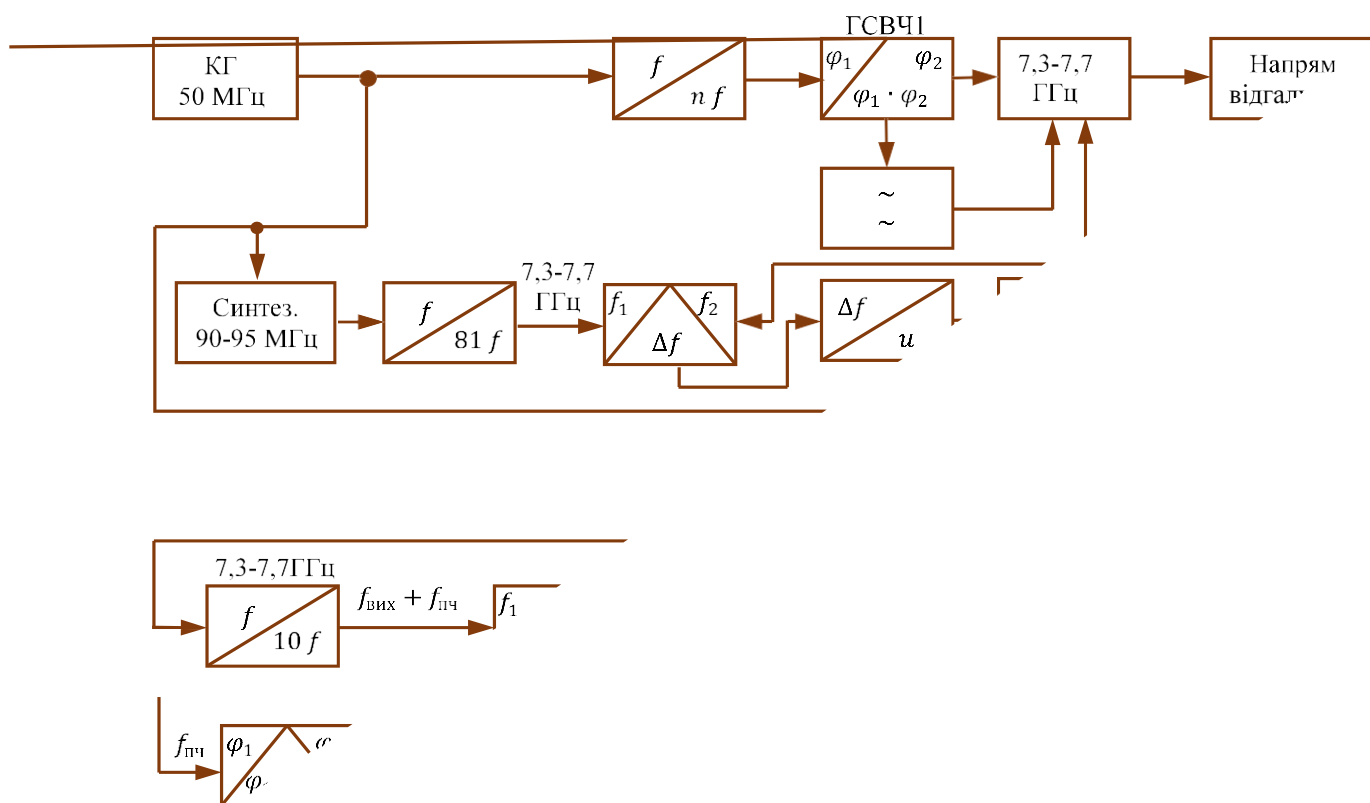


Рис. 4.19. Структурна схема генератора КВЧ діапазону 73...77 ГГц

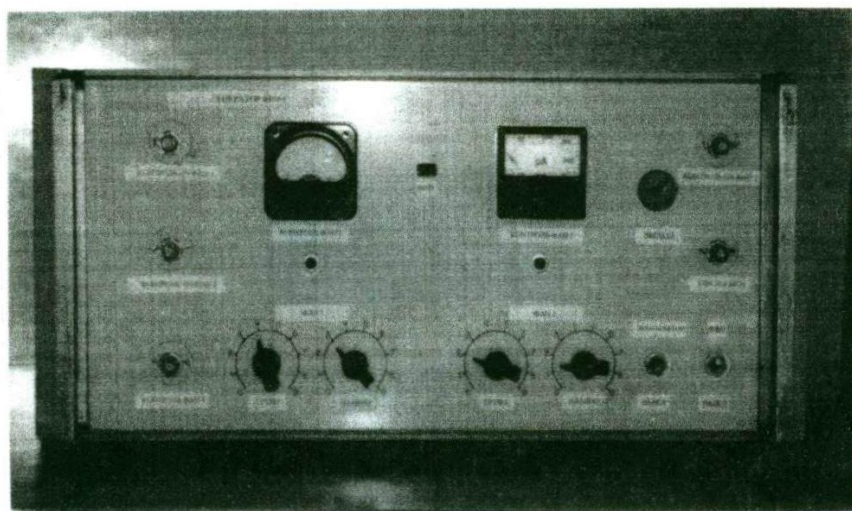


Рис. 4.20. Загальний вигляд генератора з вихідною частотою 73...77 ГГц

На виході діода (ДНЗ) формуються гармоніки в діапазоні частот 7,3...7,7 ГГц з дискретністю 0,1 ГГц. Цей сигнал поступає на перший вхід фазового детектора, а на другий вхід фазового детектора сигнал з ГСВЧ1. Через фільтр нижніх частот фазовий детектор підлаштовує ГСВЧ1 на одну з гармонік помножувача частоти. Грубе налаштування ГСВЧ1 з точністю 5 МГц робиться за допомогою ЦАП1, де код частоти перетворюється з двійково-десятькового в двійковий формат. Далі сигнал з ГСВЧ1 і помножувач 10 на ЛПД (рис. 4.14) подається на змішувач. На другий вхід змішувача подається сигнал з виходу генератора, що синхронізується, частотою 73...77 ГГц. На виході змішувача утворюється сигнал проміжної частоти $f_{np} = 80...100$ МГц.

Грубе налаштування ГСВЧ2 з точністю ± 10 МГц робиться за допомогою ЦАП2. Частота f_{np} , а також сигнал з синтезатора з частотою 80...100 МГц, які поступають на входи фазового детектора і через фільтр нижніх частот підлаштовує генератор ГСВЧ2 на потрібну гармоніку з помножувача на 10. Таким чином, дискретність перебудови частоти ГСВЧ2 визначатиметься дискретністю перебудови синтезатора 80...100 МГц і може бути доведена до 100 Гц. В якості генератора ГСВЧ1, що синхронізується, використана секція на діоді ЛПД (рис. 4. 21), а для перебудови частоти залізоіттрієвий резонатор.

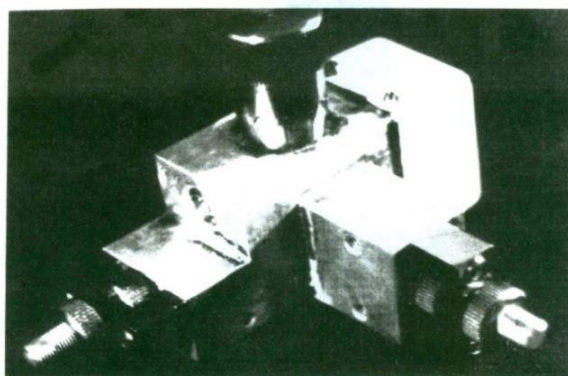


Рис. 4.21. Загальний вигляд генератора ГСВЧ1, що синхронізується, на частоту 7,3...7,7 ГГц

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження показали, що для обробки яблук інформаційним електромагнітним випромінюванням потрібні джерела з параметрами: частота 73...77 ГГц; вихідна потужність 750 мВт; відносна нестабільність частоти 10^{-7} ... 10^{-8} . Отримання такої потужності можливе на трьох діодах типу 2A762A шляхом підсумовування їх потужності на основі відкритого бочкоподібного резонатора [126]. Тому в якості генератора, що синхронізується, ГСВЧ2 було використано генератор на основі відкритого бочкоподібного резонатора. На рис. 4.22 показана конструкція трьохдіодного генератора на ЛПД з відкритим бочкоподібним резонатором.

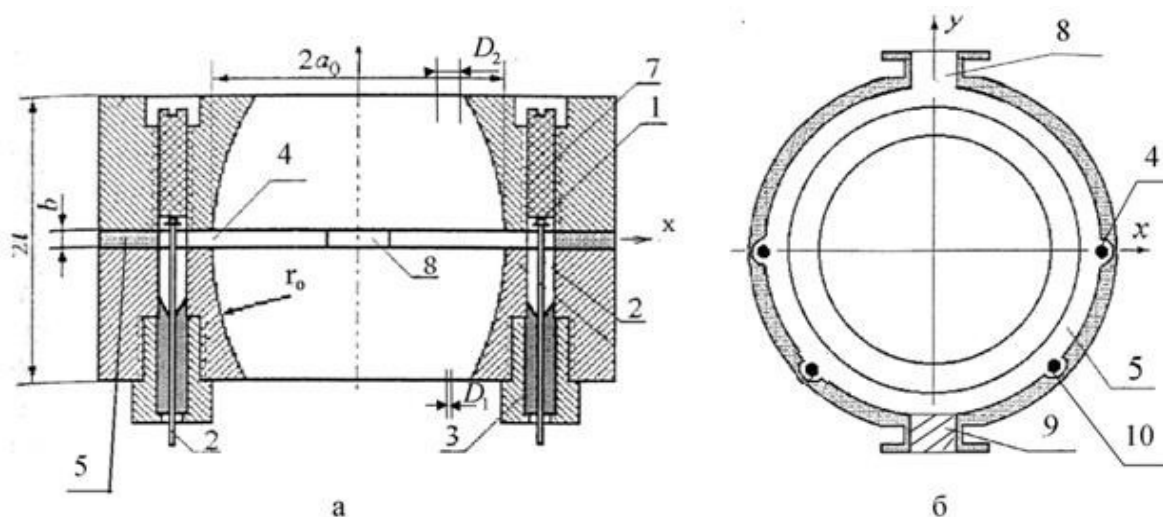


Рис. 4.22. Схема конструкції трьохдіодного синхронного генератора на частоті 73...77 ГГц.

Відкритий бочкоподібний резонатор з геометричними параметрами $a_0 = 20$ мм, $r_0 = 120$ мм, $L = 20$ мм виготовлений з латуні і складається з двох половин. З'ємне кільце 5 затиснуто між ними. Зміни розмірів кільця дозволяють змінювати ширину і висоту хвильоводного поглиблення в центральній площині ОБР. Виведення СВЧ-енергії з резонатора здійснюється за допомогою прямокутної щілини зв'язку 8 перерізом $3,6 \times 0,18$ мм.

Схема конструкції трьохдіодного синхронного генератора на частоті 73...77 ГГц. Струм живлення до кожного діода підводився за допомогою низькоомного коаксиала 6. Завдяки такій конструкції генератора вдалося здійснити роздільне живлення кожного діода і рівномірно розподілити теплове навантаження. У конструкції є декілька відрізків коаксіальних ліній (2), пов'язаних з поглибленням в резонаторі (4).

У торці цих відрізків включаються діоди 2A762A (1). Відрізок коаксиала має поглинач (3), необхідний для усунення паразитних коливань. Узгодження імпедансу діодів з імпедансом коливальної системи ОБР здійснюється, в діапазоні частот 73...77 ГГц, шляхом переміщення діода мікрогвинтом (7), за рахунок зміни фази коефіцієнта стоячої хвилі в місці включення діодів. До діодів подаються струми живлення 12 В.

Струми живлення створюють негативний опір в робочій точці вольт-амперної характеристики діода на робочій частоті 73...77 ГГц.

Перебудова частоти генератора в діапазоні 73...77 ГГц. Перебудова частоти генератора, що синхронізується, в діапазоні 73...77 ГГц здійснюється варікапом (10) типу 3A617 [131].

Регулювання потужності на виході генератора, що синхронізується, здійснюється зміною струму живлення на одному з діодів. У конструкції шестидіодного генератора були використані елементи з розмірами (рис. 4.5) $a_0 = 20$ мм, $r_0 = 120$ мм, $L = 20$ мм; радіус внутрішньої каустики $r_m = 9$ мм; координати зовнішньої каустики $Z_{q=1} = 5,7$ мм; $D_1 = 1$ мм; $D_2 = 1$ мм.

Структурна схема виміру основних точнісних характеристик (дискретність перебудови, нестабільність частоти, міра пригнічення дискретних складових в спектрі вихідного сигналу) представлена на рис. 4.23, а випробувального стенду на рис. 4.24.

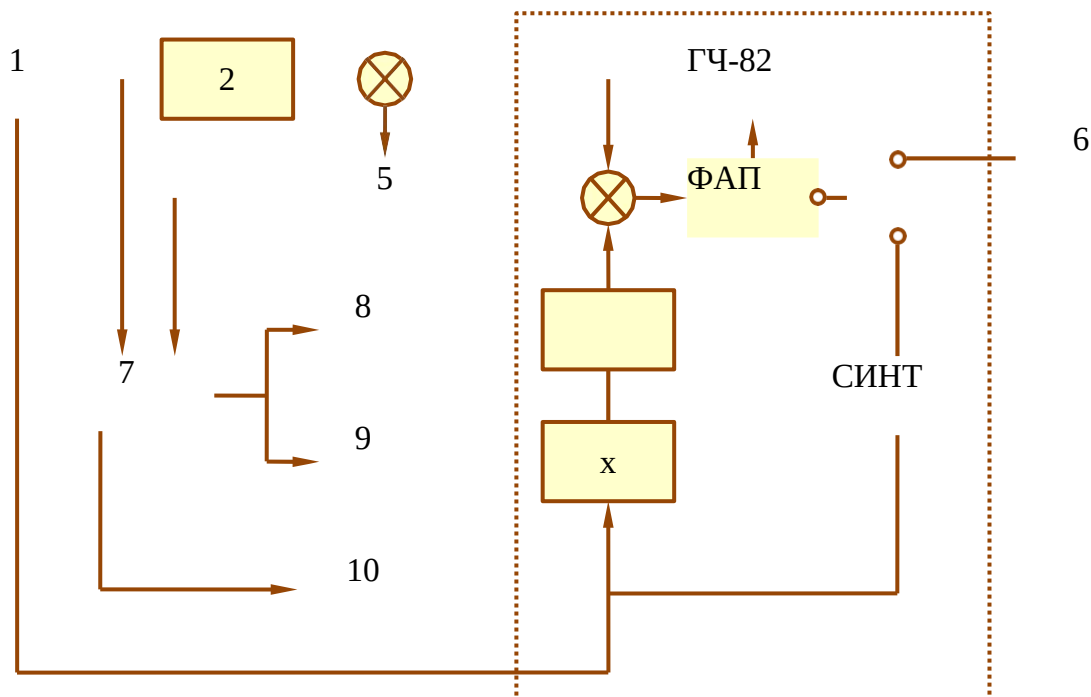


Рис. 4.23. Структурна схема стенду для дослідження ГЛПД з суматором на основі ОБР: 1 – високостабільний генератор 10 МГц (еталон); 2 – генератор; 3 – змішувач-помножувач; 4 – опорний генератор; 5 – УПЧ; 6 – синтезатор 4-31; 7 – компаратор фазовий Ч7-42; 8, 9 – аналізатори спектру СЧ-48 і СЧ-29; 10 – ЕСЧ з ПЕВМ; 11 – вимірник потужності.

Навантажена добротність такого коливання в ОБР, виміряна частотним методом на частоті 75 ГГц склала 2000 одиниць. На рис. 4.25 приведена експериментальна залежність складання потужностей при кількості діодів $N = 3$.

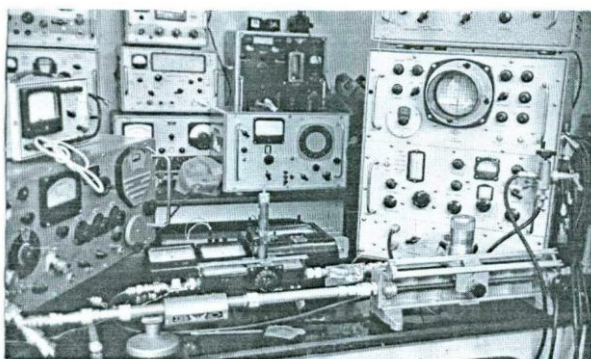


Рис. 4.24. Зовнішній вигляд стенду для дослідження параметрів генератора КВЧ діапазону

Із залежності (рис. 4.25) видно відхилення сумарної потужності від лінійного закону і зростання втрат на складання зі збільшенням N . У даній конструкції трьохдіодного суматора потужності на частоті 75 ГГц отримана потужність 750 мВт при ККД підсумовування 80%.

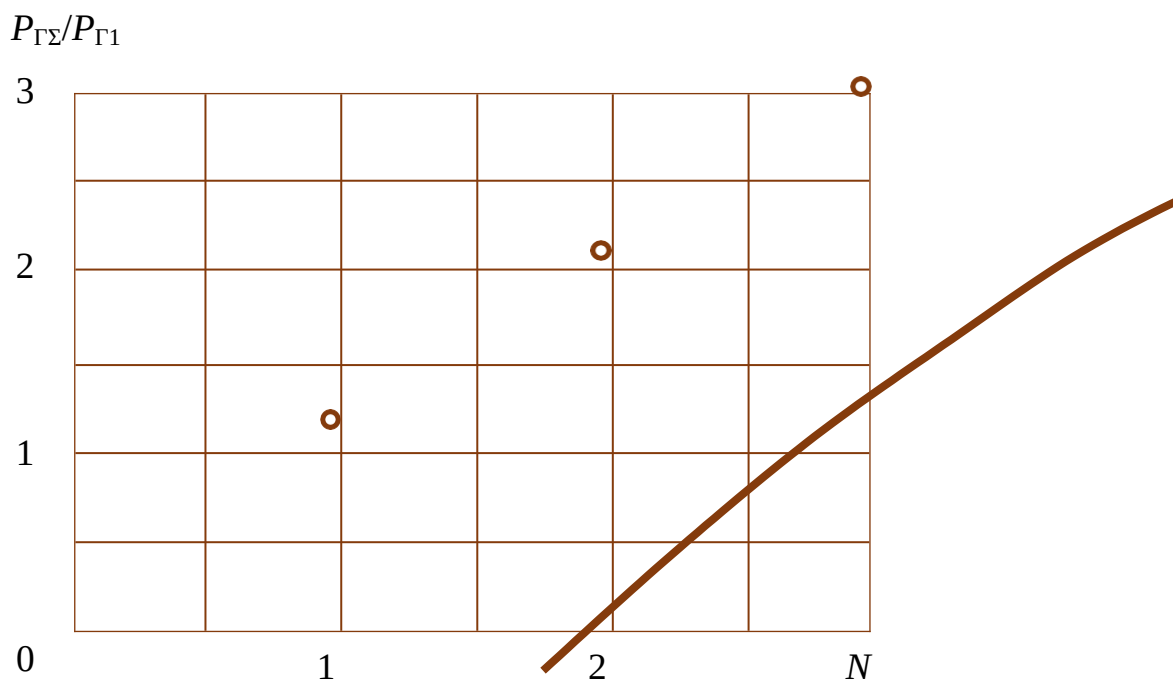


Рис. 4.25. Експериментальна характеристика складання потужностей ЛПД від числа діодів $N = 3$

Результати вимірів відносної нестабільності частоти трьохдіодного на ЛПД генератора представлені на рис. 4.26.

Як впливає з отриманих результатів (рис. 4.26), короткочасна нестабільність частоти генератора складає 10^{-8} за 10^{-3} с, а міра пригнічення дискретних складових в спектрі вихідного сигналу складає 48 дБ. Експериментальна перевірка електронної перебудови частоти генерації приведена на рис. 4.27.

Залежність електронної переналаштування частоти генератора показує (рис. 4.27), що крутизна електронного переналаштування складає 600 МГц/В для діапазону частот 73...77 ГГц.

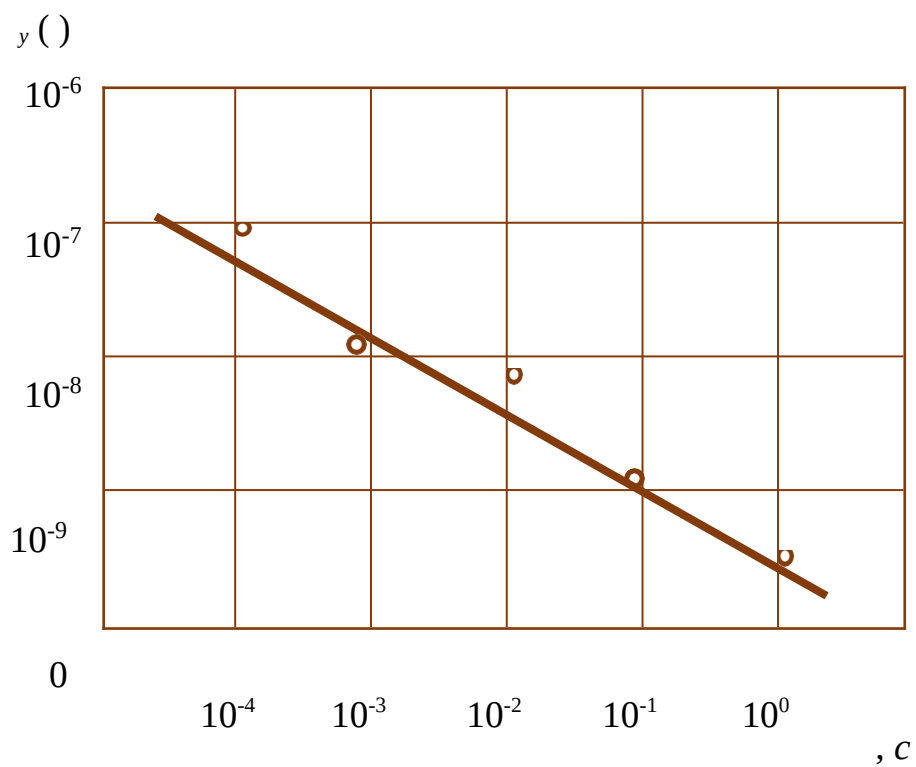


Рис. 4.26. Залежність відносної нестабільності частоти трьох-діодного на ЛПД генератора від часу виміру

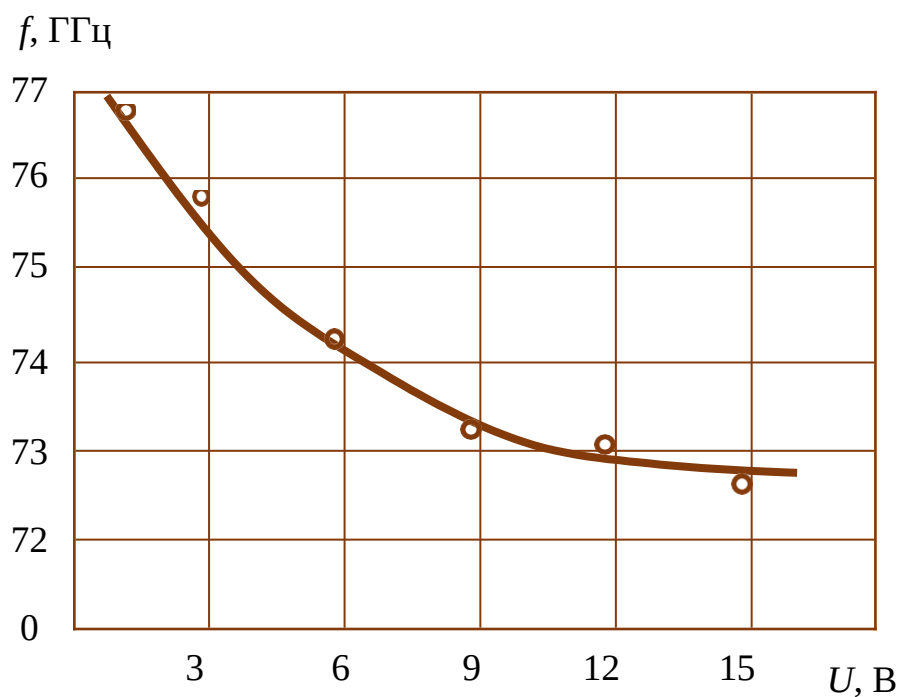


Рис. 4.27. Залежність електронної перебудови частоти генератора від величини напруги на варікапі

Експериментальні дослідження з генератором, що синхронізується, в системі ФАПЧ показали, що потужність на виході складає 750 мВт, а відносна нестабільність частоти знаходиться в межі 10^{-8} при $t_u = 10^{-3}$ с.

Виміри частотних флуктуацій вихідних сигналів зводиться до перетворення частотних флуктуацій в амплітудні, які потім вимірюються.

Структурна схема вимірів приведена на рис. 4.28, а стенд на рис. 4.29. Виміри здійснюються за двоканальною схемою з перенесенням на проміжну частоту. Уся схема представляє собою частотний дискримінаціатор, вихідним елементом якого є фазовий детектор. Для проведення вимірів необхідно знати крутизну перетворення частотних флуктуацій в амплітудні. Для цього використовується модулятор, що створює фазову модуляцію досліджуваного сигналу.

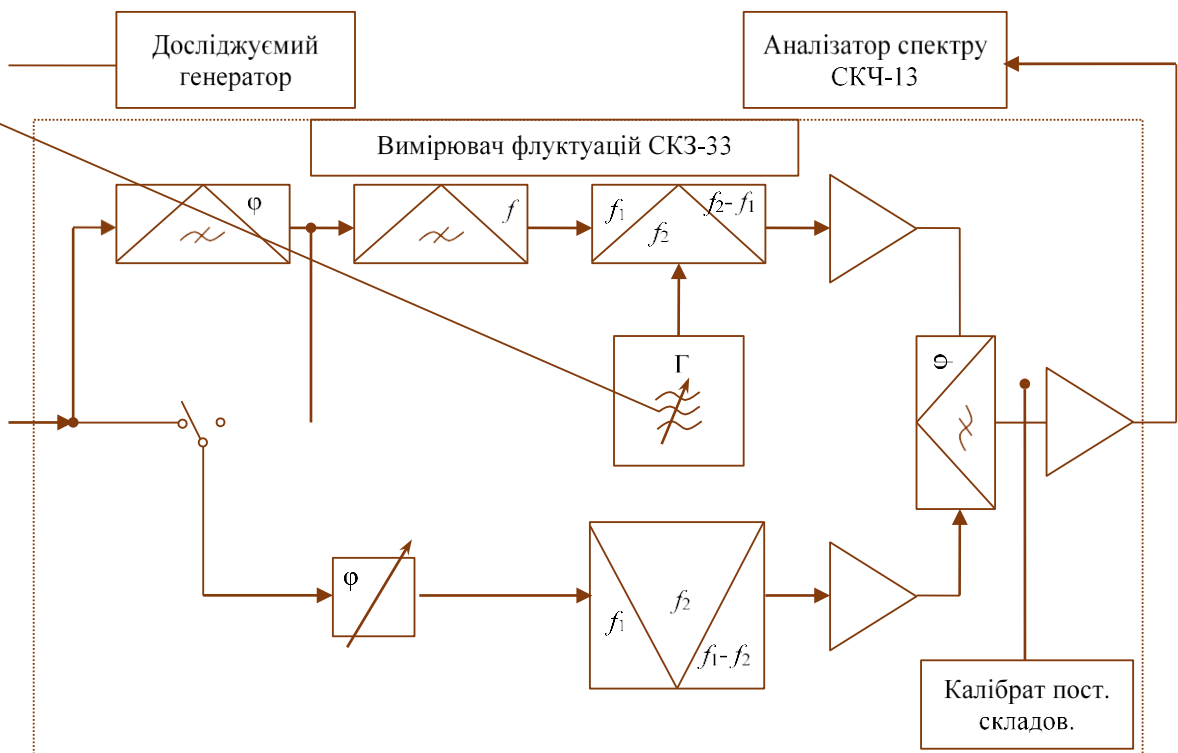


Рис. 4.28. Структурна схема виміру частотних флуктуацій

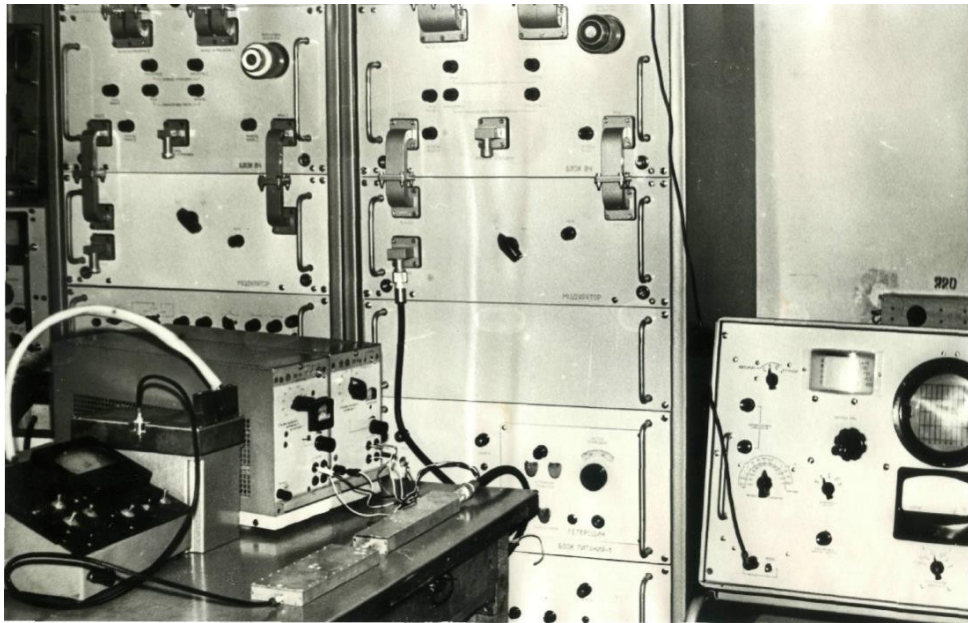


Рис. 4.29. Загальний вигляд стенду для виміру частоти флуктуацій генератора

Індекс фазової модуляції визначається за допомогою фазового детектора проміжної частоти і в процесі виміру підтримується незмінним. Напряга на виході частотного дискримінатора, основним елементом якого є балансний міст (рис. 4.12), за рахунок частотних флуктуацій $f_{\text{еф}}$ буде рівне $U_{\text{еф}} S f_{\text{еф}}$ на частоті аналізу $F_{\text{д}}$, а напряга, обумовлена модуляцією Δf_m , рівна $U_{\sim m} S f_m$ на частоті модуляції F_k .

Звідси
$$\frac{U_{\sim \text{еф}}}{U_{\sim m}} = \frac{f_{\text{еф}}}{f_m} \quad (4.5)$$

Якщо потім виміряти індекс штучної фазової модуляції $m_{\text{ФМ}}$, то буде відома девіація частоти, обумовлена штучною модуляцією

$$m_{\text{ФМ}} = \frac{\Delta f_m}{F_k} \quad (4.6)$$

Вираз для визначення вкладу частотних флуктуацій в спектр досліджуваного сигналу матиме вигляд:

$$\frac{P_{ш}}{P_{сч}} = \frac{f^2}{4F^2} + \frac{f^2}{2F^2} \frac{\Delta f_{\text{эфф}}}{f} + \frac{m^2 U_{\sim \text{эфф.}} F_{\kappa}^2}{2 U_{\sim m} F^2} \quad (4.7)$$

Як показано в описаних вище методиках виміру амплітудних і частотних флуктуацій, вони, зрештою, здійснюються низькочастотним аналізатором спектру методом послідовного аналізу. При цьому вимір кожною спектральною складовою спектру флуктуацій необхідно робити впродовж часу, визначального заданою точністю виміру. На рис. 4.30 приведені залежності спектральної щільності фазових шумів вихідного сигналу генератора.

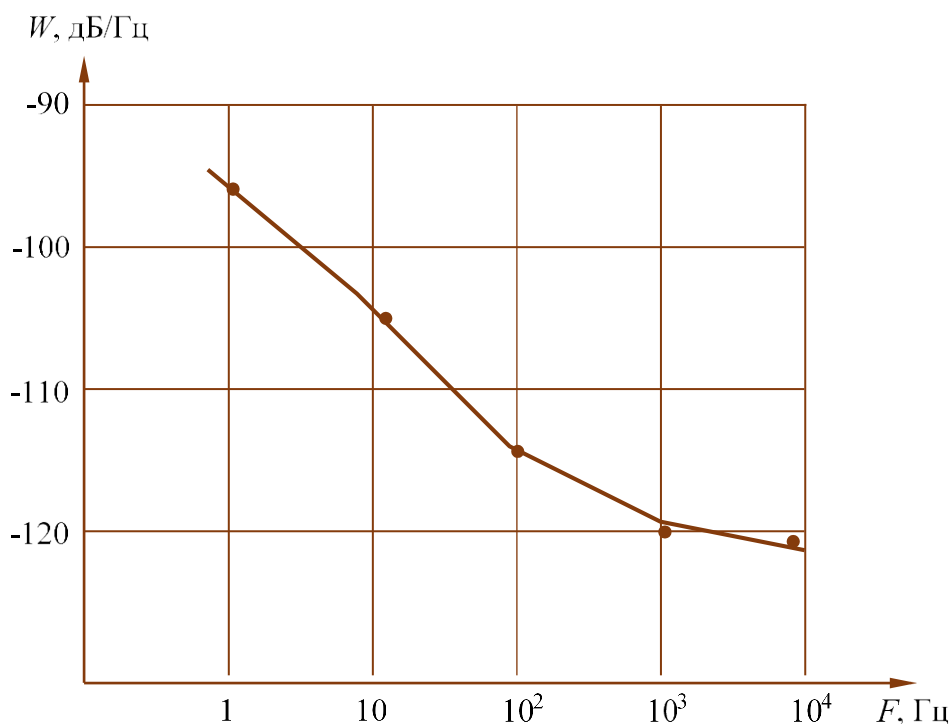


Рис. 4.30. Графік залежності спектральної щільності фазових флуктуацій вихідного сигналу генератора з системою ФАПЧ

Як впливає з представлених результатів спектральна потужність фазових флуктуацій генератора (рис.4.30) не перевищує величини -120 дБ/Гц на частотах до 10 кГц.

4.4. Експериментальні лабораторні дослідження по знищенню грибкових мікроорганізмів з поверхні яблук електромагнітним випромінюванням

На основі аналізу літературних джерел [1...6] встановлено, що на поверхні яблук можуть знаходитися численні мікроорганізми, які приводять до псування яблук в процесі їх тривалого зберігання. До основних хвороб, що призводять до псування яблук відносяться [4...6]:

- грибкового походження: альтернаріоз (макроспоріоз), чорна гнилизна (диплодіоз), бура гнилизна (фітостороз), біла гнилизна (склеротиніоз), сіра гнилизна (ботритіоз), рожева гнилизна (фузаріоз) та ін.;

- бактеріального (сапрофітного) походження: мокра бактерійна гнилизна, чорна бактеріальна плямистість;

- дріжджові клітини.

Для визначення кількісного і якісного складу мікроорганізмів були використані уніфіковані методики [137, 138]. У лабораторних умовах визначалося число сапрофітних бактерій, плісневих грибів і дріжджових клітин на поверхні яблук після їх опромінення. Результати мікробіологічного аналізу були використані для проведення багатофакторного експерименту. Для отримання залежності, що зв'язує кількість мікроорганізмів на поверхні яблук з параметрами ЕМВ, за наявності адитивної перешкоди випадкового характеру, застосовне повнофакторне планування другого порядку. Значення чинників і їх інтервали варіювання приведені в таблицю. 4.1.

Значення факторів в експерименті

Інтервал варіювання і рівень чинників	Частота, ГГц	Потужність джерела, мВт	Експозиція, с
	X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень, $X_i = 0$	75	700	70
Інтервал варіювання, λ_i	2	50	10
Верхній рівень, $X_i = +1$	77	750	80
Нижній рівень, $X_j = -1$	73	650	60

Для побудови плану другого порядку використовуються дані приведені в табл. 4.2 [138].

Таблиця 4.2

Дані для побудови плану другого порядку

Число факторів, K	Число точок ядра	Число зіркових точок, N_a	Число нульових точок, N_0	Зіркові точки, α	Число дослідів N
3	8	6	6	1,682	20

Для експерименту відбирали яблука діаметром 50 мм сорту «Голден» з 4-х контейнерів по 1 кг. У досліджуваних партіях яблук були виділені наступні мікроорганізми: грибкового походження; бактерійного (сапрофітного) походження; дріжджові клітини. Обробку яблук електромагнітним випромінюванням проводили з двох сторін.

При використанні стандартної методики побудови плану другого порядку складені матриці: планування експерименту, розрахунку коефіцієнтів регресії,

визначення дисперсії адекватності і результатів обробки даних, які приведені в додатку А. Після проведення вимірів і розрахунків отримано рівняння регресії, пов'язане зі знищенням мікроорганізмів на поверхні яблук ЕМВ КВЧ діапазону [111]:

$$Y = 307 - 300X_1 - 239X_2 - 249X_3 - 150X_1X_2 - 200X_1X_3 - 100X_2X_3 - 800X_1^2 - 100X_2^2 - 112X_3^2, \quad (4.8)$$

де Y – вихідний параметр (кількість мікроорганізмів на поверхні яблук); X_1 – частота електромагнітного випромінювання; X_2 – потужність джерела електромагнітного випромінювання; X_3 – час опромінення мікроорганізмів на поверхні яблук.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії проводилася при рівні значущості $\alpha = 0,05$ за критерієм Стьюдента [138]. З урахуванням значущості коефіцієнтів, рівняння регресії для пригноблення мікроорганізмів на поверхні яблук набуває вигляду (4.8). На підставі перевірки цього рівняння на адекватність за критерієм Фишера [138] зроблений висновок (Додаток А), що рівняння адекватно описує реальний процес, і, отже, дозволяє оцінити характер впливу кожного з 3 факторів на функції відгуку. Крім того, стало можливим практичне використання отриманої моделі для прогнозування значення вихідного сигналу в області варіювання параметрів X_i .

Для знаходження оптимальних параметрів процесу вирішена система рівнянь, отриманих прирівнюванням до нуля значень градієнтів компонентів, розрахованих за виразом:

$$\frac{dY}{dX_i} = b_i - 2b_{ii}X_i - \sum_{j=1}^n b_{ij}X_j, \quad (4.9)$$

де X_i, X_j – кодування значення факторів, по якому береться похідна;

b_i, b_{ii}, b_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії.

Для виразу (4.4) отримана наступна система рівнянь:

$$\begin{aligned}
 \frac{dY}{dX_1} & 300 - 150X_2 - 200X_3 - 1600X_1 = 0; \\
 \frac{dY}{dX_2} & 239 - 150X_1 - 100X_3 - 200X_2 = 0; \\
 \frac{dY}{dX_3} & 249 - 200X_1 - 100X_2 - 224X_3 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Рішення системи рівнянь (4.10) дає наступні значення факторів в оптимальній точці: $X_{1оп} = 0,4$; $X_{2оп} = 1,0$; $X_{3оп} = 1,0$, що відповідає таким значенням натуральних параметрів: частота ЕМП $75,8 \pm 0,1$ ГГц, потужність джерела - $650 \pm 0,5$ мВт, час дії на мікроорганізми 60 ± 5 с.

Застосування ЕМП з оптимальними параметрами дозволило майже повністю знищити мікроорганізми на поверхні яблук в лабораторних умовах.

Рішення системи рівнянь (4.10) дає наступні значення факторів в оптимальній точці: $X_{1оп} = 0,4$; $X_{2оп} = 1,0$; $X_{3оп} = 1,0$, що відповідає таким значенням натуральних параметрів: частота ЕМП $75,8 \pm 0,1$ ГГц, потужність – $650 \pm 0,5$ мВт, час впливу на мікроорганізми 60 ± 5 с.

Застосування ЕМП з оптимальними параметрами дозволить повністю знищити мікроорганізми на поверхні яблук в лабораторних умовах.

4.5. Виробничі випробування електронної системи по знищенню мікроорганізмів на поверхні яблук електромагнітним випромінюванням

Для виробничих досліджень по обробці ЕМ випромінюванням яблук сорту «Голден» була розроблена пересувна установка, структурна схема якої приведена на рис. 4.31, а загальний вигляд на рис. 4.32.

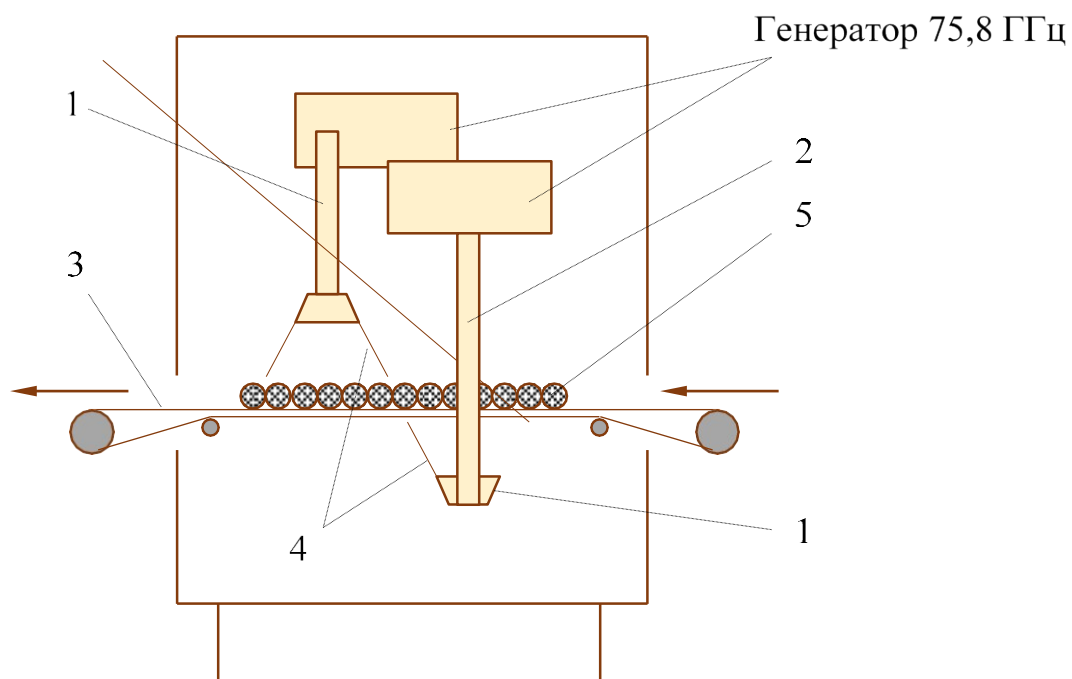


Рис. 4.31. Схема установки для обробки яблук електромагнітним випромінюванням: 1 – H -секторіальний рупор; 2 – хвилевід; 3 – стрічковий транспортер; 4 – розподіл ЕМП при опроміненні яблук; 5 – яблука.

В установці електромагнітне поле (4) для обробки яблук створюється двома H -секторіальними випромінювачами (1). Для стрічкового транспортера використовується фторопласт-4с характеристиками: відносна діелектрична проникність 1,9; тангенс кута діелектричних втрат на частоті 75,8 ГГц $(1...2) \times 10^{-4}$.

Технічні характеристики установки для обробки яблук:

- робоча частота 75,8 ГГц;
- короткочасна відносна нестабільність частоти 10^{-8} ;
- вихідна потужність 650 мВт;
- крутизна електронної перебудови 600 МГц/В.



Рис. 4.32. Загальний вигляд пересувної установки для обробки яблук ЕМВ

Для тривалого зберігання в 2017 р. були вибрані яблука сорту «Голден» [139]. У експериментах визначалося число сапрофітних бактерій, плісневих грибів і дріжджових клітин на поверхні плодів. Характеристики мікробіологічного аналізу за визначенням сапрофітних бактерій і плісневих грибів є узагальненими. На поверхні яблук можуть існувати одночасно збудники декількох видів фітопатологічних хвороб грибкового і бактерійного походження. Результати мікробіологічного аналізу на поверхні яблук до і після електромагнітної обробки приведені в табл. 4.3.

У таблиці 4.4 приведені дані про результати зберігання яблук після обробки їх електромагнітним випромінюванням. Проведені випробування показують, що обробка яблук перед зберіганням ЕМВ з параметрами (табл. 4.3): частота 75,8 ГГц; потужність джерела випромінювання 650 мВт; час експозиції 60с призводить до знищення більшості мікроорганізмів на поверхні яблук. Температура довкілля при зберіганні яблук не перевищувала 20°C. У контрольних зразках яблук (без обробки ЕМВ) табл.4.4 збереження плодів через 60 днів склало 56%. У досвідченій партії (опромінені яблука перед закладкою на зберігання) через 60,80 и100 днів збереження плодів склало 100% Збереження

плодів дослідної партії через 120 днів показала, що вихід стандартної продукції зменшився на 22%.

Таблиця 4.3

Чисельність мікроорганізмів на поверхні яблук перед закладкою їх на зберігання
(число клітин на 1 г яблук)

Варіанти	Сапрофітні бактерії				Середні повторності
	1	2	3	4	
контроль	$2,3 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
дослід	4	2	2	0	2,0
Плісневі гриби					
контроль	5	4	5	2	4,0
дослід	0	0	0	0	0,0
Дріжджові клітини					
контроль	53	54	52	53	53,0
дослід	0	0	0	0	0,0

Таблиця 4.4

Результати зберігання яблук після електромагнітної обробки

Варіант Досліди	Дослідні партії, кг				Загальна кількість, кг.	Строк зберігання днів	Вихід стандартної продукції, %
	1	2	3	4			
контроль	250	250	250	250	1000	60	56
Дослід №1	250	250	250	250	1000	60	100
Дослід №2	250	250	250	250	1000	80	100
Дослід №3	250	250	250	250	1000	100	100
Дослід №4	250	250	250	250	1000	120	92

Зменшення стандартної продукції на 22% пов'язане з активізацією інтенсивності дихання яблук, тобто за рахунок окислювального розпаду

органічних речовин і утворення активних метаболітів. Швидкість дихального газообміну яблук з довкіллям залежить від виду і стану плодів, характеру і інтенсивності процесів життєдіяльності клітин, температури, газопроникності шкірки і пограничного шару газів, парціального тиску компонентів газового середовища в тканинах і середовища. Результати мікробіологічного аналізу через 120 днів (табл. 4.5) підтверджують той факт, що загнивання плодів яблунь відбувається за рахунок активізації процесів дихання.

Таблиця 4.5

Чисельність мікроорганізмів на поверхні яблук після зберігання

Варіант дослідження	Сапрофітні бактерії, число клітин	Плісневі гриби, число клітин	Дріжджові клітини, число клітин	Термін зберігання, днів
Контроль	2,6 10 ³	8	160	60
Дослід	20	2	10	120

Для того, щоб визначити можливі відхилення в хімічному складі яблук, що пройшли обробку електромагнітним випромінюванням, були проведені аналізи, загальноприйняті на консервних підприємствах. Результати цих аналізів приведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Хімічний склад яблук до обробки і після обробки ЕМВ в процесі тривалого зберігання

Показники хімічного складу	контроль	Досвід після обробки ЕМВ	Дослід після зберігання
Суша речовина, %	16,3	16,3	17,1
Загальний цукор, %	11,5	11,7	12,1
Аскорбінова кислота, мг/100 г	10	9,8	8,7
Кислотність, %	0,4	0,4	0,28

Оцінюючи результати аналізу, приведені в таблиці 4.6, можна зробити певний висновок: обробка яблук перед закладкою на зберігання електромагнітним випромінюванням з оптимальними біотропними параметрами

не змінює якості плодів і не впливає на їх хімічний склад. Економічна ефективність від застосування електромагнітної технології для тривалого зберігання яблук складе біля 10000 грн. на 1 т продукції.

Висновки по розділу

1. Для обробки яблук електромагнітним випромінюванням перед їх зберіганням слід використати джерело КВЧ випромінювання з параметрами:

- діапазон зміни частоти 73 ... 77 ГГц;
- вихідна потужність 650 ... 750 мВт;
- пригнічення побічних гармонік в спектрі вихідного сигналу не менше 48 дБ;
- короткочасна відносна нестабільність частоти генератора 10^{-8} за 10^{-3} с.
- електронна перебудова частоти 600 МГц/В.

2. Встановлено, що для тривалого зберігання яблук їх слід опромінювати електромагнітним випромінюванням з параметрами: частота $75,8 \pm 0,1$ ГГц; потужність на поверхні яблук $650 \pm 0,5$ мВт; час експозиції $60 \pm 5,0$ с., температура довкілля $18 \dots 20^\circ\text{C}$.

3. Застосування ЕМВ міліметрового діапазону для обробки яблук дозволить знищити мікроорганізми на їх поверхні і збільшити термін зберігання яблук до 120 діб і навіть більше при температурі $18 \dots 20^\circ\text{C}$ в умовах зовнішнього середовища.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень створена інформаційна електромагнітна технологія і електронна система електромагнітного випромінювання в міліметровому діапазоні довжин хвиль для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук з метою збільшення термінів їх зберігання в умовах зовнішнього середовища

1. На підставі узагальнення фактичного матеріалу вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій витікає, що для збільшення термінів зберігання яблук в умовах зовнішнього середовища необхідно знищувати мікроорганізми на поверхні яблук інформаційними ЕМП мм діапазону довжин хвиль.

2. Для дослідження процесу взаємодії монохроматичних електромагнітних хвиль з мікроорганізмами на поверхні яблук слід використати модель у вигляді кулі покритого тонким сферичним шаром, який моделює шар мікроорганізмів.

3. Для руйнування мембрани патогенних мікроорганізмів на поверхні яблук потрібний потенціал на мембрані не менше 185 мВ, наведений зовнішнім електромагнітним джерелом потужністю 650...750 мВт.

4. Встановлено, що для вирішення поставленого завдання потрібне створення генератора КВЧ коливань з нестабільністю частоти 10^{-8} ... 10^{-7} на основі двохкільцевого фазового автопідстроювання частоти потужного генератора, що синхронізується, частотою 73...77 ГГц по кварцовому генератору, який працює на частоті 50 МГц.

5. Для отримання потужності на виході генератора 650...750 мВт необхідно використати суматор потужності з трьох лавино-пролітних діодах (2A762A) на основі відкритого бочкоподібного резонатора з геометричними: $a_0 = 20$ мм; $r_0 = 120$ мм; $L = 20$ мм; $D_1 = 1$ мм; $D_2 = 1$ мм.

6. Для переналаштування частоти у відкритому бочкоподібному резонаторі слід використати варикап типу 3А617 з крутизною переналаштування 600 МГц/В, а величину потужності регулювати струмом на одному з діодів.

7. У установці для обробки яблук ЕМВ слід використати стрічковий транспортер з фторопласта-4 з характеристиками: відносна діелектрична проникність 1,9; тангенс кута діелектричних втрат на частоті 75,8 ГГц $(1...2) \times 10^{-4}$.

8. Обробка яблук перед зберіганням електромагнітним випромінюванням з параметрами: робоча частота 75,8 ГГц; короткочасна відносна нестабільність частоти 10^{-8} ; вихідна потужність 650 мВт; експозиція 60 с. дозволяє зберегти яблука протягом 120 діб в умовах зовнішнього середовища при температурі 18... 20°C. Економічна ефективність від застосування електромагнітної технології для тривалого зберігання яблук скласти біля 10000 грн. на 1 т продукції

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хохряков М. К. Определитель болезней сельскохозяйственных культур / М. К. Хохряков, В. И. Потлайчук, А. Я. Семёнов. – Л.: Колос, Лен. отд., 1984. – 304 с.
2. Гудковский В. А. болезни плодов в период хранения и меры борьбы с ними / В. А. Гудковский, Т. И. Новобранова. – Алма-Ата, 1979. – 46 с.
3. Каширская Н. Я. Болезни семечковых культур / Н. Я. Каширская. – Мичуринск, 2006. – 164 с.
4. Федюшко Ю. М. Анализ технологии хранения фруктоплодов / Ю. М. Федюшко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2016. – Вип. 175. – С. 160 – 162.
5. Полегаев В. И. Хранение плодов и овощей / В. И. Полегаев. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 256 с.
6. Дементьева М. И. Болезни плодов, овощей и картофеля при хранении / М. И. Дементьева, М. И. Выгонский. – М.: ВО «Агропромиздат», 1988. – 231 с.
7. Мельник А. В. Сохраняемость яблок, обработанных хлористым кальцием после уборки / А. В. Мельник, Г. А. Алексеенко // Уманский СХИ. – Умань, 1991. – 7 с.
8. Гудковский В. А. Эффективность модифицированной атмосферы и ингибитора биосинтеза этилена для хранения плодов, ягод и овощей / В. А. Гудковский, Л. В. Кожина, А. Е. Балакирев // Вестник МичГАУ. – 2009. – №1. – С. 53 – 56.
9. Моисеева Н. А. Рекомендуемые режимы и продолжительность холодильного хранения некоторых плодов и овощей / Н. А. Моисеева, И. Л. Волкинд // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2007. – №3. – С. 50.
10. Поморцева Т. И. Технология хранения и переработки плодоовощной. – М.: Издательский центр, 2003. – 136 с.
11. Сизенко Е. И. Проблемы хранения продукции АПК / Е. И. Сизенко //

Пищевая промышленность. – 2004. – №6. – С. 9 – 11.

12. Скорикова Ю. Г. Хранение овощей и плодов до переработки / Ю. Г. Скорикова. – М.: Лёгкая промышленность, 1982. – 200 с.

13. Хранение плодов / [пер. с нем. И. М. Спичкина, под ред. Ульянова А. М.]. – М.: Колос, 1984. – 367 с.

14. Неменуцкая Л. А. Современные технологии хранения и переработки плодовоовощной продукции: науч. аналит. обзор / Л. А. Неменуцкая, Н. М. Степанищева, Д. М. Соломатин. – М.: ФГНУ «Росинформагротекс», 2009. – 172 с.

15. Гудковский В. А. Рекомендации по длительному хранению яблок и груш в обычной и контролируемой атмосфере / В. А. Гудковский. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1977. – 94 с.

16. Гудковский В. А. Длительное хранение плодов / В. А. Гудковский. – Алма-Ата.: «Кайнар», 1978. – 152 с.

17. Игнатъев Б. Д. Длительное хранение плодов / Б. Д. Игнатъев, Е. Ф. Демьянец, В. М. Найченко. – Киев.: Урожай, 1982. – 160 с.

18. Криворот А. М. Хранение плодов: опыт и перспективы / А. М. Криворот. – Мн.: Полибиг, 2001. – 215 с.

19. Фёдоров М. А. Промышленное хранение плодов / М. А. Фёдоров. – М.: Колос, 1981. – 183 с.

20. Франчук Е. П. Товарное качество плодов / Е. П. Франчук. – М.: Агропромиздат, 1986. – 136 с.

21. Buwesh R. Influence of carbon dioxide on postharvest ripening and deterioration of tomatoes / R. Buwesh // J. Amer. Hort. Sci. – 1979. – 104/4. – p. 545–547.

22. Denis C. Controlled atmosphere storage of tomatoes / C. Denis // Acta Horticultural. – 1979. – vol. 93. – p. 75 – 83.

23. Балакирев А. Е. Разработка оптимальных условий хранения плодов яблони в обычной и регулируемой атмосфере: Дис. канд. с.-х. наук: 06.01.05,05.18.01 / А. Е. Балакирев. – Мичуринск, 2003. – 143 с.

24. Гудковский В. А. Промышленный опыт хранения фруктов в регулируемой газовой среде / В. А. Гудковский, В. Я. Семашко. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1977. – 96 с.

25. Коробкина З. В. Прогрессивные методы хранения плодов и овощей / З. В. Коробкина. – Киев: Урожай, 1989. – 168 с.

26. Назаров Ю. Б. Влияние предуборочных и послеуборочных обработок агрохимикатами на снижение потерь при производстве и хранении плодов яблони: Дис. канд. с.-х. наук: 06.01.05,05.18.01 / Ю. Б. Назаров. – Мичуринск, 2007. – 166 с.

27. Гудковский В. А. Система сокращения потерь и сохранения качества плодов и винограда при хранении: методические рекомендации / В. А. Гудковский. – Мичуринск, 1990. – 120 с.

28. Hardenburge R. E. The commercial storage of fruits, vegetables / R. E. Hardenburge, A. Wataga, C. Wang // Florist and hursery stocks. – 1990. – Vol. 60. – P. 90 – 104.

29. Kid F. Gas storage of tomatoes / F. Kid, C. Gas // Rep. Food Invest. Bd., Gt. Brit. – 1932. – P. 209 – 211.

30. Lockhart C. The influence of low oxygen levels and relative humidity on storage of green tomatoes / C. Lockhart, C. Eaves // J. Hort. sci. - 1967. – Vol. 42. –P. 289 – 294.

31. Otma E. C. Controlled atmosphere storage and film wrapping of red bellpepers / E. Otma // Acta Horticultural. – 1989. – Vol. 258. – P. 515 – 521.

32. Parsons C. Storage of mature green tomatoes in controlled atmosphere/ C. Parsons // J. Amer. Hort. Sci. – 1970. – P. 791 – 794.

33. Шишкина Н. С. Хранение плодов и овощей в зонах производства / Н. С. Шишкина. – М.: Агропромиздат, 1991. – 126 с.

34. Чокнотадзе Г. И. Причины побурения яблок и прогноз появления этого заболевания / Г. И. Чокнотадзе // Хранение и переработка плодов и винограда: Научные труды ВАСХНИЛ. – М.: Колос, 1979. – С. 241 – 245.

35. Седова З. А. Современные технологии хранения и переработки

плодовоовощной продукции / З. А. Седова. – М.: ФГНУ «Росинформ-агротех», 2009. – 172 с.

36. Баблюк Е. Перспективы применения нанотехнологий и современная упаковка / Е. Баблюк // Тара и упаковка. – 2007. – №1. – С.15.

37. Франчук Е. П. Хранение свежих овощей и фруктов в плёночной упаковке / Е. П. Франчук // Тара и упаковка. – 1974. – №48. – С. 29 – 32.

38. Prange R. K. Controlled atmosphere and light effects on winter storage cabbage / R. K. Prange, P. Lidster // Canad. Plant. Sc. – 1991. – Vol. 71. – № 1. – P. 263-268.

39. Royall A. Handling, transpotations and storage of fruitand vegetables / A. Royall, W. Lipton // AVI Publ. Co. – 1988. - Vol. 1. – P.160 – 164.

40. Берештейн И. Б. Заготовки, транспортирование и хранение плодов / И. Б. Берештейн, Р. Я. Ципруш // Приложение к журналу «Садоводство и виноградарство». – М.: Агропромиздат, 1988. – 143 с.

41. Чеботарь В. К. Экологически безопасные способы хранения сельхозпродукции / В. К. Чеботарь, А. Е. Казаков, Е. И. Кипрушкина // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2007. – С. 45 – 48.

42. Попова Н. Современные технологии в плодовоовощной отрасли / Н. Попова // Агробизнес. – Россия. – 2006. – №11. – С. 52 – 56.

43. Криворот А. М. Основные результаты исследований по хранению плодов яблони за 1991 – 1999 гг. / А. М. Криворот // Плодоводство: науч. тр. БелНИИП. Минск, 2000. – Т. 13. – С. 226 –236.

44. Гудковский В. А. Новейшая технология хранения и транспортировки плодов и овощей с использованием препарата «Фитомаг» / В. А. Гудковский. – 2004, <http://www.fitomaq.com/articles/33>.

45. Каширская Н. Я. Болезни семечковых культур / Н. Я. Каширская. – Мичуринск, 2006. – 164 с.

46. Швец В. Ф. Применение 1-метилциклопропена при хранении фруктов и овощей / В. Ф. Швец, А. В. Кустов, В. Л. Гудковский // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2007. – №1. – С. 28 – 36.

47. Чеботарь В. К. Эффективность применение биопрепарата Эктросол / В. К. Чеботарь, А. А. Завлин, Е. И. Кипрушкина. – М.: Изд-во ВНИИА, 2007. – С. 132 – 189.

48. Чеботарь В. К. Экологически безопасные способы хранения сельхоз продукции / В. К. Чеботарь, А. Е. Казаков, Е. И. Кипрушкина // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2007. – №12. – С. 45 – 47.

49. Установка для замораживания продуктов в жидком азоте // *Lebensmittetechnik*. – 2001. – №4. – С. 52 – 54.

50. Хранение плодов / пер. с нем. И. М. Спичкина, под ред. Ульянова А. М. – М.: Колос, 1984. – 367 с.

51. Яковлева Л. А. Высокоэффективная технология хранения плодов и овощей юга России / Л. А. Яковлева, Л. А. Русанова, Е. В. Великанова // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2006. – №8. – С. 56 – 59.

52. Российский рынок замороженных продуктов // Производство и реализация мороженого и быстро замороженных продуктов. – 2006. – №5. – С. 44 – 47.

53. Попова Н. Современные технологии в плодовоовощной отрасли / Н. Попова // *Агробизнес-Россия*. – 2006. – №11. – С. 52 – 55.

54. Моисеева Н. А. Рекомендуемые режимы и продолжительность холодильного хранения некоторых плодов и овощей / Н. А. Моисеева, И. Л. Волкинд // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2007. – №3. – С. 50 – 55.

55. Кириллов Н. Г. Перспективные технологии XXI века: жидкий азот как экологически чистый хладагент / Н. Г. Кириллов // *Холодильная техника*. – 2004. – №1. – С. 16 – 18.

56. Гудковский В. А. Прогрессивные технологии хранения плодов / В. А. Гудковский, А. А. Кладь, А. Е. Балакирев, Ю. Б. Назаров // *Достижения науки и техники АПК*. – 2009. – №2. – С. 66 – 70.

57. Кисилев Р. И. Влияние электромагнитных волн миллиметрового диапазона на инфекционную активность вирусных нуклеиновых кислот / Р. И. Кисилев, Н. П. Залюбовская // Биоэнергетика. – 1973. – С. 215 – 216.
58. Панасенко В. И. Некоторые данные по вопросу влияния электромагнитных полей на живые клетки / В. И. Панасенко., В. В. Игнатов, С. В. Богородицкая // Труды ин-та курортологии и физиотерапии – М., 1971. – № 17. – С. 114 – 116.
59. Mayers C. P. Depression of phagocytosis: a nonthermal effect of microwave radiation as a potential hazard to health / C. P. Mayers, L. A. Habeshav // *Intemat. J. Radiat. Biol.* – 1973. – Vol 24. – № 5. – P.449 – 461.
60. Арбер С. Л. Влияние микроволн на ультраструктуру гигантских нейронов виноградной улитки / С. Л. Арбер, В. А. Косых // Актуальные выводы экспериментальной и клинической физиотерапии. – М.– 1976. – С. 56 – 58.
61. Эйди У. Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань / Эйди У. Р. // ТИИЭР, 1980. – Т. 68 – № 1 – С. 128 – 147.
62. Девятков Н. Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Девятков Н. Д. // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110. – Вып. 3. – С. 453 – 455.
63. Арбер С. Л. Клеточные и молекулярные эффекты и механизм действия микроволновых электромагнитных полей на биологические системы / Арбер С. Л. // Электронная обработка материалов, 1978. – № 3. – С. 59 – 65.
64. Биологическое действие электромагнитных излучений / [Савин Б. М., Вермель А. Е., Никонова К. В. и др.]. // Физиология человека и животных, 1978. – Т. 22. – С. 138 – 146.
65. Федюшко О. Ю. Інформаційна електромагнітна технологія підвищення збереження фруктоплодів при їх тривалому зберіганні: тези за матеріалами 1V міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених [«Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК»], (Київ, 21 – 22 грудня 2016 р.). / Федюшко О. Ю. // М-во освіти і науки

України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К.: НУБІП, 2016.– С. 59 – 60.

66. Севастьянов Л. А. Специфическое действие радиоволн миллиметрового диапазона на биологические системы / Севастьянов Л. А. // Отчет научного совета по проблеме «Физическая электроника». – М.: ИРЭ АН СССР, 1983. – С. 86 – 113. (Отчет научного совета по проблеме «Физическая электроника» ИРЭ АН СССР).

67. Шван Х. П. Воздействие высокочастотных полей на биологические системы: Электрические свойства и биофизические механизмы / Шван Х. П. // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68, № 1. – С. 121 – 132.

68. Лошак А. Я. Влияние хронического облучения нетепловой интенсивности на генетическую активность клеток / Лошак А. Я., Ведерникова Н. Н. // Гигиена труда и биологическое электромагнитных волн радиочастот. – М.: Медицина, 1972. – С. 38 – 39.

69. Федюшко О. Ю. Електромагнітна технологія фруктоплодів при зберіганні: тези за матеріалами XIII-го міжнародного форуму молоді [«Молодь і сільськогосподарська техніка в XXI столітті»] (Харків, 6 квітня 2017 р.). / Федюшко О. Ю. // М-во освіти і науки України, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка. – Х.: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. – С. 236.

70. Майкельсон С. М. Биологические эффекты СВЧ излучения: Обзор / Майкельсон С. М. // ТИИЭР, 1980. – Т. 68, № 1. – С. 40 – 48.

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

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

73. Кузнецов А. П. Электромагнитные поля живых клеток в КВЧ диапазоне / А. П. Кузнецов // Электронная техника, Сер.1. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып.7(441) – С. 3 – 6.
74. Федюшко Ю. М. Биофизические предпосылки для уничтожения вредных микроорганизмов на плодах яблонь электромагнитной энергией / Ю. М. Федюшко, А. Д. Черенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2016. – Вип. 176. – С. 93 – 95.
75. Рубин А. Б. Биофизика: В 2-х кн.: Учебник для биол. спец. вузов. Кн.2. Биофизика клеточных процессов / А. Б. Рубин. – М.: Высшая школа, 1987. – 303 с.
76. Велькенштейн М. В. Теория информации и биологические мембраны. / В. Ф. Антонов. – М.: Мир, 1982. – 182 с.
77. Антонов В. Ф. Липиды и ионная проницаемость мембран / В. Ф. Антонов. – М.: Мир, 1982. – 182 с.
78. Laamsweerd-Galler D. V. The Role of Proteins in a Dipole Mode for Steady-State Tonic Transport through Biological Membranes / D. V. Laamsweerd-Caller, A. Meessen // J. Membr. Biol. – 1975. – V. 23. – P. 103 – 137.
79. Макри Д. И. Исследования нетепловых резонансных эффектов мм-излучения как начало новой биофизики / Макри Д. И. // ТИИЭР, 1980. – Т. 68, № 1. – С. 40 – 48.
80. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: [Сб. научн. работ / Ред. Акад. МАИ Калинин Л. Г.]. – Одесса: ОКФА, 1966. – 108 с.
81. Shwan H. P. Microwave radiation: biophysical considerations and standards criteria / H. P. Shwan // IEEE Trans Biomed. – 1972. – Vol.19. – №4. – P. 67– 74.
82. Эйди У. Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань / У. Р. Эйди // ТИИР. – 1980. – Т.68. – №1. – С. 135 – 143.

83. Sher L. D. In the possibility of no thermal biological effects of pulsed electromagnetic radiation / L. D. Sher, E. Kresch, H. P Shwan // *Biophys S.* – 1970. – Vol.10. – P. 970 – 979.

84. Клейман А. С. Некоторые вопросы создания и применения широкодиапазонных КВЧ источников колебаний / А. С. Клейман, П. А. Кравченко, А. Д. Черенков, Л. Ф. Кучин // *Украинский метрологический журнал.* – 1999. – №2. – С. 20 – 23.

85. Федюшко А. Ю. Требования к источникам КВЧ диапазона для уничтожения вредной микрофлоры на фруктоплодах: тези за матеріалами III Всеукраїнської науково-технічної конференції [«Актуальні проблеми автоматики та приладобудування»], (Харків, 08 – 09 грудня 2016 р.). / Федюшко О. Ю. // *М-во освіти і науки України, Національний технічний університет «ХПІ» – Х.: НТІ, 2016. – С. 76 – 77.*

86. Чукова Ю. П. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Ю. П. Чукова // *ММ-волны в биологии и медицине.* – 1996. – №7. – С. 5 – 14.

87. Арбер С. Л. Клеточные и молекулярные эффекты и механизмы действия микроволновых электромагнитных полей на биологические системы / С. Л. Арбер // *Электронная обработка материалов.* – 1978. – №3. – С. 59 – 65.

88. R. Parker Vacuum Electronics / R. Parker, R. Abrams, V. Danly, V. Levush // *IEEE Transactions on MTT.* – 2002. V. 50, N3. – P. 702 – 716.

89. *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых волн* [под. Общей редакцией А. Я. Ушкова]. – К.: Наукова Думка, 1986. – 231 с.

90. Скрынник Б. К. ГДИ миллиметрового диапазона длин волн /Б. К. Скрынник, В. К. Корнеенков, В. С. Мирошническо // *Радіофізика та електроніка.* – 2002. – Вип. 2. – С. 105 – 108.

91. И. В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. Электроракумные приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М.: Высшая школа, 1972. – Т. II. – 376 с.

92. Тучный В. П. Микроволновые технологии в современной структуре технологического процесса / В. П. Тучный // *Сб. Микроволновые технологии в*

народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. – Одесса: ОКФА, 2000. – С. 6 – 12.

93. Справочник по радиоизмерительным приборам / Под ред. В. С. Насонова. – М.: Сов. Радио, 1986. – 485 с.

94. Каталог радиоизмерительных приборов 1961 – 1994 гг. – М.: НИИЭИР, 1995. – 386 с.

95. Hewlett Packard Test Measurement Catalog 1994 – 1998.

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

97. Misawa T. On osciffator circuit with car structures for millimeter – wave Impett diodes / T. Misawa., N. D. Kenyonll // IEEE Trans. – 1970. – МТТ. 18, № 11 – Р. 120 – 125.

98. Отечественные полупроводниковые приборы и зарубежные аналоги. Справочник / Состовитель Б. Л. Перельман. – М.: НТЦ, Микротех, 2005. – 182 с.

99. Клейман А. С. Высокостабильные СВЧ генераторы / А. С. Клейман, В. А. Бондарев, И. В. Тимошенко // Сб. научн. трудов «Методы и средства метрологического обеспечения измерения частотных характеристик лазеров». – Л.: НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 1987. – С. 55 – 63.

100. Черенков А. Д. Анализ методов построения источников КВЧ излучения с высокой стабильностью частоты / А. Д. Черенков, Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №2/8(56). – С. 18 – 22.

101. Кварцевые и квантовые меры частоты / [И. И. Акулов и др.] под ред. Б. И. Макаренко. – М.: МО СССР, 1976. – 409 с.

102. Семенов А. А. Теория электромагнитных волн / А. А. Семёнов. – М.: изд-во Московского университета, 1968. – 180 с.

103. Aleksandr D. Cherenkov Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals / Aleksandr D. Cherenkov, Natalija G. Kosulina and Aleksandr V. Sapruca // Research journal of Pharmaceutical,

Biological and Chemical Sciences. – November-December – 2015. – RJPBCS 6(6) – Page NO.1686 – 1694.

104. Федюшко А. Ю. Анализ распределения электрического поля на поверхности яблочек со слоем микроорганизмов поля / А. Ю. Федюшко // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017 р. – № 16 (1238). – С. 141 – 146.

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

106. Иванов Е. А. Дифракция электромагнитных волн на двух телах / Е. А. Иванов. – Минск: Наука и техника, 1968. – 583 с.

107. Aleksandr D. Cherenkov. Decision alqoritm of near-field microwave soundinq / Aleksandr D. Cherenkov, Anatolij E. Poedinchuk, Aleksandr V. Sapryka // UAER, International Journal jf Applied Engineering Research. – 2016. – pp. 45186 45189.

108. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Сов. Радио, 1957. – 582 с.

109. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1965. – 778 с.

110. Бейтмен Т., Эрдейн А. Высшие трансцендентные функции / Т. Бейтмен, А. Эрдейн. – М.: Наука, 1974. – 295 с.

111. Федюшко А. Ф. Определение параметров электромагнитного излучения для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблочек / А. Ю. Федюшко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енерго-збереження в АПК України». – 2017. – Вип. 186. – С. 160 – 162.

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

113. Тарусов Б. И. Биофизика / Тарусов Б. И. – М.: Высшая школа, 1968. – С. 208 – 210.

114. Федюшко А. Ю. Определение параметров генератора на основе двухкольцевой фазовой подстройки частоты / А. Ю. Федюшко, Н. Г. Косулина // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2017. – Вип. 187. – С. 160 – 162.

115. Хандола О. Ю. Теоретический анализ флуктуационных процессов в генераторе миллиметрового диапазона на основе фазовой подстройки частоты / О. Ю. Хандола, А. Д. Черенков // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Общегосударственный научно-производственный журнал. – 2014. – № 6 (124). – С. 73 – 80.

116. Ньютон Дж. К. Теория линейных следящих систем. – М.: ФизматГИЗ, 1971. – 380 с.

117. Каганов В. И. Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках / В. И. Каганов. – М.: Связь, 1969. – 250 с.

118. Черенков А. Д. Теоретический анализ системы преобразования частоты в генераторах миллиметрового диапазона на основе фазовой автоподстройки частоты / А. Д. Черенков, Н. Г. Косулина // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2013. – Вип. 141. – С. 107 – 111.

119. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических систем и устройств / И. П. Норенков. – М.: Высшая школа, 1980. – 380 с.

120. Коновалов Г. Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по спец. «Радиоавтоматика». – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

121. Первачев С. В. Радиоавтоматика: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.

122. Черенков А. Д. Анализ кварцевых генераторов с учетом их нелинейных свойств / А. Д. Черенков, Н. Г. Косулина // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка

«Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» - 2014. – Вип. 153. – С. 160 – 164.

123. Пихтелев А. И. Стандарты частоты и времени на основе генераторов и дискриминаторов / А. И. Пихтелев, А.А. Ульянов, Б. П. Фатеев. – М.: Сов. Радио, 1978. – 304 с.

124. Мунтян В. А. Методы формирования высокостабильных колебаний СВЧ диапазона длин волн / В. А. Мунтян, Е Л. Пиротти // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып.36. – С. 86 – 89.

125. Токорев В. Ф. О фазовых шумах многокаскадного умножителя частоты / В. Ф. Токорев // Радиотехника. – 1971. – №1. – С. 68 – 73.

126. Буревич А. Н. Умножители частоты / А. Н. Буревич. – М.: Сов. Радио, 1970. – 278 с.

127. Сигнал Д. Диоды с накоплением заряда в простых схемах /Д. Сигнал // Электротехника. – 1969. – №12. – С. 36 – 40.

128. Мегель Ю. Е. Теоретический анализ влияния частотных флуктуаций КГ и умножителей частоты на точность неразрушающего контроля биоматериалов / Ю. Е. Мегель, В. А. Мунтян // Радиотехника. – Харьков: ХНУРЭ. – 2006. – №144. – С. 56 – 58.

129. Мунтян В. А. Исследование флуктуационных процессов в умножителях на варакторах и транзисторах / В. А. Мунтян, Е Л. Пиротти // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2005. – Вип. 25. – С. 80 – 86.

130. Мунтян В. А. Разработка умножительно-усилительных устройств для системы неразрушающего контроля биообъектов по изменению их диэлектрических параметров / В. А. Мунтян // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков: СВЭКО. – 2006. – №8. – С. 9 – 13.

131. Отечественные полупроводниковые приборы и зарубежные аналоги. Справочник / Составитель Б. Л. Перельман. – М.: НТЦ Микротех, 2005. – 182 с.

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

133. Шахгильдян В. В. Радиопередающие устройства / В. В. Шахгильдян, В. Б. Козырев, А. А. Ляховкин и др. [Под ред. В. В. Шахгильдяна]. – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.

134. Малорацкий Л. Г. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях / Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич. – М.: Сов. радио, 1972. – 262 с.

135. Широкополосные радиопередающие устройства: [под ред. Алексева О. В.]. – М.: Связь, 1978. – 304 с.

136. Роллан. Умножитель частоты на ЛПД с высоким коэффициентом умножения / Роллан, Салмер, Дерик // ТИИЭР. – 1973. – Т.61, №12. – С. 108 – 109.

137. Черкес Ф. К. Микробиология / Черкес Ф. К., Богоявленская Л.Б., Бельская Н. А. – М.: Медицина, 1986. – 512 с.

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

139. Федюшко А. Ю. Опыт длительного хранения яблок, обработанных перед хранением электромагнитным излучением / А. Ю. Федюшко // Энергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2018. – № 1(6). – С.67 – 73.

ДОДАТКИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРЬКОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА**

ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
ХНТУСГ

 В. І. Мельник
(підпис) (ініціали, прізвище)

«24» вересня 2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Керівник
підприємства

 Заїка С. В.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«24» вересня 2020 р.

А К Т

**ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ
У ВИРОБНИЦТВО**

Замовник Приватне сільськогосподарське підприємство “Дружба”
(найменування організації)
Заїка Сергій Володимирович
(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на
тему «ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ
ЗБЕРІГАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ» (№ 0118U003311)
(найменування теми, № держ. реєстрації)

кафедрі біомедичної інженерії та теоретичної електротехніки
(назва кафедри)

вартістю _____
(цифрами та прописом)

виконуваної з 01.01.2018 – 01.12.2022
(термін виконання)

впроваджено в навчальний процес
(найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження)

1. Вид впроваджених результатів: низькоенергетичні електромагнітні
технології
(експлуатація виробу, роботи, технології виробництва виробу, роботи, технології,
функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження: одиначне
(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження: опромінення електромагнітним полем КВЧ
діапазону

Методика (метод) використані методи математичної фізики; теоретичні
положення електродинаміки, біофізики; основи електроніки і схемотехніки;
методи планування повнофакторного експерименту.

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: _____
якісно нові

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка _____

(вказати номер і дату актів випробувань, найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво _____

(ділянка, цех/и, процес)

- в проектні роботи Приватне сільськогосподарське підприємство "Дружба"

(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний 10 000 грн. за тону яблук _____

(від впровадження в проект)

фактичний _____ тис. грн. _____

(у тому числі часткова (дольова) участь ЗВО)

_____ тис. грн. _____

(%, цифрами і прописом)

8. Питома економічна ефективність впровадження Застосування даної технології дозволяє повністю зберегти якість і товарний вигляд плодів, понизити витрати на зберігання до 40%...60% в порівнянні з існуючою технологією зберігання плодів, збільшити тривалість зберігання до 5...6 місяців.

9. Обсяг впровадження _____

що становить _____ від обсягу впровадження, що покладено в основу розрахунку гарантованого економічного ефекту, який розраховано по закінченні НДР: $E_{\text{гар.}} =$ _____ тис. грн., а під час поетапного впровадження: $E_{\text{гар.}}$ _____ під час укладення договору.

10. Соціальний і науково-технічний ефект _____

(охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Зав. кафедрою



_____ Н. Г. Косуліна

(підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник роботи



_____ Н. Г. Косуліна

(підпис) (ініціали, прізвище)

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Керівник підприємства



_____ С. В. Заїка

(підпис) (ініціали, прізвище)

Головний бухгалтер




_____ В. Т. Цокота

(підпис) (ініціали, прізвище)



УЗГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Харківського національного
технічного університету сільському
господарстві імені Петра Василенка


В. І. Мельник
«21» вересня 2020 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
Ректор
Харківського національного
технічного університету сільському
господарстві імені Петра Василенка


О. В. Нанка
«24» вересня 2020 р.


АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ № _____

**результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і
технологічних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів**

Замовник: Харківський національний технічний університет сільського
господарства імені Петра Василенка
(найменування організації)

ректор ХНТУСГ професор Нанка О. В.
(П.І.Б. керівника підприємства)

**Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи
тема «ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ
ЗБЕРІГАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ» (№ 0118U003311)**
(найменування теми, № держ. реєстрації)

виконаної на кафедрі біомедичної інженерії та теоретичної електротехніки
(назва кафедри)

виконуваної з 01.01.2018 – 01.12.2022
(термін виконання)

впроваджено в навчальний процес
(найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження)

1. Вид впроваджено використання результатів дослідження

(термінологія, методика, обладнання тощо)

2. Форма впровадження: дисципліни другого та третього рівня


3. Новизна наукових результатів полягає в наступному:

- на основі розробленої моделі вперше досліджено процес взаємодії низькоенергетичних ЕМП з мікроорганізмами, що визивають хвороби плодів яблуні під час їх тривалого зберігання;
- вперше, на основі теоретичних досліджень були визначені параметри низькоенергетичних ЕМВ для знищення грибно-мікрофлори на поверхні плодах яблунь;
- отримала подальший розвиток теорія досліджень по розробці високостабільного генератора, що перебудовується за частотою, з метою знищення мікроорганізмів на поверхні плодів при їх тривалому зберіганні, яка відрізняється від відомих тим, що в ній СВЧ система побудована на основі ФАПЧ, а в вихідному каскаді використана система на основі відкритого бочкоподібного резонатора з лавино-пролітними діодами.
- вперше математично інтерпретовано вплив параметрів низькоенергетичного ЕМП зі знищення грибних мікроорганізмів на поверхні плодів при їх тривалому зберіганні.

4. Перелік курсів дисциплін у рамках яких викладені результати НДР _____


5. Соціальний і науково-технічний ефект Застосування даної технології дозволяє повністю зберегти якість і товарний вигляд плодів, понизити витрати на зберігання до 40%...60% в порівнянні з існуючою технологією зберігання плодів, збільшити тривалість зберігання до 5...6 місяців.

Зав. кафедрою


(підпис)

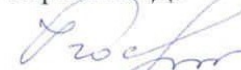
Н. Г. Косуліна
(ініціали, прізвище)

Відповідальний за впровадження


(підпис)

О. М. Мороз
(ініціали, прізвище)

Керівник НДР


(підпис)

Н. Г. Косуліна
(ініціали, прізвище)

«18» вересня 2020 р.

«17» вересня 2020 р.