

ТАВРІЙСЬКА ДЕРЖАВНА АГРОТЕХНІЧНА АКАДЕМІЯ

На правах рукопису

САБО АНДРІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ

УДК [631.234:628.97]:635.64

**ЕНЕРГООЩАДНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ
РОЗСАДИ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР НА ОСНОВІ
ПЕРІОДИЧНИХ РЕЖИМІВ ОПРОМІНЕННЯ**

05.09.16 – Застосування електротехнологій у сільськогосподарському
виробництві

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник
Діордієв Володимир Трифонович,
кандидат технічних наук, доцент

Мелітополь – 2002

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	16
1.1. Основні методи вирощування розсади овочевих культур в умовах захищеного ґрунту та напрямки підвищення ефективності її електроопромінення	16
1.2. Методи та технічні засоби забезпечення мікроклімату при вирощуванні розсади	21
1.3. СБЕР рослин як показники стану рослинних організмів	24
1.3.1. Огляд методів для отримання інформації про стан рослинних організмів	24
1.3.2. Біоелектричні явища в рослинних організмах	26
1.3.3. Природа світлозалежної біоелектричної активності рослин	27
1.3.4. Зв'язок світлозалежних біоелектричних реакцій з фізіологічними характеристиками і процесами в рослинах	33
1.4. Методи та обладнання для періодичного опромінення у біотехнічних системах вирощування рослин в захищеному ґрунті	36
1.5. Визначення напрямків досліджень	38
Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИНАМИ СВІТЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ ПЕРІОДИЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ	41
2.1. Теоретичні передумови обґрунтування оптимальних періодичних режимів опромінення рослин	41
2.2. Осциляторна модель вищої рослини при наявності СК БЕП як нелінійного електричного контуру	47
2.3. Осциляторна модель вищої рослини як взаємодіючих електричних контурів у випадку розповсюдження СК БЕП	54
Висновки до розділу	58
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СК БЕП РОСЛИН ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СК БЕП У СИСТЕМАХ РОСЛИН	59
3.1. Методи та об'єкти досліджень	59
3.1.1. Загальна схема вимірювань	60

3.1.2. Вимірювання біоелектричних потенціалів	61
3.1.3. Статистична обробка результатів	65
3.1.4. Побудова амплітудно-частотних характеристик СБЕР	66
3.2. Аналіз АЧХ СК БЕП рослин	67
3.2.1. Дослідження залежності амплітуд СК БЕП рослин від частоти світлового впливу	67
3.2.2. Прояви генотипічної специфічності та нестационарності параметрів АЧХ СК БЕП рослин	72
3.3. Планування та проведення активного експерименту для визначення залежностей параметрів АЧХ СК БЕП від параметрів середовища та віку рослин	75
3.3.1. Визначення вхідних факторів за оглядом літературних джерел та результатів попередніх дослідів	75
3.3.2. Визначення вхідних факторів за методом експертних оцінок	77
3.3.3. Визначення оптимального типу і плану експерименту та значень рівнів варіювання вхідних факторів	79
3.3.4. Проведення експерименту та обробка його результатів	81
3.4. Визначення параметрів моделей рослин	88
3.5. Експериментальні дослідження виникнення та розповсюдження світлозалежних коливань біоелектричних потенціалів між частинами та органами рослин	92
3.6. Експериментальні дослідження виникнення та розповсюдження світлоіндукованих коливань біопотенціалів у системах рослин	96
3.7. Вплив періодичних режимів опромінення, що відповідають пікам АЧХ СК БЕП, та умов вирощування на ріст рослин	106
3.8. Основні напрямки для практичної реалізації енергозберігаючих періодичних режимів	111
Висновки до розділу	114

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ТА ВИРОБНИЧИХ ВИПРОБУВАНЬ БІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ "РОЗСАДА-СЕРЕДОВИЩЕ" ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1. Опис біотехнічної системи "розсада-середовище" з адаптивним управлінням параметрами опромінення за моделлю	117
4.1.1. Алгоритм періодичного опромінення розсади овочевих культур	117
4.1.2. Пристрої управління	120
4.2. Результати лабораторних випробувань періодичного опромінення розсади овочевих культур	127
4.2.1. Методика проведення лабораторних випробувань	127
4.2.2. Енергоспоживання при випробуванні різних періодичних режимів опромінення	129
4.2.3. Вплив періодичного опромінення розсади овочевих культур	

з встановленням періодів за піками АЧХ СК БЕП на її якість	135
4.3 Результати випробувань періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур у виробничих умовах	142
4.4. Визначення економічної ефективності від впровадження біотехнічної системи "розсада-середовище"	148
4.5. Рекомендації щодо впровадження отриманих результатів у розсадних відділеннях споруд захищеного ґрунту	154
Висновки до розділу	156
ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	162
ДОДАТКИ	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

А – амплітуда коливань;
 С – ємність;
 С₀ – початкове значення ємності;
 L – індуктивність;
 М – взаємна індукція;
 Р – амплітуда зовнішньої змушуючої сили;
 р – кругова частота зовнішньої змушуючої сили;
 R, r – опір;
 q – заряд;
 U – напруга;
 u_c – напруга на ємності;
 u_L – напруга на індуктивності;

u_r – напруга на опорі;
 α – коефіцієнт зв'язку;
 γ – коефіцієнт нелінійності;
 δ – коефіцієнт згасання;
 φ – зсув за фазою;
 ω – кругова частота коливань;
 ω_0 – власна кругова частота коливань.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
 БЕА – біоелектрична активність;
 БЕП – біоелектричний потенціал;
 БЕР – біоелектрична реакція;
 СБЕА – світлозалежна біоелектрична активність;
 СБЕР – світлозалежна біоелектрична реакція;
 СК БЕП – світлозалежні коливання біоелектричних потенціалів.

ВСТУП

Проблема раціонального використання енергетичних ресурсів у сільськогосподарському виробництві з кожним роком стає все більш нагальною не тільки в Україні, але й в усьому світі. Ще 150 років тому менше 5% енергії, що споживалася у світі, мала викопне походження, а більше 95% припадало на мускульну силу тварин та людей. Зараз це співвідношення змінилося на протилежне, проте, хоч енергоресурси людства за цей час збільшилися більше ніж на три порядки, проблема їх нарощування все загострюється. В повсякденну свідомість людства все більше входить усвідомлення факту обмеженості ресурсів нашої планети. Стрімке збільшення чисельності населення Землі викликає необхідність відповідного (а ще краще випереджаючого) росту обсягів виробництва продовольства в умовах постійного скорочення через розбудову міст та промислових об'єктів придатних для цього площ. Тому сучасне сільськогосподарське виробництво для збільшення питомої врожайності та продуктивності потребує все більшої енергоозброєності. Між тим, соціальні, економічні, технічні, енергетичні, біологічні та екологічні наслідки інтенсифікації сільського господарства далеко не однозначні. Так, саме сільськогосподарське виробництво стає одним з головних споживачів енергоресурсів. З урахуванням витрат на транспортування, зберігання та переробку агропромисловий комплекс складає в середньому по світу 20% національних енерговитрат.

Турбує те, що витрати невідновлюваної енергії наближаються до темпів експоненціального зростання. Якщо кількість "продовольчої енергії", що нагромаджується культурними рослинами на одиницю витраченої невідновлюваної енергії складало в екстенсивному господарстві 20, то при інтенсивному виробництві в рослинництві 2, в тваринництві 0,2, а в

тепличному господарстві 0,02 [1]. Слід зауважити, що саме тепличні господарства є чи не першим прикладом здійснення ідеї Вернадського про перехід сільськогосподарського виробництва за схемою БІОЦЕНОЗИ → АГРОЦЕНОЗИ → НООЦЕНОЗИ. Очевидно, що такий перехід, продиктований самим поступом світової цивілізації, потребує попередньо зменшення питомих витрат енергії як мінімум на порядок.

Між тим, навіть при існуючому рівні питомих енерговитрат овочівництво захищеного ґрунту є незамінним джерелом забезпечення населення ранніми овочами у несезонний період і до того ж забезпечує розсадою відкритий ґрунт, де біля 30% всіх овочів вирощується розсадним способом. Щороку на Україні вирощується біля 5 млрд. штук розсади.

Енергетичні витрати складають до 35-55% витрат на виробництво тепличної продукції, тому овочівництво захищеного ґрунту є самою енергоємною галуззю сільського господарства. В Україні під овочами зайнято біля 2600 га закслених і плівкових теплиць, проте за останні роки площа теплиць дещо знизилася через великі витрати і проблеми з енергопостачанням. Через скорочення площ під овочами їх подушне споживання в країні знизилося з 102,9 кг в 1990 році до 92,3 в 1998. Середня врожайність огірків та томатів (найбільш розповсюджених овочів в закритому ґрунті) складає 8,5-9,0 кг/м², тоді як в таких передових господарствах, таких як ВАТ "Київська овочева фабрика" та СПК "Харківська овочева фабрика", вона складає 30-35 кг/м² при рентабельності 30-40%, що вказує на існуючі великі резерви в підвищенні врожайності [2]. Слід зауважити, що подібні ж тенденції спостерігається і в інших країнах СНД. Так, в Російській Федерації загальна площа зимових та плівкових теплиць знизилася з 4840 га в 1991 році до 2932 га в 2000 році [3]. Слід зазначити, що для задоволення потреби населення в продукції захищеного ґрунту при рівномірному їхньому надходженні з листопада по червень і для повного забезпечення відкритого ґрунту розсадою на Україні необхідно існуючі площі закритого ґрунту збільшити не менше ніж у 2 рази. Необхідно зауважити, що за даними на 1988 рік у СРСР загальна площа споруд захищеного ґрунту складала 14898 га, тобто на одного мешканця країни припадало біля 0,22 м² площі захищеного ґрунту, тоді як у Франції 5,6 м², а у Нідерландах 5,4 м² [4], що вказує на те, що при подальшому економічному розвитку України площа теплиць безумовно буде стрімко зростати.

У зв'язку з очікуваним ростом площ теплиць постає задача зменшення витрат на їхнє спорудження й експлуатацію, тому дуже актуальною є проблема розробки ефективних енергозберігаючих режимів вирощування овочів, перш за все з використанням резонансних режимів опромінення, за допомогою яких можна управляти ростом і розвитком рослин [5,6].

Основними споживачами електричної енергії в теплицях (у першу чергу в розсадних відділеннях) є опромінювачі, що створюють необхідний радіаційний і температурний фони в помешканні, без чого в зимово-

весняний період, коли виробництво овочів у значній мірі лімітується низьким рівнем природної фотосинтетично активної радіації (ФАР), отримання овочевої продукції і розсади стає занадто витратним або й взагалі неможливим. З найбільшою ефективністю штучне опромінення застосовується при вирощуванні розсади огірків, томату, перцю та деяких інших овочевих культур. Штучне освітлення дозволяє не менш ніж в 1.5...2 рази скоротити терміни вирощування розсади, поліпшити її біометричні показники, збільшити ранні і загальні врожаї овочів. При цьому доведено, що періодичні зміни рівнів опромінення рослин можуть справляти суттєві впливи на всі процеси життєдіяльності і розвиток рослин [5,6]. Очевидно, що наявність при цьому резонансних явищ може дати суттєвий стимулюючий ефект для розвитку рослин при одночасній економії енергії.

Необхідно зазначити, що питання використання резонансних явищ при асиміляції енергії оптичного випромінювання рослинами, як засіб для досягнення цілі стимуляції розвитку рослин та енергозбереження не одержали ще достатнього розвитку, що пояснюється тим, що при використанні режимів електроопромінення недостатня або навіть відсутня інформація від біооб'єкту, або отримання такої інформації пов'язано з технічними чи методологічними перешкодами. До того ж, для рослин, як і біооб'єктів взагалі, характерними є суттєва нелінійність характеристик, незворотність ряду процесів, що відбуваються і зміна параметрів в процесі розвитку, що в сполученні з впливами, що збурюють, утруднює визначення оптимальних параметрів оточуючого середовища. Між тим, наявність такої інформації є необхідною умовою для створення режимів штучного електроопромінення з максимально ефективним використанням енергії. Доведено, що одними з найбільш інформативних і найбільш придатних до використання в системах контролю та управління є показники електрофізичних властивостей рослин, яким властива залежність від параметрів оточуючого середовища, зокрема і від параметрів світлових режимів [7].

Таким чином, дослідження характеристик рослин у процесі їх розвитку з пошуком закономірностей резонансних явищ для електрофізичних властивостей має вирішальне значення для розробки ефективних режимів керування життєдіяльністю рослин з розробкою автоматизованих систем керування з використанням рослин як джерела інформації, що має велике практичне значення для розробки енерго- і ресурсозберігаючих технологій штучного опромінення розсади рослин у теплицях.

Актуальність теми. Вирощування розсади овочевих культур в умовах захищеного ґрунту потребує додаткового штучного опромінення. Проте, для цього необхідні значні витрати невідновлюваної енергії, причому біля половини собівартості розсади припадає на електроенергію. Застосування ефективних енергоощадних періодичних режимів опромінення - один з перспективних напрямків зниження витрат електроенергії в світлокультурі захищеного ґрунту.

Поставлена задача в умовах захищеного ґрунту ефективно вирішується шляхом інтенсифікації процесів фотосинтезу при використанні електроопромінення з періодичними змінами рівнів опромінення у біотехнічній системі "розсада-середовище" при використанні інформації про електрофізичні властивості рослин.

Тому розробка енергоощадних технологій вирощування розсади на основі періодичних режимів опромінення, дослідження шляхів встановлення параметрів ефективних енергоощадних періодичних режимів штучного опромінення розсади овочевих культур в залежності від зовнішніх (параметрів середовища) та внутрішніх (вікової та генотипічної специфічності рослин) факторів на основі світлозалежних електрофізичних властивостей окремих рослин і мікрофотоценозів, впливу цих режимів на розвиток розсади овочевих культур, розробка алгоритмів та технічних засобів для реалізації таких режимів є одним з найперспективніших шляхів зниження витрат електроенергії в світлокультурі закритого ґрунту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася у відповідності з Державною науково-технічною програмою 3.12 "Енерго- та ресурсозберігаючі технології в сільськогосподарському виробництві", тематикою міжвузівських наукових і науково-технічних програм щодо пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки (Наказ Міністерства Освіти України № 37 від 13.02. 96, п. 2) та Програмою №1 науково-дослідних робіт Таврійської державної агротехнічної академії на 2001-2005 роки "Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України" (підпрограма 1.13.5. "Підвищення ефективності електроопромінення розсади овочевих культур в захищеному ґрунті", державний реєстраційний номер 0102V000678).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності використання енергоресурсів при вирощуванні розсади овочевих культур в спорудах захищеного ґрунту шляхом впровадження біотехнічної системи "розсада-середовище", що реалізує алгоритми адаптивного управління параметрами періодичного електричного опромінення за моделлю з використанням інформації про світлозалежні біоелектричні реакції рослин.

Поставлена мета зумовила такі задачі дослідження:

1. Визначити параметр стану рослин для встановлення за ним параметрів періодичного опромінення розсади овочевих культур в захищеному ґрунті.
2. Дослідити закономірності зміни параметрів індукованих світлом коливань біоелектричних потенціалів рослин як біотехнічних об'єктів управління.
3. Дослідити закономірності виникнення та розповсюдження світлозалежних коливань біоелектричних потенціалів на рівні цілісних рослин та в їх системах.

4. Розробити алгоритми та засоби енергозберігаючого регулювання при періодичному електроопроміненні розсади овочевих культур в спорудах захищеного ґрунту та провести їх випробування.

Об'єкт дослідження. Процес періодичного опромінення розсади овочевих культур в біотехнічній системі “розсада-середовище”.

Предмет дослідження. Параметри періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур в захищеному ґрунті на основі світлозалежних біоелектричних реакцій рослин.

Методи досліджень. Експериментальне визначення параметрів енергоощадних періодичних режимів опромінення розсади провадилося за максимумами амплітудно-частотних характеристик світлозалежних коливань біоелектричних потенціалів рослин, при визначенні залежностей параметрів яких від зовнішніх та внутрішніх факторів використовувалися методи планування експерименту та обробки статистичних даних. При побудові та дослідженні моделей рослин та моделей взаємодії рослин та їх органів при світлоіндукованих біоелектричних реакціях використовувалися методи теорії коливань, положення теорії автоматичного керування, методи рішення диференціальних рівнянь.

Моделювання процесів і розрахункова частина досліджень проводилася на ПЕОМ шляхом розробки та експлуатації моделюючих і розрахункових програм та використання пакетів прикладних програм.

Експериментальні дослідження проводилися з допомогою серійних вимірювальних приладів і з використанням розроблених лабораторних установок.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень одержані такі основні результати:

Вперше досліджені залежності параметрів амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) СК БЕП розсади овочевих культур роду пасльонових (томатів, перцю та баклажанів) від параметрів рослин та оточуючого середовища, що дозволило запропонувати нові ефективні щодо енергозбереження та якості продукції параметри режимів періодичного опромінення в біотехнічній системі “розсада - середовище”.

Вперше встановлено факт наявності чи відсутності зв'язку між певними резонансами світлозалежних біоелектричних реакцій та механізмами устачкової регуляції у рослин, що дозволило виявити приховані піки АЧХ СК БЕП та використати їх для обґрунтування нових діапазонів періодів при штучному опроміненні розсади.

Дістало подальший розвиток вивчення явища виникнення та розповсюдження СК БЕП на рівні цілісної рослини та в системах рослин, що дозволило вдосконалити технологію вирощування розсади та поліпшити її якісні показники.

Дістало подальший розвиток вивчення впливу періодичних режимів опромінення на якісні показники розсади овочевих культур роду пасльонових, що дозволило рекомендувати зазначені режими до

впровадження у виробництво.

Вперше розроблено моделі рослин при виникненні та розповсюдженні індукованих світлом коливань біоелектричних потенціалів.

Запропоновано спосіб опромінення розсади овочевих культур в спорудах захищеного ґрунту, що дозволило помітно зменшити енерговитрати на штучне опромінення розсади у закритому ґрунті.

Вперше розроблено алгоритм та технічні засоби для керування періодичним опроміненням розсади овочевих культур роду пасльонових в біотехнічній системі "розсада-середовище" з адаптивним управлінням опроміненням за моделлю, що дозволило впровадити зазначену систему у виробництво.

Наукова новизна досліджень підтверджена Деклараційним патентом на винахід № 47048А "Спосіб опромінення розсади рослин у теплицях" (у співавторстві з В.Т. Діордієвим).

Практичне значення одержаних результатів. На підставі проведених досліджень обґрунтовані параметри режимів електроопромінення розсади ряду сортів овочевих культур роду пасльонових, розроблені алгоритми та технічні засоби для впровадження біотехнічної системи "розсада-середовище" з адаптивним управлінням параметрами періодичного опромінення в спорудах захищеного ґрунту. Запропоновано спосіб опромінення розсади овочевих культур в умовах захищеного ґрунту за моделлю на основі використання інформації про світлозалежні електрофізичні реакції рослин. Ці алгоритми, технічні засоби і спосіб впроваджені в СФГ "Прогрес-2" Бериславського району Херсонської області та СОК "Ґрунт" Каховського району Херсонської області в розсадних відділеннях стаціонарних споруд захищеного ґрунту та підтвердили свою економічну ефективність (Додаток В). Розроблено комп'ютерну програму для визначення параметрів оптимальних періодичних режимів опромінення розсади ряду сортів овочевих культур роду пасльонових в залежності від їх виду, сорту, віку, температури оточуючого середовища та змінної складової рівня опромінення та для обчислення параметрів запропонованих моделей (Додаток Б). За пропонувані моделі можуть бути використані також для діагностики фізіологічного стану рослинних організмів та умов навколишнього середовища і для створення систем автоматичного контролю і управління.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом особисто:

1. Досліджені залежності параметрів амплітудно-частотних характеристик СК БЕП від параметрів рослин та оточуючого середовища у біотехнічній системі для розсади томатів, перцю та баклажанів.
2. Знайдено нові ефективні щодо енергозбереження та якості продукції періодичні режими опромінення розсади овочевих культур; встановлено факт наявності чи відсутності зв'язку між певними резонансами світлозалежних біоелектричних реакцій та механізмами устячкової регуляції у рослин.

3. Розроблено моделі рослин при виникненні та розповсюдженні індукованих світлом коливань біоелектричних потенціалів.
4. Досліджено явище розповсюдження СК БЕП між органами рослин та між рослинами у мікрофотоценозах овочевих культур роду пасльонових, встановлена стимулююча дія періодичних режимів опромінення на рівні фотоценозів.
5. Запропоновано спосіб опромінення розсади овочевих культур в спорудах захищеного ґрунту.
6. Розроблено алгоритм та технічні засоби для керування періодичним опроміненням розсади овочевих культур в біотехнічній системі "розсада-середовище" для умов захищеного ґрунту.
7. Розроблено комп'ютерну програму для визначення параметрів енергозберігаючих періодичних режимів опромінення та параметрів моделей.

Загальна доля участі в надрукованих в співавторстві праць складає 65%.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Таврійської державної агротехнічної академії 1996, 1998 та 2001 років, на Республіканському науково-технічному семінарі з вдосконалення показників теплових двигунів та ресурсозбереження (Мелітополь, 1995), на Міжнародній науково-технічній конференції "Землеробська механіка на рубежі сторіч" (м. Мелітополь, 2001), на Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України" (м. Харків, 2001).

Публікації. Основні положення дисертації викладено в 10 роботах (9 статей у фахових виданнях та один патент на винахід).

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Основні методи вирощування розсади овочевих культур в умовах захищеного ґрунту та напрямки підвищення ефективності її електроопромінення

З огляду на триваюче зростання чисельності населення Землі при подальшому зменшенні придатних до сільськогосподарського використання земельних ресурсів та погіршення їх якості зростання обсягів сільськогосподарського виробництва набуває все більшої актуальності. До моменту досягнення повного контролю за демографічною ситуацією у світі саме ефективність сільського господарства залишиться визначальним критерієм розвитку суспільства. В країнах з помірним кліматом важливе місце в виробництві продовольства займає вирощування овочевих культур та їх розсади в умовах захищеного ґрунту, тоді як з точки зору затрат невідновлювальної енергії на кожну одиницю

нагромадженій в продукції харчової енергії саме споруди захищеного ґрунту є одним з найменш ефективних виробництв [1], що в значній мірі і стримує нарощування площ таких споруд до обсягів, які визначає науково обґрунтована потреба населення країни в вітамінній продукції [2]. Тому зменшення енергоспоживання в спорудах захищеного ґрунту є визначальним фактором для підвищення ефективності і нарощування обсягів виробництва овочів.

В спорудах захищеного ґрунту розсада вирощується як для подальшого вирощування рослин в закритому ґрунті, так і для забезпечення потреб у розсаді відкритого ґрунту. Принципової різниці у технологіях для обох випадків нема, за винятком різниці у строках вирощування і того факту, що розсада для висадки у відкритий ґрунт часто вирощується в нестаціонарних спорудах, що не є характерним для використання розсади при вирощуванні у закритому ґрунті. В даній роботі розглядається саме вирощування розсади для висадки у спорудах захищеного ґрунту.

Вирощування розсади в стаціонарних спорудах відбувається при використанні наявного природного освітлення як у спорудах під склом, так і під різноманітними полімерними покриттями [8-11]. Споруди з непрозорим покриттям та вирощуванням рослин тільки при штучному опроміненні, досить ефективні в умовах Крайньої Півночі, не отримали розповсюдження на території України через високі енерговитрати [12-14].

В свою чергу, вирощування розсади може провадитися гідропонним методом (включаючи вирощування на мінеральних субстратах, гравії та піску з подачею живильного розчину) або на ґрунті, при чому в останньому варіанті використовуються як споруди на існуючих ґрунтах, так і з приготуванням різноманітних ґрунтових сумішей [4,8-11,13,15]. Використання гідропонних методів є перспективним і все більше розповсюджується через такі переваги, як висока культура виробництва, низька доля ручної праці, інтенсивне використання площ споруди, але ще є недостатньо розповсюдженим у нашій країні через те, що ці методи потребують суворого дотримання технологій (для чого необхідна дуже висока надійність енерго- та водопостачання), високого рівня кваліфікації персоналу і потребують значних початкових капіталовкладень [2,4,9].

Вирощування розсади на основі ґрунтових сумішей дозволяє контролювати наявність необхідних складових мінерального живлення а також під час приготування ґрунтових сумішей провадити їх знезараження та досягати необхідного гранулометричного складу ґрунту. Отримали розповсюдження технології вирощування розсади в горщечках, касетах, торфоплитах та в малооб'ємних пластикових пакетах [8-11,13,15,16]. При цьому як правило овочеві культури вирощуються з пікіруванням. Для зниження витрат ручної праці та здешевлення розсади останнім часом (особливо на півдні України) використовують технології без пікірування розсади при її вирощуванні безгорщечковим методом, в тому числі і безпосередньо на ґрунті з вибиранням розсади спеціальними засобами

механізації [8-10,15].

Перспективними є такі технології, як використання вертикальних конвеєрних теплиць та використання замкнених виробничо-екологічних систем, які, проте, ще не отримали масового розповсюдження через недостатню розробленість процесів, чутливість до перерв в енергопостачанні та потребу в значних капіталовкладеннях [2,9,13,16].

Загалом же можна відзначити, що в кожному регіоні та населеному пункті необхідно при проектуванні споруд захищеного ґрунту та виборі технологій вирощування розсади враховувати специфічні умови, які мають великий, а іноді і вирішальний вплив на рівень рентабельності виробництва. Серед таких умов варто згадати такі як наявність промислових підприємств з викиданням надлишкового тепла та (або) продуктів згоряння в навколишнє середовище, наявність та кваліфікація виробничого персоналу, віддаленість від місць споживання продукції, наявність транспортної мережі, стабільність енергопостачання, склад місцевих ґрунтів та доступність мінеральних покладів і таке інше [4,8,9,11,13,15].

Всі сучасні технології вирощування розсади в спорудах захищеного ґрунту передбачають суворе дотримання послідовності і параметрів технологічних операцій. Доведено, що в зимово-весняний період вирощування якісної розсади овочевих культур на території України в умовах захищеного ґрунту ефективно тільки при використанні додаткового або переважного штучного опромінення рослин, добре визначені вимоги до рівнів та тривалості опромінення та інших параметрів мікроклімату [8-10,16,17].

Як відомо, доля поглиненої рослинами енергії опромінення складає біля 80%, причому на фотосинтез використовується 1...2% [18]. Вважається, що тільки за рахунок зняття лімітуючої дії зовнішніх та внутрішніх факторів ККД використання світлової енергії може бути підвищено до 4...6% [1,19], чи, за іншими даними, навіть до 20...25% [20]. Оскільки природний рівень освітлення може перевищувати 100 000 люкс, що на порядок більше того рівня, що зазвичай використовується в спорудах захищеного ґрунту [16,21], то продуктивність рослин далека від потенційної [22], яка, втім, виявляється тільки в лабораторних умовах через деякі технічні труднощі і випереджаюче зростання енерговитрат.

Значна увага дослідників була приділена спектральному складу штучних джерел світла та їх впливу на розвиток рослин [12,16,22-26]. Встановлено, наприклад, що надлишок інфрачервоних хвиль стримує швидкість фотосинтезу [12]. Взагалі дія багатьох ділянок спектру у оптичному діапазоні має дуже складний характер та залежить від видової специфічності, фаз онтогенезу і інших факторів [5,18,20,21,25,27], що обумовлено складністю фотосинтезуючого апарату та наявністю пігментних систем, що відіграють велику роль в регуляторних функціях [19,20,27-30]. Так, зокрема впливи оптичного опромінення на рослини виявляються в зміні активності фітохромних реакцій, які в свою чергу тісно зв'язані з цілим рядом регуляторних функцій [18-20,27,28,30].

Відомо про існування двох форм фітохрому, що взаємно перетворюються, з максимумами поглинання при довжині хвилі 660 і 730 нм, що викликають взаємно антагоністичні реакції рослин [27,30]. Дослідження щодо функцій цієї та інших пігментних систем та можливостей використання їх властивостей тривають.

Важливе значення надається питанню взаємозв'язку рівнів опроміненості рослин з параметрами мікроклімату, перш за все з температурним режимом. Встановлені залежності інтенсивності дихання, транспірації і швидкості фотосинтетичних реакцій від температури дають можливість одночасним регулюванням опроміненості та температури підвищити ККД спожитої енергії [18,31]. Проте все ще дискусійним залишається питання про необхідність зниження температури при зниженні рівня опроміненості вдень і в нічний період [5,8,17,21,31,32], що, на думку автора, пов'язано з неоднозначною взаємозалежністю цілого ряду параметрів, що визначають інтенсивність зазначених процесів, від рівня опромінення і температури і неповнотою контролю цих параметрів при проведенні досліджень. Триває дослідження залежності інтенсивності формування господарські корисного врожаю різних видів і сортів рослин від коефіцієнту використання енергії фотосинтезу оптичного опромінення при різних екологічних умовах [33].

Перспективним напрямком економії енергоресурсів є використання періодичного чергування рівнів опромінення [5,6,19,21,22,34-39] з періодами від мілісекунд [30,34] до кількох годин [35,36]. В роботах таких дослідників, як Леман В.М., Мошков Б.С., Китлаєв Б.М., Новак В.О., Іванкіна Н.Г., Рибін І.О., Мартиненко О.І., Шевелуха В.А., Молчанов О.Г., Кистень Г.Е., Герасимчук Ю.В., Скрипник М.М., Прищеп Л.Г., Большина Н.П., Никифорова Л.С., Третьяков М.М. та багатьох інших доведено, що застосування в спорудах захищеного ґрунту додаткового освітлення в змінних (періодичних та імпульсних) режимах дозволяє прискорювати та регулювати розвиток рослин, отримувати більші врожаї при одночасному зниженні енергоспоживання завдяки інтенсифікації процесів фотосинтезу.

На основі отриманих при проведенні досліджень даних про періодичність зміни рівнів опроміненості було запропоновано конструкції ряду установок. Слід зазначити, що в цілому ряді випадків параметри режимів були визначені чисто емпіричним шляхом виходячи з наявності покращання біометричних характеристик рослин або прискорення їх розвитку без будь-якого фізіологічного обґрунтування [34,37,40], тоді як, можливо, інші режими були б більш сприятливими, або ж ці параметри вибиралися виходячи з апаратних можливостей [34]. Лише у кількох роботах повідомляється про пригнічення розвитку рослин при деяких параметрах подібних режимів [5,22,30] чи про відсутність стимулюючого ефекту [37,38,41], тоді як з теоретичних міркувань такі ефекти повинні зустрічатися досить часто [28,30,42,43]. Часто параметри режимів обиралися за такими фізіологічними показниками, як збільшення лінійних розмірів, інтенсивність фотосинтезу чи асиміляція CO_2 [35,36,38,44], які є

складними для вимірювання або інерційними. Між тим, при належному обґрунтуванні параметрів режимів можна досягнути помітного енергозберігаючого ефекту [6,39].

Таким чином, можна визначити як основний шлях економії енергії при електроопроміненні розсади в спорудах захищеного ґрунту: оптимізація параметрів енергетичних впливів і їх погодження з іншими параметрами мікроклімату при використанні інформації від рослин, для чого потрібно визначити основні чинники, що впливають на характеристики рослин. Тому варто розглянути основні методи та засоби забезпечення мікроклімату при вирощуванні розсади рослин а також знайти достатньо інформативний показник стану рослинних організмів.

1.2. Методи та технічні засоби забезпечення мікроклімату при вирощуванні розсади

Життєдіяльність, а отже і продуктивність рослин в значній мірі визначається процесами фотосинтезу та дихання. Інтенсивність фотосинтезу, тобто процесу зв'язування електромагнітної енергії при природному або штучному опроміненні в сухій речовині рослини, залежить від рівня опроміненості, температури, вологості та газового складу повітря. Дихання є зворотнім по відношенню до фотосинтезу процесом, що супроводжується окисненням вуглеводів, його інтенсивність визначається температурою повітря [8,14,19,20]. Баланс між цими процесами в основному і визначає продуктивність рослин. Слід також згадати такі важливі параметри мікроклімату, як температура ґрунту, яка зазвичай не дуже відрізняється від температури повітря та може впливати на інтенсивність поглинання рослиною живильних речовин та розвиток кореневої системи, вологість ґрунту та вологість повітря. Останній фактор не дуже впливає на продуктивність біоценоза, проте його потрібно регулювати разом з температурою [14,20].

З складових газового складу найбільший вплив на продуктивність справляє концентрація CO_2 , яка суттєво впливає на інтенсивність фотосинтезу. В нічний час концентрація двоокису вуглецю за рахунок дихання рослин збільшується, а при інтенсивному фотосинтезі значно зменшується, що призводить до його уповільнення. Тому в деяких випадках в споруди захищеного ґрунту подають додаткові кількості CO_2 . Виправданість такого рішення і концентрація CO_2 визначається вирішенням питання економічної доцільності, яка залежить зокрема від наявності промислових об'єктів, що викидають CO_2 в атмосферу, способом отримання надлишкового CO_2 , розмірами споруди та іншими факторами [9,13,14,20]. На життєдіяльність рослин також впливає швидкість руху повітря, яка в залежності від культури повинна знаходитися в межах від 0,25 до 0,5 м/с [14,45].

Отримання необхідної кількості та якості продукції в умовах захищеного ґрунту визначається підтриманням всіх показників

мікроклімату в належних межах, які до того ж змінюються в залежності від фази розвитку рослини, тобто, особливо інтенсивно саме при вирощуванні розсади [8-11,14,21], яка є з точки зору теорії управління об'єктом зі значною нестаціонарністю параметрів. Очевидно, що врахування всієї різноманітності зв'язків між різними параметрами мікроклімату та їх оптимізація потребують високого рівня автоматизації технологічних процесів з урахуванням особливостей агротехніки, конструкцій самих споруд, їх систем обігріву, вентиляції, опромінення, поливу та іншими факторами при врахуванні наявності збурюючого впливу з боку оточуючого середовища [9,13,14,46,47].

Перші системи управління параметрами мікроклімату були системами роздільного регулювання найважливіших параметрів в певних визначених агротехнікою межах. Проте, і в цьому випадку через складність залежностей деяких параметрів (особливо температури повітря) від цілого ряду зовнішніх факторів (які до того ж є чутливими до збурень з боку атмосферних явищ) виникала потреба в визначенні чинників як методами активного експерименту [11,13], так і безпосереднім вимірюванням збурюючих факторів [13,14,48,49]. Так, для управління температурним режимом було застосовано замість регулювання за збуренням комбінований принцип регулювання з введенням до схеми датчика метеорологічних умов з використанням фізичної моделі об'єкту [14,48,49].

Наступним етапом у розвитку систем підтримання мікроклімату був перехід до сумісного регулювання кількох факторів, перш за все штучного опромінення та температури [50,51], рідше підключаючи сюди концентрацію двоокису вуглецю [13,52,53]. В цьому випадку більшість дослідників виступає з рекомендаціями зниження температури при підвищенні опроміненості і підвищення при збільшенні [12-14,31,47], такими ж є більшість практичних рекомендацій [9-11,15,16]. Проте, слід згадати і наявність прямо протилежних рекомендацій [5,22]. Те ж стосується і питання встановлення температурного режиму у нічний час. На думку автора така розбіжність думок пояснюється тим, що більшість практичних рекомендацій має лише емпіричне підґрунтя, а при проведенні експериментальних досліджень результати, загалом вірні для досліджуваних об'єктів на певній фазі розвитку та для певних умов середовища, без достатніх підстав узагальнювалися та переносилися на інші об'єкти [5,12,13,18-21,47].

Системи з сумісним регулюванням більшої кількості параметрів (крім згаданих вище ще і вологості, фотоперіодизму, спектрального складу і т. ін.) застосовані у ряді камер штучного клімату (фітотронах), що використовуються в дослідницьких та селекційних цілях, проте, на практиці вони не отримали розповсюдження крім окремих експериментальних теплиць та оранжерей [47] через високу вартість, недостатні розміри та складність в експлуатації в умовах масового виробництва овочів.

Загалом же потрібно зауважити, що всі згадані системи підтримання та регулювання параметрів мікроклімату мають той недолік, що в них акцент робиться на параметрах середовища, тоді як об'єктом кінцевого впливу є розсада. Для рослин же взагалі характерна значна нестационарність параметрів та складна їх залежність від параметрів середовища, що тим більш є характерним для розсади, коли відбувається стрімка зміна фаз розвитку та параметрів рослинного організму [6,8,18,19, 54]. Тому більш перспективними є системи "розсада-середовище", в яких регулювання параметрів середовища відбувається на основі інформації про стан розсади.

1.3. СБЕР рослин як показник стану рослинних організмів

1.3.1. Огляд методів для отримання інформації про стан рослинних організмів

При наявній тенденції переходу від систем регулювання та вимірювання параметрів середовища, в якому розвивається розсада, що традиційно використовуються в сільському господарстві, до проблемно-орієнтованих комплексів, що включають і саму рослину, виникає потреба в отриманні інформації про стан рослинного організму з використанням методів і засобів, найбільш придатних для застосування в виробничих умовах [7,45,55]. При дослідженні рослин як елементів автоматизованих біотехнічних систем було встановлено, що є потреба в динамічному вимірюванні процесів їх життєдіяльності, оскільки адекватна інтерпретація дискретних вимірювань інформації про життєдіяльність рослин є неможливою [7,55].

Для отримання інформації від рослин використовувалися різноманітні параметри. Наприклад, в системах автоматизованого управління водним режимом як параметр контролю використовувалися: водний потенціал, тургор, швидкість руху води по стеблу, вага рослин [56-59], а також одночасного контролю (з відповідною обробкою) швидкості руху води в стеблі та його діаметру [60]. Відомими є системи регулювання параметрів середовища за критерієм інтенсивності газообміну двоокису вуглецю, що і вимірюється [31,51-53,61,62]. Можливим є одночасне вимірювання ростових показників як листів, так і осьових органів, і навіть підземних органів рослин [38]. Проте, вимірювання ростових характеристик через свою інерційність не дозволяє спостерігати швидкі зміни у поведінці рослин і є досить трудомістким процесом [63].

Певний інтерес становлять біокібернетичні системи, що базуються на вимірюванні рухів рослин у градієнтному полі факторів середовища [64-66]. У Всесоюзному біотехнічному інституті зокрема було розроблено пристрій, що дозволяє рослині рухатися до місця з найбільш сприятливими умовами середовища [66]. Слід також згадати створений в лабораторії екологічної генетики АН Молдови автоматизований інформаційно-вимірювальний комплекс у складі фітотрона, ЕОМ, пристроїв спряження

та первинних перетворювачів параметрів рослини та середовища, що дозволяє вимірювати розміри осьових органів, градієнти температур, величину транспірації [55,67]. Однак експлуатація цього комплексу виявила, що через стохастичність та кореляцію параметрів стану біотехнічної системи "рослина-середовище" первинні параметри не дають можливості зробити однозначного висновку про стан системи [7,67].

Є пропозиції використання для задач отримання інформації від рослини одночасно кількох динамічних показників, що пов'язані з якістю перехідних процесів [68-70]. Проте складність процедур та апаратного забезпечення ускладнює практичне використання цих підходів до отримання інформації про стан рослинного організму. Подальший прогрес в створенні автоматизованих біосистем пов'язують з оснащенням їх сучасними датчиками та ЕОМ, що провадять первинну обробку інформації з представленням її у зручному для використання вигляді, для чого потрібно розробити відповідні технічні засоби та алгоритми [7].

Вибір мінімально необхідного набору параметрів стану рослин є чи не самим головним питанням у проблемі отримання адекватної та цінної у прогностичному відношенні інформації від рослини. У дослідженнях О.І. Мартиненка встановлено, що найбільш раціональним є мінімальний набір параметрів стану рослинного об'єкта, що включає біоелектричний потенціал, водний (тургорний) потенціал та термодинамічний потенціал, вимірювання яких в масштабі реального часу забезпечує спостереження стану рослини. З означених параметрів стану найбільшою продуктивністю відзначається біоелектричний потенціал. Однак абсолютні значення біопотенціалів є малоінформативними через малу відтворюваність. Тому для зменшення розкиду та досягнення високої відтворюваності доцільно використовувати відносні зміни БЕП у вигляді біоелектричних реакцій на тест-вплив, що дозволяє використовувати цю динамічну характеристику для спостереження за станом рослин [7,71].

Для вибору тест-впливу на рослину необхідно керуватися умовою мінімального впливу на об'єкт, оскільки природа збудника не відіграє суттєвої ролі [7]. Порівняльний аналіз показує, що для рослин таким вимогам найбільш задовольняє світловий вплив, реакції на який є загальною рисою всіх фотосинтезуючих тканин і зокрема проявляються у біоелектричній відповіді на періодичну і одноразову зміну рівня опроміненості в широких межах. Зміни потенціалів доволі точно відбивають всі зміни в середовищі та є першою ланкою причинно-наслідкового ланцюга змін метаболізму.

Таким чином, можна зробити висновок, що найбільш придатним методом отримання інформації про стан рослини є вимірювання параметрів біоелектричних реакцій на світловий вплив, тобто, світлозалежних біоелектричних реакцій.

1.3.2. Біоелектричні явища в рослинних організмах

Питання про функціональне значення біоелектричних явищ в процесах життєдіяльності рослинних організмів постійно привертало увагу дослідників, перш за все з точки зору можливості їх використання для отримання інформації про фізіологічний стан рослин [7,72-75]. Питаннями досліджень біоелектричних явищ та їх зв'язку з різноманітними фізіологічними параметрами рослинних організмів займалися такі вчені як Маслоброд С.Н., Мартиненко О.І., Іванкіна Н.Г., Рибін І.О., Шабала С.М., Никифорова Л.Є., Уоллер Дж., Нішізакі Ю., Ньюман Я., Бюннінг Е., Пікард Б. та інші. Не зважаючи на чисельні дослідження і постійно триваюче нагромадження експериментального матеріалу, що свідчить про безсумнівну наявність зв'язку між електричними та морфологічними характеристиками у рослин, ці явища ще потребують подальшого дослідження.

Як відомо, координація життєдіяльності рослинних організмів, у відповідності з загальним принципом надійності функціонування біосистем, здійснюється відразу за кількома каналами, один з яких і є електричний, який до того ж забезпечує більшу швидкість зв'язку між органами у порівнянні з більш повільними каналами, що базуються на транспорті фітогормонів та пластид [76,77]. Встановлено вплив електричних сигналів на фотосинтез, дихання, поглинання і рух води і речовин, тропізми, функціонування органів розмноження, зв'язок просторово віддалених органів та інші процеси [77-84], а зміна електричних потенціалів є посередником багатьох видів рухової активності [78,85,86]. Біоелектричні сигнали виконують координуючі функції як в звичайних, так і в екстремальних умовах [7,73,77,78,87-89]. Тому є перспективним використовувати біоелектричні явища для оцінки стійкості рослин до стресових факторів (спеки, морозу, дії хімічних речовин і т.п.) [7,73,78,90,91].

Між тим, роль світлозалежних біоелектричних змін в рослинних тканинах досліджена порівняно менше і питання про природу таких реакцій все ще є дискусійним [92-94]. При цьому основна увага дослідників була приділена зв'язку СБЕА з процесами фотосинтезу [94-98]. Якщо взяти до уваги данні про вірогідну наявність ланцюгів зворотного зв'язку між мембранним потенціалом та рН клітинної рідини [99-102] і можливість розповсюдження реакцій до неосвітлених ділянок [103], є доцільним дослідити особливості розповсюдження індукованих світлом біоелектричних реакцій між органами рослини і між окремими рослинами.

1.3.3. Природа світлозалежної біоелектричної активності рослин

СБЕА рослин проявляється в виникненні градієнтів електричних потенціалів при зміні світлових режимів або між частинами рослин, що перебувають у різних умовах освітлення, при чому така активність характерна для всіх рослинних тканин, що містять хлорофіл [20,104]. Ця активність була відкрита більше 100 років тому [105], і за цей час

дослідники накопичили чимало фактичного матеріалу, що свідчить про наявність зв'язку між СК БЕП та процесами фотосинтезу [96,97,106-112]. Було встановлено, що в генерації таких змін, ймовірно, беруть участь хлоропласти, оскільки пряме фотоелектричне виникнення БЕП унеможливлене тим фактом, що збудження передається також і неосвітленим частинам рослин [103,109]. Це припущення підкріплено дослідженнями залежності СБЕР від спектрального складу світла, що виявили співпадання зі спектром поглинання хлорофілу [19,20,93,113-119]. Встановлено також, що необхідною умовою для цієї реакції є нормальне функціонування ланцюга електронного транспорту, що пов'язано з нециклічним фосфореліруванням, тобто при нормальному функціонуванні циклу Кальвіна [120-122]. Встановлено також зв'язок СБЕА листів з процесами дихання [95,107]. Без сумніву, фотосинтетичні процеси займають центральне місце в виникненні СБЕР [94,97], хоч природа ряду механізмів перехідних реакцій ще недостатньо прояснена. Наприклад, реакцію листа на зміну освітленості було запропоновано розглядати як суму високоенергетичного та низькоенергетичного чинників, що пов'язувалися відповідно з діяльністю фотосистем I і II [96].

Досить добре досліджені електрореакції, що індукуються світлом, на клітинному рівні. Так, спостерігалось відхилення мембранних потенціалів як реакція на вмикання світла, після чого величина потенціалу повертається до попереднього значення, часто після складних перехідних процесів [104,123]. Проте, питання про природу механізмів таких реакцій все ще є предметом дискусій [124-127]. За думкою більшості дослідників, індуковані світлом зміни різниці електричних потенціалів у клітин рослин пов'язані з процесом активації світлом помп іонів H^+ , що розташовані на мембранах хлоропластів та на плазмолемі [128] і СБЕР в клітинах рослин відбувається наступним чином. При розвитку фази деполяризації мембранного потенціалу, коли відбувається відразу кілька біохімічних реакцій [79], інтенсивність яких залежить від інтенсивності світла [128], опір системи знижується у 1,5...2 рази, підсилюється вихід іонів K^+ з клітин [103], підвищується приблизно на 0,3 одиниці рН цитоплазми [129], підкислюється вакуоль та гіперполяризується тонопласт [129-131]. У освітлених клітин зелених рослин фаза деполяризації триває більше 3 хвилин і супроводжується появою фотоіндукованого струму, при чому амплітуда гіперполяризації залежить від інтенсивності світла. Потім рН цитоплазми повертається до попереднього значення, а кислотність вакуолі продовжує зростати [129]. Гіперполяризація плазмолемі супроводжується також активним транспортом у вакуоль H^+ , при чому світло також діє на функціонування пасивних іонних каналів [72,132]. Також існує ендогенний фактор, імовірно за все, фітохромна система, що пригальмовує або прискорює світлоіндуковані зміни потенціалу, що викликані фотосинтетичною активністю клітин листів рослини [117,133].

Основна увага дослідників була приділена коливанням БЕП, що згасають і викликані різкою зміною світлового режиму [72,75,92,93,95-97,

104,117,120], а також циркадним коливанням БЕП, і їх особливостям в залежності від зовнішніх умов [134,135]. Доволі небагато робіт було присвячено дослідженню електрофізіологічних реакцій рослин на періодичні зміни умов освітленості при розвитку рослин [6,136,137] або при різних температурних умовах [6,7,138], умовах водного режиму [139], під дією хімічних речовин [73] та дослідженню процесів розповсюдження коливань БЕП між органами рослин чи окремими рослинами [75,136,137, 139].

Вивчення залежності амплітуд світлоіндукованих коливань БЕП від частоти зміни рівнів опроміненості для кукурудзи, бобів [140], томатів, огірків, квасолі [6] засвідчило, що ця залежність має одно- або двовершинний характер, що свідчить про одночасну наявність кількох механізмів. При дослідженні АЧХ рослин пшениці встановлено наявність щонайменше двох резонансних піків з характерними постійними часу $\tau_1 = 40 \dots 60$ хвилин та $\tau_2 = 8 \dots 12$ хвилин, що пов'язані з власною активністю рослини. При зміні параметрів середовища в зоні нормальної життєдіяльності спектральна характеристика рослини загалом зберігає стаціонарність, а зміщення енергетичного центру в зону високих частот з появою нових піків $\tau_3 = 1 \dots 2$ хвилин з'являється при дії на рослину екстремальних факторів, з чого зроблено висновок, що найбільшу інформативність має діапазон частот СК БЕП до 1 Гц., а рослина з точки зору коливальності є активно-ємнісним дво полюсником [7]. Зазвичай БЕП має резонансний характер, тому регулюючі його механізми працюють, очевидно, як коливальна ланка [73,74,139,140].

Для встановлення СК БЕП потрібно досить великий проміжок часу – від години до кількох діб, що утруднює вивчення СК БЕП для різної інтенсивності світлового впливу для рослин одного віку, що ставить під сумнів деякі отримані результати про відсутність в листі рослин процесів, що впливають на механізми утворення потенціалів, та постійність амплітуди та форми коливань на протязі всього онтогенезу рослини [137] через недостатній час спостережень, тоді як при достатній тривалості дослідів спостерігається наявність більш швидкоплинних СК БЕП на фоні циркадних ритмів, характерних для рослин [134]. Слід згадати також про наявність спостережень таких явищ, як біфуркація циклу коливань і поява хаотичних коливань БЕП, що є характерним для хаотичної динаміки [141], не тільки при перехідних процесах, а і при періодичних змінах рівнів опроміненості рослин [87]. Така складна динаміка, можливо, більш розповсюджена, ніж очікувалося раніше, особливо якщо зважити, що світло є одним з тих природних факторів, для яких характерні флуктуації у широкому діапазоні [87,142]. Основні характеристики СБЕР рослин значно залежать не тільки від параметрів світлового впливу, але й від умов оточуючого середовища, перш за все від температури та газового складу, при цьому залежність від зовнішніх факторів виявляє цілий ряд характеристик СБЕР (амплітуда, кількість і тривалість фаз перехідного процесу та інші).

Дослідження залежності параметрів СБЕА у рослин від інтенсивності світла при його вмиканні та вимиканні показали наявність прямої залежності між амплітудою СБЕР та інтенсивністю світла [103,109, 110,143] а також вплив величини освітленості на послідовність фаз СБЕР [112].

Виявлено залежність СБЕР від спектрального складу світла: оскільки різні пігментні фактори мають різну чутливість до тих або інших ділянок спектра [18-20,30,115], то перехід від однієї довжини хвиль до іншої може викликати значні зміни рівня стаціонарного потенціалу листа рослини, при чому можна зробити висновок про перехід ведучої ролі в біоелектричних ефектах фотозбудження при близькому червоному світлі від хлорофілу а при низькій інтенсивності до хлорофілу b при високій інтенсивності світла [116]. Далеке червоне світло не викликає зсувів амплітуд реакцій, тоді як червоне призводить до їх поступового згасання, швидкість якого є зворотно залежною від інтенсивності світла з частотою 660 нм [117].

Виявлено наявність певного значення освітленості, що не перевищує, за деякими даними, 100 лк [94,110], при перевищенні якого виникає СБЕР, при чому подальше збільшення інтенсивності світла супроводжується зміною тривалості послідовних фаз електрореакцій та зміною їх форм. Для більшості рослин характерне початкове лінійне зростання амплітуд всіх фаз реакції, яке поступово змінюється насиченням [94]. Виявлено складну і неоднозначну залежність тривалості реакцій від тривалості попередніх періодів світла і темряви [110-112], але зазвичай реакції на вмикання і вимикання світла закінчуються виходом на новий стаціонарний рівень після проходження ряду послідовних фаз, а передчасна зміна світлового режиму може викликати появу залишкових ефектів, що позначаються на характері наступних перехідних процесів [92,110,144].

Вплив газового складу на СБЕР опосередкований світлозалежними метаболічними процесами фотосинтезу та фотодихання відповідно при високих та низьких рівнях освітлення. Встановлено зв'язок між СБЕА листів рослин, фотодиханням і швидкістю асиміляції CO_2 [6,145,146], а також наявність відмінностей за чутливістю низькоенергетичних та високоекнергетичних електрореакцій до вмісту кисню та окису вуглецю в оточуючій атмосфері [146]. Скоріше за все, СБЕР листів не визначаються безпосередньо продуктами асиміляції CO_2 та фотодихання, а пов'язані з енергетичними механізмами кліткових мембран, перш за все мембран хлоропластів [20,104]. Слід також враховувати і зміни фотосинтетичного апарату рослин при зміні умов оточуючого середовища, включаючи газовий склад, забрудненість хімічними речовинами, умови опроміненості та інші [42].

Про можливий зв'язок коливань БЕП з водним режимом рослин свідчить виявлена можливість індукування коливань БЕП при періодичній подачі живильного розчину до коренів рослин у водній культурі саме при наявності певного рівня опроміненості рослин [139], при чому виявлена залежність резонансної частоти коливань БЕП від віку листів.

Зв'язок СБА з температурним режимом відмічався цілим рядом дослідників [6,7,143,144]. Як правило, зі зниженням температури реакції стають більш повільними, затягнутими в часі аж до їх повного зникнення [7], а підвищення температури веде до прискорення реакцій з експоненціальним зменшенням тривалості окремих фаз, що свідчить про прискорення процесів [144]. Існує деякий оптимальний температурний інтервал (суттєво різним для окремих рослин), при якому амплітудні параметри СБЕР приймають максимальні значення [94,144]. При віддаленні від температурного оптимуму чутливість рослин до дії збурення, тобто і СБЕР, зменшується. Вид температурного стресу (до- або запороговий) визначає тип перехідної характеристики, послідовність та тривалість фаз реакції [7]. Взагалі зміни, що проходять в рослині під впливом факторів зовнішнього середовища, знаходять своє інтегральне відображення в зміні характеристик БЕР, проте фізіологічна інтерпретація цих характеристик утруднена неявним характером зв'язків між регуляторними механізмами у рослин [7].

Таким чином, можна зробити висновок про те, що залежність характеристик СБЕР від параметрів оточуючого середовища має складний характер, проте дозволяє використовувати ці характеристики як показники життєдіяльності тканин рослин при фотосинтезі.

1.3.4. Зв'язок світлозалежних біоелектричних реакцій з фізіологічними характеристиками і процесами в рослинах

Осциляторний характер біоелектричних характеристик спостерігається на різноманітних рівнях ієрархій систем регулювання – від рівня окремих органел до рівня організмів [43,147-151], при чому на клітинному рівні у рослин незгасаючі коливання БЕП спостерігалися лише у деяких випадках [140,152]. Як вважає більшість дослідників, коливання мембранного потенціалу – основи біоелектричних реакцій – виникає внаслідок наявності зворотного зв'язку між іонною помпою та метаболічним циклом [127,153], наслідком чого є періодична зміна концентрації іонів, що веде до коливань мембранного потенціалу, причому в більшості осциляторних систем керуючим елементом є іони Ca^{2+} [124, 154-156].

На рівні організму у рослин виникнення незгасаючих коливань у рослин спостерігалось досить рідко [92,157], а більшість коливань БЕП, що викликані різкими змінами зовнішніх факторів, мають згасаючий характер [72,91-93,104]. Вірогідність виникнення ендогенних коливань зростає після короткочасної дії несприятливих факторів [92], наприклад, після поливу рослин, що знаходилися в умовах посухи [158], або ж при різкому підвищенні рівня опромінення рослин [43]. Саме той факт, що ритмічні зміни БЕП супроводжувалися періодичними змінами водного режиму рослин з періодами в межах 15-30 хвилин, дозволило більшості дослідників припустити, що основою таких автоколивань є синхронна зміна устячкових апертуд. Проте, тезис про обумовленість коливального характеру БЕП мікромоторикою устячкового апарату листів розділяється

не всіма [78], як і тезис про його зв'язок з перехідним характером засвоєння CO_2 [92,94].

На рівні рослинного організму про зв'язок СБЕР з іншими фізіологічними параметрами опосередковано свідчать дослідження реакцій на зміну рівнів опроміненості рослин, що супроводжувалися зміною не тільки БЕП, а й водного та іонних потоків [82,86,124,149,159], фотосинтезу та дихання [108,118,130,160], росту [63,148,161], рухів [123,162], транспірації [163-165], температурних режимів [87,150,166], причому встановлено наявність безпосереднього зв'язку між цими параметрами та характером біоелектричної реакції [41,82,86,87,108,118,123,124,130,149,150,159,162,164,167]. Не підлягає сумніву зв'язок біоелектричних явищ з фотосинтезом, а отже, і з фізіологічними параметрами, що з ним пов'язані. У ряді випадків існування такого зв'язку можна передбачати. Так, постійна часу затримки передачі сигналу від рецептора до ефектора в механізмі устачкової регуляції [166] має вікову динаміку, подібну до вікової динаміки резонансних частот СК БЕП [6] та наведених зміною водного режиму коливань БЕП [139].

Найбільш повне дослідження зв'язку СК БЕП зі змінами інших фізіологічних параметрів було проведено в роботах Л.Є. Никифорової [6, 41,167]. Зокрема встановлено, що при періодичному світловому впливі на резонансній частоті в рослин спостерігаються ритмічні зміни цілого ряду фізіологічних характеристик (рис.1.1.). Ці ритмічні зміни здійснюються одночасно по відношенню друг до друга і до зовнішнього чинника, що збурює, що свідчить про наявність у метаболічних системах багатьох зворотних зв'язків, так що параметр одного регулюючого ланцюга є складовим елементом іншого, що призводить до функціонального підстроювання всього рослинного організму, усіх без винятку фізіологічних процесів.

Таким чином, в умовах ритмічної зміни освітленості в рослинному організмі встановлюється періодичний характер зміни фізіологічних процесів, де опроміненість є чинником синхронізації і забезпечує узгодженість їхніх змін. Коливальний режим, що встановився, відбиває динамічну рівновагу регуляторних систем рослини, їхнє взаємне підстроювання і являє собою особливий фізіологічний стан рослин. Припинення дії світлового чинника, що збурює, призводить до згасання коливань [6]. Прискорення швидкості росту (рис. 1.1.) на підвищення і на зниження рівня опроміненості можна спостерігати і при аналізі даних інших дослідників [21,22,38].

0 1 2 3 год.

Рис. 1.1. Ритмічні зміни фізіологічних параметрів при періодичному світловому впливі [5]: 1 - біопотенціал; 2 - інтенсивність водяного потоку; 3 - температура листа; 4 - діаметр стебла; 5 - швидкість росту; 6 - інтенсивність газообміну; 7 - концентрація іонів K^+ ; 8 - концентрація іонів H^+ у розчині.

Таким чином, можна зробити висновок про наявність зв'язку СБЕР зі змінами більшості важливих фізіологічних параметрів рослинних організмів, при тому що саме параметри біоелектричних реакцій є найбільш інформативними і придатними для контролю стану рослинних організмів. СБЕР, як величина, що є пов'язаною з енергетичною відповіддю рослинної тканини, є одним з найшвидших та найчутливіших до зміни параметрів середовища показників. Основним недоліком, що запобігає широкому використанню цього параметру, є низька відтворюваність СБЕР. Аналіз дозволив виявити 4 джерела дисперсії: неточність методів та апаратури, неіндифіковані впливи середовища, дисперсія відтворення реакцій окремої рослини та внутрішньосортова дисперсія. Остання характеризує неоднорідність рослин у межах сорту, однак застосування АЧХ (спектральних характеристик), інтегральний характер яких дозволяє позбавитися дисперсії відтворення, дозволяють звести дисперсію до мінімуму (що неможливо для окремих СБЕР) і виявити генотипічну різницю між сортами [7].

Дослідженням зміни характеристик СБЕР рослин або окремих їх органів при розвитку присвячено досить небагато робіт [6,136,137,139]. При помітній уривчастості наявних даних можна, тим не менш, знайти деякі спільні риси. Так, в цілому при розвитку листа рослини спосте

рігається досить швидке зменшення значення частоти зміни рівнів опроміненості та відповідних СК БЕП, що відповідає максимуму їх амплітуди, при чому після досягнення деякого максимального значення по мірі старіння листа спостерігається повільне зменшення цієї частоти. Подібну ж динаміку при дослідженні процесів адаптації рослин до температурних стресів було виявлено для постійної часу затримки передачі сигналу від рецептора до ефектора в механізмі устячкової регуляції [166], що може вважатися ще одним аргументом на користь дослідників, що вважають основою СБЕР саме синхронну зміну устячкових апертуд [43,94,95,98,146,168,169]. Взагалі ж сама наявність зв'язку СК БЕП з рядом фізіологічних характеристик рослин і наявність залежності останніх від фази розвитку і віку рослин свідчить про наявність залежності і електрореакцій від цих факторів.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що необхідно суттєво доповнити наявні дослідження залежностей типів та характеру СБЕР рослин від генотипічних особливостей та проявів вікових змін у рослин, проте найбільш перспективним напрямком є дослідження саме АЧХ СБЕР.

1.4. Методи та обладнання для періодичного опромінення у біотехнічних системах вирощування рослин у захищеному ґрунті

Не зважаючи на деякі повідомлення про те, що застосування ламп розжарювання з водяними фільтрами, що поглинають надлишок інфрачервоних хвиль, має переваги перед газорозрядними лампами для вирощування рослин для високих рівнів опроміненості [5,22], більшість дослідників рекомендують застосовувати для створення періодичних режимів саме газорозрядні лампи високого тиску, оскільки лампи низького тиску потребують габаритної пускової апаратури та займають багато місця при досить малих рівнях опроміненості [8,9,17,21,25]. Системи зі створенням змінних режимів опромінення з рухомими дзеркалами та відбивачами, а також зі зміною положення ламп в горизонтальній чи вертикальній площинах, або ж з рухом ящиків з рослинами, як і системи зі скануванням, де джерелом світла є високоінтенсивні лампи або лазери практично не вийшли з розряду проектів чи окремих лабораторних установок через підвищену складність експлуатації та вартість, тому практичне значення мають установки з газорозрядними лампами високого тиску, де змінні рівні опромінення створюються за рахунок зміни в часі напруги живлення ламп. При застосуванні періодів зміни опроміненості порядку кількох хвилин та більше не виникає потреби в якійсь спеціальній апаратурі, а переключення джерел світла здійснюється стандартними часозадаючими та програмними пристроями [22,35,36,38], тоді як при періодах, що не перевищують часток секунди чи хвилини необхідним виявилось застосування спеціальної

пускозахисної апаратури [34,37,40,44] і навіть модернізованих ламп зі спеціальними зносостійкими електродами [37,40], що ускладнює перехід на застосування таких режимів в виробничих спорудах захищеного ґрунту.

З наведених раніше даних про зміну фізіологічних характеристик рослини при зміні умов оточуючого середовища та при її розвитку і життєдіяльності випливає, що для створення оптимальних періодичних режимів освітлення рослин у спорудах захищеного ґрунту необхідно мати відповідні системи управління світловими режимами з отриманням інформації про стан рослин. Як вже зазначалося, саме СБЕР, зв'язок характеристик яких з іншими параметрами обговорювався вище, через такі їх позитивні властивості, як універсальність, достовірність, швидкість, досить висока чутливість при мінімальному впливі на об'єкт, можуть бути джерелом інформації про стан рослинного організму [7,73,79,91,104,167]. Як приклад застосування системи з використанням для регулювання частоти зміни рівнів опромінення рослин у відповідності з резонансною частотою СК БЕП слід згадати пристрій, розроблений Л.Є. Никифоровою для здійснення способу опромінення рослин у теплицях [170], де частота зміни рівнів опромінення визначається за допомогою ЕОМ та пристрою управління як середня частота СК БЕП для кількох точок вимірювання БЕП при застосуванні періодів порядку 20...60 хвилин. Як недолік цієї системи слід визнати складність її експлуатації через необхідність забезпечувати надійний контакт вимірювальних перетворювачів з рослинами при їх рухах і рості в виробничих умовах. На думку автора, більш доцільним є застосування адаптивного управління параметрами опромінення за моделлю рослини без необхідності безперервних вимірювань БЕП.

Подальший пошук ефективних діапазонів впливу та вдосконалення методів та вимірювальної апаратури дають небезпідставні надії більш широкого і ефективного застосування установок для створення періодичних режимів опромінення, де б враховувалися вікові та викликані середовищем зміни у фізіологічному стані рослин.

1.5. Визначення напрямків досліджень

З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що одним з найперспективніших шляхів зниження витрат енергії при штучному опроміненні розсади у закритому ґрунті є застосування режимів опромінення з періодичними змінами рівнів опроміненості. Проте, для ефективного застосування таких режимів їх параметри повинні бути обґрунтовані з фізіологічної точки зору та погоджені з параметрами середовища. Разом з тим, для розсади, як об'єкту управління у досить складній біотехнічній системі "розсада-середовище", властива значна нестационарність параметрів.

Тому необхідно визначити найбільш інформативний параметр рослини, який був би придатним для встановлення згідно з його змінами параметрів режимів опромінення, і дослідити залежність цього параметра від внутрішніх та зовнішніх чинників. Аналіз показав, що таким параметром є БЕР рослин на періодичні зміни рівнів опромінення. При цьому для досягнення мінімуму дисперсії та максимуму відтворюваності (що не є властивим для окремих реакцій) доцільно використовувати АЧХ СК БЕП. Проте, параметри АЧХ СК БЕП ймовірно є залежними як від внутрішніх (генотипу, віку і т. п.), так і зовнішніх (параметри середовища) факторів, причому ці залежності не є достатньо вивченими. Постає задача дослідити залежності параметрів АЧХ від зазначених чинників для визначених овочевих культур та використати результати цих досліджень для обґрунтування параметрів періодичних режимів опромінення у біотехнічних системах "розсада-середовище". Крім того, БЕР відіграють вирішальну сигнальну роль як у рамках рослини, так і для ценозу, причому ряд аспектів виникнення та розповсюдження СК БЕП на рівні рослини та в їх системах для овочевих культур залишаються недостатньо вивченими. Звідси постає задача вивчення цих явищ та пошуку можливих шляхів використання сигнальної функції СК БЕП для стимуляції розвитку розсади овочевих культур при періодичному опроміненні. При застосуванні нових технологій вирощування розсади її якість повинна бути як мінімум не гіршою, ніж при використанні традиційних технологій, тому є необхідним також дослідити вплив періодичних режимів на розвиток розсади та показники енергоспоживання.

Також постає задача розробити алгоритм опромінення розсади овочевих культур та відповідні технічні засоби для його реалізації та провести їх випробування в лабораторних та виробничих умовах, а також провести визначення економічної ефективності від впровадження зазначеного алгоритму та засобів у виробництво.

Висновки до розділу

1. Одним з найбільш перспективних напрямків зниження енерговитрат при електроопроміненні рослин в умовах захищеного ґрунту є використання періодичних режимів опромінення, проте, для ефективного електроопромінення необхідно погоджувати параметри режимів з віковою, видовою та сортовою особливостями рослин, параметрами оточуючого середовища та фізіологічними параметрами рослин, що потребує подальших досліджень і перш за все вибору такого параметра стану рослини, що при мінімальному впливі на об'єкт забезпечує максимальну інформацію про стан рослинного організму.

2. Означені вимоги найбільш повно задовольняють СБЕР, оскільки здатність реагувати на світловий вплив зміною своїх БЕП є

універсальною властивістю фотосинтезуючих тканин рослин. АЧХ СБЕР мають більш високу відтворюваність, ніж окремі реакції, дозволяють позбавитися від дисперсії відтворювання і зменшити дисперсію до мінімуму.

3. Є доведеним зв'язок СК БЕП з найважливішими параметрами фізіологічного стану рослин, що дозволяє вибирати найефективніші параметри періодичних режимів електроопромінення за максимумами амплітуд СК БЕП, хоч багато аспектів та й сама природа виникнення та розповсюдження СБЕР ще не до кінця вивчені.

4. Вивчення залежностей параметрів АЧХ та особливостей виникнення та розповсюдження СК БЕП дозволяє обґрунтувати параметри ефективних періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур для біотехнічних систем "розсада-середовище".

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИНАМИ СВІТЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ ПЕРІОДИЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ

2.1. Теоретичні передумови обґрунтування оптимальних періодичних режимів опромінення рослин

Як було вказано в розділі 1, біоелектричні реакції у рослин пов'язані та обумовлені фотосинтетичними реакціями рослинних тканин. Тому періодичні зміни рівнів опромінення, що будуть визначати хід фотосинтетичних реакцій, викликають відповідні СБЕР, включаючи і СК БЕП. Таким чином, необхідно перш за все розглянути особливості фотосинтетичних реакцій при періодичних режимах опромінення. Оскільки фотосинтетичні реакції є надзвичайно складним процесом, у якому задіяні десятки і навіть сотні діючих речовин (що саме по собі надзвичайно ускладнює або й унеможлиблює пошук кількісних рішень), для яких є невідомими не тільки точні значення концентрацій, але під час і точний перелік діючих речовин, і швидкості самих реакцій, то при теоретичному аналізі цих реакцій все ще не можна очікувати отримання рішень з кількісними показниками [20,41,84,94,109,119,146,156,171,172], проте, і якісні рішення, що нині превалюють для фотосинтетичних процесів, мають практичну цінність, оскільки дозволяють значно звузити діапазони пошукових досліджень та вказати основні особливості процесів, що досліджуються.

Розглянемо модель фотосинтетичної активності листа рослини, що виходить з елементарних уявлень про кінетику фотосинтезу [171]. Три стадії фотосинтезу представимо у вигляді трьох узагальнених реакцій: реакції карбоксилювання, реакції отримання проміжного продукту в циклі Кальвіна та реакції регенерації акцептора (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Схема фотосинтезу листа рослини.

Введемо такі позначення: C – концентрація CO_2 в клітині, Q – інтенсивність поглиненої листом ФАР, Π – синтезований продукт, $[A]$, $[X]$, $[H]$, $[B]$, $[P]$ та $[ACO_2]$ – концентрації відповідно акцептора CO_2 , ферменту регенерації акцептора в циклі Кальвіна, відновлювача, проміжного продукту в циклі Кальвіна, продукту синтезу та карбоксилюваного акцептора відповідно, віднесені до одиниці площини листа, k_i – швидкості відповідних реакцій. Для більшої компактності запису позначимо концентрації відповідних реагентів наступним чином:

$$[A]=A; [H]=H; [B]=B; [P]=\Pi; [ACO_2]=M; [X]=X, \quad =\Phi.$$

В останньому з рівнянь швидкість утворення продукту є не що інше, як інтенсивність фотосинтезу на одиницю площі листа. В запропонованій схемі прийнято, що опір устячок та білялистового шару повітря незначний, тобто концентрація CO_2 залишається постійною, а продукт фотосинтезу видаляється з зони реакції миттєво і на її хід не впливають. Сумарні концентрації акцептора в трьох відповідних формах а також ферменту X прийняті постійними :

$$A+B+M=A_0\text{const}; X=X_0=\text{const} \quad (2.1)$$

Вважаємо, що концентрація відновлювача, що утворюється у світловій фазі, пропорційна рівню ФАР [171], тобто

$$H=[H]=k_4Q. \quad (2.2)$$

Приймаємо, що реакції йдуть у відповідності з законом кінетики першого порядку, тоді концентрації складових реакції можна знайти у відповідності з законом діючих мас [172]:

Якщо в перше з рівнянь системи (2.3) підставити $B=A_0-A-M$, що випливає з виразу (2.1), то отримаємо

З другого рівняння системи (2.3) можна знайти

Після диференціювання другого з рівнянь системи (2.3) та підстановки в отримане рівняння виразів (2.4) та (2.5) отримаємо таке диференціальне рівняння

Якщо для скорочення довжини виразів ввести

то загальне рішення рівняння (2.6) матиме такий вигляд [173]

$$M=C_1 \exp[0,5(-(k_1 C+k_2 H+k_3 X)+\lambda)t]-C_2 \exp[0,5(-(k_1 C+k_2 H+k_3 X)-\lambda)t]+(k_1 k_3 C X A_0)/(k_1 k_2 C H+k_1 k_3 C X+k_2 k_3 X H), \quad (2.8)$$

де C_1 та C_2 – постійні, які визначаються початковими умовами.

Підставляємо цей вираз у третє рівняння системи (2.3) і отримаємо

$$\Phi=k_2 H\{C_1 \exp[0,5(-(k_1 C+k_2 H+k_3 X)+\lambda)t]-C_2 \exp[0,5(-(k_1 C+k_2 H+k_3 X)-\lambda)t]+(k_1 k_3 C X A_0)/(k_1 k_2 C H+k_1 k_3 C X+k_2 k_3 X H)\}. \quad (2.9)$$

Якщо врахувати (2.2) та позначити $k_5=k_2 k_4$, а також переписати (2.7) як

$$, \quad (2.10)$$

а також позначимо

$$\tau = -0,5(k_1C + k_5Q + k_3X); \quad T_1 = \tau + \lambda/2; \quad T_2 = \tau - \lambda/2, \quad (2.11)$$

тоді, з врахуванням початкових умов, в залежності від знаку λ_2 та з використанням позначень (2.11), отримаємо такі рішення в загальному вигляді:

при $\lambda_2 > 0$

(2.12)

при $\lambda_2 < 0$

(2.13)

Якщо порівняти рівняння (2.12) та (2.13) при $t \rightarrow \infty$ з наведеними у літературних джерелах [171,174], то бачимо, що з точністю до позначень вони в значній мірі співпадають. При цьому отримані залежності відбивають наявність насичуючих концентрацій CO_2 та рівнів опромінення, що і має місце у дійсності [16,19-21]. Проте, нас цікавить також зміна інтенсивності фотосинтезу при перехідних процесах, вигляд яких визначається знаком λ_2 , який залежить від співвідношень величин, що входять у рівняння (2.7) та (2.10). Якщо ввести позначення

$$a k_1 C; \quad b k_5 Q; \quad c k_3 X, \quad (2.14)$$

то можна побудувати області, в яких перехідний процес при вмиканні світла буде мати коливальний або аперіодичний характер, як це зроблено на рис. 2.2.

Рис. 2.2. Області коливального (1) та аперіодичного (2) рішень в залежності від співвідношення констант (2.14) та відповідні їм криві перехідних процесів а та б.

Кількісний аналіз отриманих співвідношень можна провести лише при наявності точних даних про швидкості реакцій та концентрації відповідних діючих речовин та ферментів, проте і якісний аналіз рівнянь (2.12) та (2.13) дозволяє зробити деякі важливі висновки.

Перш за все, стає зрозумілим, що після деякої визначеної частоти зміни світлових та темнових фаз інтенсивність фотосинтезу, а також і амплітуда пов'язаних з нею біоелектричних реакцій (див. розділ 1), починає стрімко знижуватися.

По-друге, як для аперіодичного, так і для коливального типу перехідного процесу характерна зміна швидкості фотосинтезу та відповідно і ефективності використання світлової енергії, при чому при певних малих тривалостях світлової фази використання світлової енергії буде вкрай не ефективним, а при певних великих тривалостях світлової фази спостерігається значне зниження ефективності використання світлової енергії. Таким чином, існує певний діапазон періодів світлотемнових циклів, для яких характерне найбільш ефективне використання світлової енергії.

До того ж, при коливальному характері перехідного процесу спостерігаються локальні максимуми та мінімуми в залежностях від періоду змін освітленості як інтенсивності фотосинтезу, так і амплітуд СБЕР. По-третє, стає очевидним, що величини ефективних періодів, кількість піків СХ СК БЕР та інші величини залежать від таких факторів, як рівень змінної та постійної складових опроміненості, концентрації CO₂, фази розвитку або віку рослин (очевидно, що з розвитком рослини змінюються як швидкість окремих реакцій, так і концентрації асимілянтів та ферментів), її генетичної специфічності (тобто виду та сорту), температури навколишнього середовища (оскільки від неї залежать як швидкості реакцій, так і концентрації та активність хлоропластів та ферментів [18,19,171]) і навіть від попередніх режимів вирощування рослин, перш за все режимів опромінення, які визначають форму та кількість хлоропластів та концентрацію пігментів [20,42,169,175,176].

Таким чином, з загального розгляду ходу фотосинтетичних реакцій випливає, що як показники ефективності використання променистої енергії для фотосинтезу у рослин, так і параметри амплітудно-частотних характеристик СК БЕП рослин залежать від параметрів оточуючого середовища, віку рослин, їх видової та сортової специфічності, причому ці залежності носять складний багатомодовий характер і їх доцільно визначати з використанням методів активного експерименту.

2.2. Осциляторна модель вищої рослини при наявності СК БЕП як нелінійного електричного контуру

Для можливого використання у системах автоматичного керування параметрами систем підтримання життєдіяльності рослин автором було

запропоновано осциляторну модель вищої рослини при СК БЕП [177,178].

Аналізуючи наведені вище теоретичні положення, результати дослідників [6,7,71] та попередні дослідження автора (див. рис. 2.2) бачимо, що в дослідженому діапазоні факторів, що варіювалися, першому піку АЧХ (рис. 2.3.) можна поставити у відповідність як електричну модель пасивний RLC-контур з нелінійною ємністю з сегнетоелектриком (рис. 2.4 а), яка при досить простій структурі відбиває основні риси модельованого об'єкту.

Рис. 2.3. Залежність амплітуд СК БЕП рослин огірка від частоти ритмозадаючого фактора: 1,2,3 – сорт Естафета у віці відповідно 8, 15 та 20 діб від появи першого справжнього листка.

Для напруги на ємності з досить добрим наближенням можна використати вираз $u_c = (1/C_0)(q + \gamma_0 q)$ [179].

Рівняння, що описує систему на рис. 2.4 а, має вигляд

$$\dots \quad (2.15)$$

Якщо ввести безвимірну змінну $x = q/q_0$, отримаємо

$$\text{EMBED Equation.3} \quad \text{EMBED Equation.3}$$

$$\dots, \quad (2.16)$$

де $\omega_0 = 1/LC_0$, $\gamma = \gamma_0 q_0$, $2\delta = R/L$, $P = U/Lq_0$.

Рис. 2.4. Електрична модель рослини для виникнення світлоіндукованих коливань БЕП для: а) першого піку; б) для другого піку амплітудно-частотної характеристики.

З іншого боку, це диференціальне рівняння другого порядку з кубічною нелінійністю (так зване рівняння Дуффінга) [173,179,180] описує СК БЕП листів рослини, якщо в рівнянні (2.16) взяти:

x – потенціал листа;

P – амплітуда зовнішнього світлового впливу.

Якщо використати метод гармонійного наближення [181], шукаючи рішення у вигляді $x=a \cos(pt)+ b \sin(pt)$, то отримаємо

(2.17)

Постійну складову в рішенні для x доцільно випустити, оскільки величина 2δ є постійною і, таким чином, права частина рівняння (2.16) є непарною функцією $\cos(pt)$ та $\sin(pt)$, тобто $a_0=0$. Якщо провести обчислення коефіцієнтів α_1 та β_1 Фур'є-розкладу нелінійної функції

:

,

де $\tau = pt$, отримаємо

(2.18)

Підставляючи (2.16), (2.17) в (2.18) і порівнюючи коефіцієнти при $\cos(pt)$ та $\sin(pt)$, отримаємо систему рівнянь (2.19), справедливую з точністю до членів, що містять компоненти з частотами $2p, 3p, \dots$ і т.д. в розкладі функції в ряд Фур'є:

(2.19)

де

Після необхідних перетворень отримаємо

$$2A_2^2,$$

або ж

$$(\omega^2 - p^2)2A_2^2 + 4\delta^2 p^2 A_2^2 - P^2 \quad (2.20)$$

де $\omega^2 \omega (1 + 0.75\gamma A_2^2)$ - квадрат частоти вільних коливань для цієї ж системи для консервативного випадку (тобто, при $\delta=0$), що характеризує неізохронність системи.

З рівняння (2.20) легко знайти

$$p^2 \omega^2 - 2\delta^2) \quad .3 \quad (2.21)$$

Отримана залежність у загальному вигляді показана на рис. 2.5. З аналізу ходу кривих бачимо, що вони досить добре відповідають експериментальним даним.

В зоні, що виділена, при $P > P_{\text{крит}}$ криві відповідають нестійким коливанням і буде мати місце так зване "перекидання" при різних напрямках зміни частоти зовнішнього впливу. В експерименті таке явище не спостерігалось, ймовірно, через інерційність СК БЕП та приладів вимірювання БЕП; також можливо, що амплітуда P була менша за критичну.

Рівняння, подібні до (2.16), так звані рівняння Дуффінга, достатньо добре описують різноманітні механічні, оптичні та радіофізичні системи, при чому при деяких параметрах рівняння і в самих системах спостерігаються такі явища, як хаотичні коливання, помноження періоду коливань (у тому числі і біфуркація періоду) тощо [141,181]. Для СК БЕП у рослин також у дослідях спостерігалось явище біфуркації для кукурудзи, рослини з типом фотосинтезу C_4 , а інших параметрів і для рослин з фотосинтезом типа C_3 . [87,182]. Слід зауважити, що в подібних системах при деяких умовах також можуть мати місце коливання з кратними частотами, в тому числі і параметричні [180,181,183].

В рівнянні (2.16) величина ω_0 характеризує ефективність та швидкодію ланки зворот нього зв'язку, в чому і полягає біологічний сенс коефіцієнта ω_0 , та визначає осциляторні властивості перехідних БЕР. Коефіцієнт δ характеризує дисипативні втрати в системі і його біологічний сенс ймовірно полягає в зв'язку $\Delta CO_2 \leftrightarrow \Delta \Psi$ (зміна концентрації CO_2 -

градієнт водного потенціалу). Цей коефіцієнт визначає швидкість згасання перехідної СБЕР у відповідь на ступінчасту однократну зміну опроміненості: чим менше δ , тим довше зберігається коливальний характер перехідної реакції, а при великих δ коливальність перехідної СБЕР взагалі відсутня і перехід на новий рівень БЕР має експоненціальний характер.

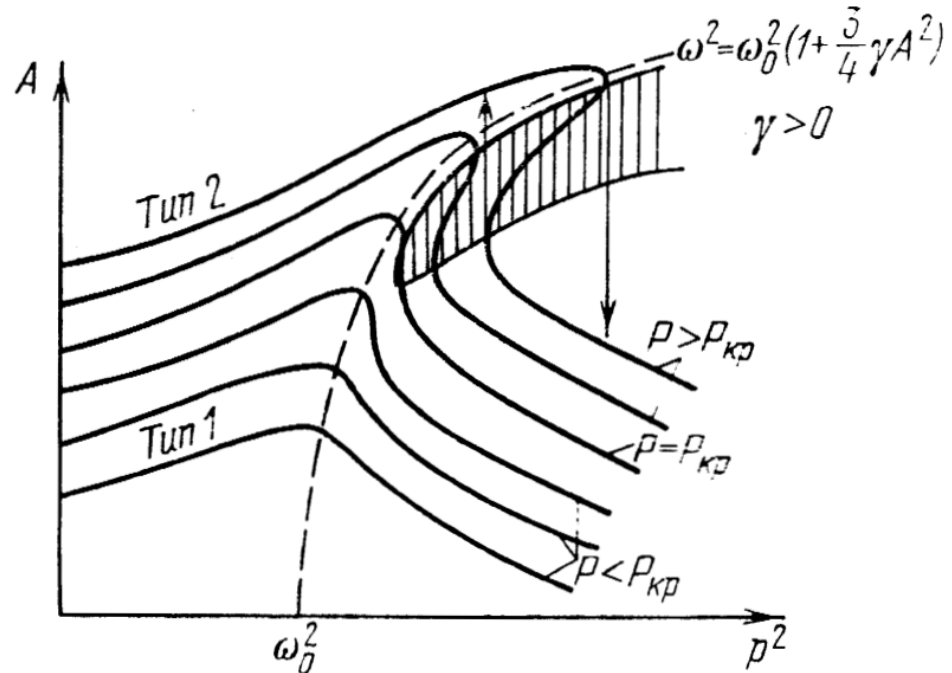


Рис. 2.5. Сімейство резонансних кривих для нелінійного контуру (рис. 2.4 а) [181].

Другому піку (і відповідній йому системі) можна поставити у відповідність як електричну модель пасивний RLC-контур з нелінійним опором (рис. 2.4 б) [179,181], якому відповідає диференціальне рівняння:

$$\text{EMBED Equation.3} \quad (2.22)$$

де $\omega_0^2 = 1/LC$, $2\delta\omega_0 = R_0/L$.

Позначення у рівнянні (2.22) аналогічні відповідним для рівняння (2.16). Рішення для вимушених коливань для даної системи провадимо методом гармонічного наближення [180,181].

Розглянемо коливальну систему, що описується рівнянням виду:

$$(2.23)$$

де

,

при малих значеннях функції
рівняння (2.23) у вигляді:

шукаємо наближене рішення

$$, \quad (2.24)$$

Підставляючи (2.23) в (2.24) і порівнюючи коефіцієнти при $\cos(pt)$ та $\sin(pt)$, отримаємо систему рівнянь (2.25), справедливу з точністю до членів, що містять компоненти з частотами $2p, 3p, \dots$ і т.д. в розкладенні

функції в ряд Фур'є:

$$, \quad (2.25)$$

де ;

В даному випадку, з урахуванням (3.24), підставимо вираз для x в рівняння (2.23) та використовуючи співвідношення (3.25) отримаємо систему рівнянь (2.26) з якої можна визначити значення величин a_0, a, b :

$$(2.26)$$

де .

З першого рівняння системи (2.26) знаходимо, що:

Отриманий вираз дає постійне зміщення (значення БЕП), яке не впливає на значення амплітуди та частоти коливань.

З останніх двох рівнянь системи (2.26) можна отримати такий вираз:

,

звідки:

(2.27)

З рівняння (2.27) бачимо, що значення резонансної частоти залишається незмінним при будь-яких значеннях зовнішньої сили. Нема необхідності вирішувати це рівняння відносно A , оскільки воно є придатним для побудови резонансних кривих. Як можна побачити з рівняння (2.27), амплітуда та частота коливань не залежать від параметра β рівняння (2.23), який, таким чином, можна не враховувати та не визначати.

Якщо рівняння (2.27) вирішити відомими методами як бікубічне відносно A^2 , то отримаємо

Подстановкою рівняння приводимо до вигляду

$$s^2 A^4 + w A^2 + \dots = 0,$$

де s та w – відповідно коефіцієнти отриманого рівняння

Дійсний корінь рівняння можна визначити за формулою Кардано :

Повертаємося до змінної A^2 :

За останнім виразом при визначених параметрах можна побудувати відповідну АЧХ після визначення відповідних значень коефіцієнтів рівняння.

Таким чином, можна зробити висновок, що запропоновані моделі рослин при наявності СК БЕП досить точно відбивають основні властивості об'єкта.

2.3. Осциляторна модель вищої рослини як взаємодіючих електричних контурів у випадку розповсюдження СК БЕП

Для взаємодіючих органів однієї рослини або двох окремих рослин в біоценозі можна запропонувати модель, що є дещо подібною до моделей з підрозділу 2.2 (рис. 2.6), для якої будемо мати систему рівнянь, подібних до рівняння (2.16), якщо позначити $\alpha = M/L$:

Рис. 2.6. Електрична модель виникнення світлоіндукованих коливань БЕП для взаємодіючих органів рослини і між рослинами.

$$; \quad (2.28')$$

$$. \quad (2.28'')$$

Рішення для системи будуть подібними до (2.16) або (2.22), але більш складними та менш наглядними і придатними до обчислень, тому доцільніше скористатися приблизним рішенням, подібним до рішення для зв'язаних контурів з постійними ємностями та опорами [181]:

$$A_{1,2}, \quad (2.29)$$

$$\text{де } \omega_{1,2} \omega (1 + 0,75\gamma A).$$

Якщо R_{12}

$$A_1 = A_2. \quad (2.30)$$

Найбільш цікавий випадок має місце при $R_{12}=0$, тобто, коли одна рослина (або один лист) з двох перебуває в темряві. Тоді вираз (2.30) набуде виду:

$$A_1, \quad A_2. \quad (2.31)$$

При $r < \omega_2$ коливання протифазні, а при $r > \omega_2$ - синфазні, що відповідає експериментальним даним. Практично завжди коефіцієнт зв'язку α невеликий і залежить від ступеня розвитку передаючих органів та, ймовірно, від параметрів оточуючого середовища. Визначення параметрів моделі можна здійснити аналогічно подібним з підрозділу 2.2. Визначення коефіцієнту зв'язку можливе за співвідношенням амплітуд коливань.

Тепер в межах запропонованих осциляторних моделей розглянемо процес розповсюдження світлоіндукованих коливань в системі рослин у мікрофотоценозі. В цьому випадку систему можна розглядати як ланцюг з однакових лінійних зв'язаних осциляторів, де як окремий осцилятор береться рослина. В подібній системі вимушені коливання осциляторів

описуються неоднорідним хвильовим рівнянням Клейна-Гордона [180,181]:

$$\Delta \psi + \omega_0^2 \psi = \alpha \psi^3, \quad (2.32)$$

де ω_0 – власна частота коливань окремого осцилятора;
 x – просторова координата;
 α – коефіцієнт зв'язку.

Якщо вважати зсуви від положення рівноваги відносно невеликими, то нелінійність коливань можна не враховувати. Тоді, якщо вважати, що в сталому режимі всі осцилятори коливаються з частотою зовнішньої вимушуючої сили, то рішення рівняння (2.32) треба шукати у вигляді

$$\psi = A(x) \cos(\omega t - \phi), \quad (2.33)$$

де ϕ – зсув за фазою.

Просторове розподілення амплітуд у цьому випадку може бути визначено з виразу

$$\Delta A + \omega_0^2 A = \alpha A^3. \quad (2.34)$$

Розглянемо можливі рішення цього випадку в залежності від значень частоти ω .

Рішення рівняння (2.34) у випадку $\omega < \omega_0$ буде сумою експонент

$$A(x) = C_1 \exp(-x/\lambda) + C_2 \exp(x/\lambda),$$

де C_1 та C_2 – коефіцієнти, що визначаються з граничних умов,

$$\lambda = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad \text{– характеристична довжина.}$$

Таким чином, загальне рішення рівняння (2.34)

$$A(x) = [C_1 \exp(-x/\lambda) + C_2 \exp(x/\lambda)]. \quad (2.35)$$

Аналіз рівняння (2.35) свідчить, що всі осцилятори будуть коливатися з однаковою частотою ω та постійним зсувом за фазою ϕ , причому в системі осциляторів буде розповсюджуватися експоненційна хвиля збудження.

При $\omega = \omega_0$ рішення рівняння (2.34) буде мати вигляд

$$A(x) = C_1 + C_2 x,$$

а загальне рішення рівняння (2.34) тоді буде

$$A(x) = [C_1 + C_2 x]. \quad (2.36)$$

В цьому випадку будемо мати лінійну хвилю збудження.

Нарешті, у випадку $\omega > \omega_0$ амплітуди будуть розподілятися за законом

$$A(x) = C_1 \sin(x\beta) + C_2 \cos(x\beta),$$

$$\beta = \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad \text{– характеристична частота.}$$

а загальне рішення рівняння (2.34) тоді буде, якщо ввести зсув за фазою ψ

$$A(x) = [C \sin(\beta x + \psi)]. \quad (2.37)$$

В останньому випадку при близькості значень частот характерна частота буде доволі малою.

Порівняння рішень показує, що найбільш ефективно хвиля збудження розповсюджується при $\omega \approx \omega_0$. При цьому слід враховувати, що швидкість розповсюдження збудження обмежена швидкістю передачі електричної хвилі від одної рослини до іншої при включенні та вимкненні світла, яка за даними дослідів С.М. Маслоброда [75] дорівнює 0,92-1,08 см/с. Наявність загальної для ценозу біоелектричної реакції у вигляді доволі повільної хвилі збудження або імпульсу обумовлена з біологічної точки зору необхідністю мати універсальну сигнальну систему, що забезпечує цілісність ценозу [1,18,19,75,78-80,84]. З іншого боку, наявність загального зовнішнього чинника для взаємодіючих біотехнологічних об'єктів веде до вирівнювання їх параметрів та розвитку. за принципом біологічної доцільності [1,20,183,184], органів для передачі збудження, якими є перш за все коренева система рослин [19,75,84,185].

Таким чином. при вирощуванні розсади овочевих культур (особливо безгорщечковим методом) при використанні періодичних режимів опромінення, особливо при застосуванні частот, близьких до власних частот окремих рослин, що виступають у ролі взаємодіючих осциляторів, можна очікувати поліпшення таких показників, як вирівненість розсади та розвиненість кореневої системи рослин.

Висновки до розділу

1. Теоретичний аналіз основних реакцій, що відбуваються в рослинних тканинах, що фотосинтезують, доводить, що існують певні діапазони періодів світлотемнових циклів, для яких характерне найбільш ефективне використання рослинами світлової енергії.

2. Виявлено, що внаслідок суттєвої нестаціонарності параметрів біотехнічного об'єкта управління, яким є система "розсада-середовище", конкретні параметри ефективних періодичних режимів опромінення ймовірно будуть залежати як від параметрів середовища так і від параметрів рослин, включаючи їх генотипічні особливості та умови формування. причому ці залежності носять складний багатомодовий характер і їх доцільно визначати з використанням методів активного експерименту.

3. Запропоновано моделі рослин при виникненні СК БЕП як простих послідовних електричних контурів та наведено рішення диференціальних рівнянь, що їх описують.

4. Розглянута модель для процесу розповсюдження світлоіндукованих коливань в системі рослин у мікрофотоценозі як ланцюга з однакових лінійних зв'язаних осциляторів, де як окремий осцилятор береться рослина. З розгляду моделі зроблено висновок, що при вирощуванні розсади овочевих культур (особливо безгорщечковим методом) при використанні періодичних режимів опромінення, особливо

при застосуванні частот, близьких до власних частот окремих рослин, що виступають у ролі взаємодіючих осциляторів, можна очікувати поліпшення таких якісних показників, як вирівненість морфологічних параметрів розсади та розвиненість кореневої системи рослин.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СК БЕП РОСЛИН ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СК БЕП У СИСТЕМАХ РОСЛИН

3.1. Методи та об'єкти досліджень

Метою досліджень АЧХ СК БЕП є:

1) визначення залежностей амплітуд СК БЕП від частоти світлового впливу, тобто побудова АЧХ СК БЕП з наступною локалізацією положень максимумів АЧХ СК БЕП;

2) визначення залежностей періодів та амплітуд, що відповідають максимумам АЧХ СК БЕП для визначення за цими залежностями значень періодів опромінення розсади.

Метою досліджень явища розповсюдження СК БЕП між органами рослини та у системах рослин є виявлення основних закономірностей цього явища та вплив на нього факторів оточуючого середовища для пошуку можливостей його використання для стимуляції розвитку розсади.

Як основні об'єкти досліджень були вибрані по два сорти для трьох культур з роду пасльонових, а саме томатів (сорти Український тепличний 285 та Ласточка), перцю (сорти Подарок Молдови та Данюб) та баклажанів (сорти Алмаз та Донецький урожайний), розсада яких найчастіше вирощується в спорудах захищеного ґрунту України [2,8-10]. В роботі використовувалися рослини віком (відраховуючи від появи першого справжнього листа) від 8 діб (починаючи з цього віку є можливим вимірювати біоелектричні потенціали без особливих складностей навіть при використанні кон тактних вимірювальних перетворювачів) до 55 діб, що визначається агротехнікою вирощування розсади. Рослини для лабораторних досліджень вирощувалися з насіння в суміші землі та піску в співвідношенні 3:1 в контейнерах об'ємом 300 мл по одній рослині або по 6 рослин в контейнерах об'ємом 3 л при рівні опроміненості 50 Вт/м² ФАР з співвідношенням світло/темрява 16/8 годин в кліматичній камері.

Для дослідження особливостей виникнення та розповсюдження світлоіндукованих коливань біопотенціалів між органами рослини були також додатково обрані рослини квасолі. Квасоля має чітко

окреслену морфоанатомічну структуру з трійчастими листами, відносно короткий онтогенетичний цикл та здатність досить легко переходити в автоколивальний режим [92,149,158] і для неї достатньо добре досліджені процеси з циркадною ритмікою [135,186]. Індукція СК БЕП між рослинами вивчалася на баклажанах, томатах, перці та квасолі.

3.1.1. Загальна схема вимірювань

Дослідження проводилися в кліматичній камері KTLK-1250, обладнаною опромінювачами ДРЛФ-400 [47], а також (при дослідженні ряду світлових режимів з періодами зміни рівнів опроміненості менше 15 хвилин) в кліматичній камері, що обладнана лампами розжарювання з проміжним водяним фільтром товщиною не менше 15 см для поглинання надлишку інфрачервоної частини радіації. В кліматичних камерах підтримувалася необхідна температура та вологість повітря в межах, що близькі до агротехнічних вимог, а саме: для томатів температура в межах $18...20^{\circ}\text{C}$, вологість в межах 60...65%, для баклажанів та перцю у віці до 20 діб – відповідно $18...20^{\circ}\text{C}$ та 65...75%, у віці від 20 до 60 діб – відповідно $18...25^{\circ}\text{C}$ та 70...80%, для квасолі – відповідно $20...25^{\circ}\text{C}$ та 60...80%, для огірків - відповідно $18...24^{\circ}\text{C}$ та 70...80%. Вихід за межі цих діапазонів здійснювався лише в окремих дослідках, про що буде вказано окремо у відповідних розділах. Як датчик температури використовували мідний термометр опору ТСМ-6114, робочий діапазон якого знаходиться в межах $-50...+100^{\circ}\text{C}$. Вологість ґрунтової суміші підтримувався, згідно з агротехнічними вимогами, у межах 60...70% граничної польової вологості, лише при проведенні окремих дослідів ці межі порушувалися, про що згадується при викладі результатів таких дослідів.

Рівень опромінення рослин визначався за допомогою приладу SSP-210 PAR sensor head фірми Skye Instruments (США) з датчиком SCP-210 PAR цієї ж фірми, що дозволяє вимірювати безпосередньо рівень фотосинтетично активної радіації з точністю не нижче 1%, має високу спектральну чутливість в діапазоні фотосинтетичної активної радіації в діапазоні від 10-1...103 Вт/м² [18] та регулювався і підтримувався в різних дослідках в межах 0...100 Вт/м².

Отримання гармонічних інфранизких світлових коливань є дещо проблематичним з технічної точки зору, тому в більшості випадків використовувалося близькі до прямокутних періодичні світлові впливи, що практично зводилося до періодичної подачі та зняття напруги на джерелі світла. Вмикання і вимикання світла з необхідною періодичністю провадили за допомогою командного апарату або таймера СТЦ-1. При перших дослідках для побудови АЧХ СК БЕП використовувалися періоди опромінення у діапазоні від 1 до 200 хвилин (що відповідає круговій частоті 0,0005...0,1 рад/с), який потім був обмежений 4,5...75 хвилинами, де знаходилися досліджувані максимуми АЧХ СК БЕП.

3.1.2. Вимірювання біоелектричних потенціалів

Біоелектричні потенціали рослин відводилися переважно з перших справжніх листів рослин, що мають більший зв'язок з кореневою системою та з'являються раніше. При проведенні дослідів з розповсюдження СК БЕП потенціали відводилися і з інших листів, про що відмічено додатково при описі таких дослідів. У всіх випадках відведення потенціалів провадилося з верхньої поверхні листів на відстані 1,5...2,5 см від черешків на відстані 0,5...1,3 см від краю листа в залежності від морфологічної побудови листа. Якщо спостерігався початок невротизації тканини листа у зоні контакту (як правило, через 5...7 діб після встановлення датчиків), то відведення поновлювалося від сусідньої неушкодженої ділянки листа.

Вимірювання поверхневих біопотенціалів рослинних тканин проводилися за допомогою хлорсрібних контактних датчиків ЕВЛ-1МЗ з спеціальними перехідними насадками, що виготовлені разом з електродами (рис. 3.1.).

Рис. 3.1. Електрод з перехідною насадкою: 1 - електрод ЕХСВ; 2 - перехідна насадка; 3 - розчин 1 М КСІ; 4 - поролонова перегородка; 5 - розчин 3% агару; 6 - розчин Кнопа; 7 - гніт; 8 - втулка; 9 - затискач.

Насадки послідовно заповнювалися 1М розчином КСІ, розчином агару на воді та розчином Кнопа як електролита, що з'єднує солевий місток з поверхнею рослини, виходячи з того, що значення вимірюваної різниці потенціалів залежить від концентрації іонів в контактному електроліті. Агаровий блок запобігає дифузії розчину КСІ з солевого містка в контактний електроліт. Проте, засолення контакту все ж з плином часу відбувається, тому розчини мінялися раз у дві доби. Контакт з рослиною здійснювали з допомогою бавовняного гніту, що був закріплений мініатюрною зачіпкою з тонкого оргскла. Площа контакту

електрода з рослиною була у межах 1...2 мм² [7]. Контактні рідинні датчики є працездатними у діапазоні 5...45°C, проте при виході за межі діапазону 8...38°C швидко зростає помилка вимірювань, що в цьому діапазоні не перевищує 1% [7]. Проте, оскільки в проведених досліджах температура завжди залишалася далекою від вказаних меж, то датчик типу ЕВЛ-1МЗ має цілком задовільні характеристики. Вимірювальний електрод підводили до точки контакту за допомогою шарнірного телескопічного маніпулятора та встановлювали на поверхні листа рослини. При встановленні електрода в точці контакту поверхню листа змочували, що підвищувало стабільність вимірів. У випадках переустановлення електродів та при випадковій втраті контакту враховувалося, що перехідний процес триває 0,5-1,0 години, як видно з рис. 3.1. (причому отримані характеристики добре співпадають з даними літературних джерел [75]), тому отримані під час першої години після переустановлення електродів отримані результати не враховувалися, а саме переустановлення та поновлення контактів, а також заміну датчиків з метою поновлення розчинів провадили переважно під час відсутності опромінення рослин.

Другий електрод, який використовувався як референтний, також типу ЕВЛ-1МЗ, занурювався в ґрунт та був захищеним від світла. Різницю потенціалів між електродами фіксували на діаграмній стрічці з допомогою мілівольтметра-самопису типа ПСР-1 з максимальним числом каналів реєстрації 6 (ширина діаграмної стрічки 160 мм, основна похибка запису $\pm 1\%$), який для погодження підключався через іонометр И-102 з високим вхідним опором (1011 Ом). Оскільки вимірювання провадилося звичайно одночасно у кількох точках, то іонометр було підключено у розрив між комутатором самопису та його підсилювачем. При проведенні дослідів в залежності від частоти зовнішнього світлового впливу використовувалися швидкості руху діаграмної стрічки 60, 120, 240 або 360 мм/год.

Рис. 3.2. Перехідні криві встановлення значень біоелектричних потенціалів за допомогою датчиків ЕВЛ-1МЗ:

1 – за даними С.М. Маслоброда [75];

2 - за даними автора (середнє для 6 датчиків).

У випадку, коли необхідно було отримати статистично достовірні результати при одночасному вимірюванні кількох однакових параметрів, було використано метод усереднення при реєстрації БЕП рослин [187], при якому виходи електродів, що закріплюються на морфологічно однорідних ділянках однотипних рослин, з'єднують та підключають до одного виходу самопису, що еквівалентно схемі з паралельним з'єднанням ЕРС і тоді

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}, \quad (3.1)$$

де φ – потенціал в точці вимірювання;

ε_i – ЕРС від i -тої рослини;

γ_i – ваговий коефіцієнт, що відбиває внесок i -тої рослини.

Таким чином, реєструється самописом деяке середньозважене значення БЕП. При підборі однорідних генотипічно та фенотипічно рослин (що і має місце в переважній більшості дослідів) опори i , відповідно, вагові коефіцієнти будуть рівними $\gamma_i = \gamma_j$, і тоді

$$\varphi = \varepsilon_{\text{сер.}} \quad (3.2)$$

У такому випадку приладом реєструється середнє значення потенціалу групи рослин, що забезпечує проведення багатоваріантного дослідів з достатнім числом вибірки за кожним варіантом.

3.1.3. Статистична обробка результатів

Статистична обробка експериментальних даних здійснювалося за допомогою програми однофакторного дисперсійного аналізу на ЕОМ типу "PENTIUM". Обчислення основних статичних характеристик здійснювалося за стандартними формулами [188]:

Середнє арифметичне:

де x_i , $i = 1 \dots n$ - значення i -го елемента вибірки; (3.3)

n - обсяг вибірки.

Дисперсія:

Помилка середньої:

(3.4)

Довірчий інтервал для середнього значення:

(3.5)

де t - теоретичне значення критерію Ст'юдента.

Істотність розходжень між вибірками оцінювалася за t - критерієм Ст'юдента:

(3.6)

(3.7)

У разі, якщо $t_{\text{факт}} \geq t_{\text{теор}}$, розходження між вибірками вважаються істотними. У протилежному випадку вважають, що вони знаходяться в межах випадкових коливань для прийнятого рівня значимості. Величину $t_{\text{теор}}$ визначали з таблиць.

3.1.4. Побудова амплітудно-частотних характеристик СБЕР

Побудова залежності амплітуди коливань від частоти чинника, що задає ритм, здійснювали так: рослини протягом визначеного проміжку часу піддавалися ритмічному світловому впливу з частотою ω при фіксованій освітленості E . Після закінчення перехідного процесу і встановлення стабільних коливань визначали їхню амплітуду, після чого, не змінюючи освітленості, змінювали частоту світлового впливу і т.д., тестуючи в такий спосіб рослини в усьому досліджуваному діапазоні частот. Необхідно визначити, що встановлення сталого значення амплітуд СК БЕП відбувається після 2...3 повних коливань, причому при переході до близьких до попередніх значень частоти достатньо двох [7,75,104,189]. При проведенні дослідів з визначення залежностей періодів та амплітуд, що відповідають максимумам АЧХ СК БЕП, від діючих факторів пошук максимумів вівся при зміщенні частоти у бік, що відповідає більшій амплітуді, а при приблизній рівності амплітуд значення частоти впливу встановлювалося близьким до середньої між двома. При необхідності вивчення нелінійних властивостей в ряді дослідів також провадилося

дослідження залежності амплітуд від частоти світлового фактора, що задає ритм, при зміні частоти в сторону зменшення.

Оскільки СК БЕП є істотно нелінійними, то безпосереднє визначення розміру їх амплітуди не є простим. Тому використовувався наближений метод, що базується на заміні дійсних несинусоїдальних кривих еквівалентними їм синусоїдами (метод еквівалентних синусоїд) [189]. Відповідно до цього методу, амплітуда еквівалентної синусоїди визначалася за формулою:

$$A_e = \frac{f(t) - f(0)}{T} \quad (3.8)$$

де T - період коливань, с;
 $f(t)$ - різниця між текучим і початковим значеннями БЕП, мВ;
 t - час, с.

Обчислення величини A_e здійснювалося на ЕОМ за стандартною програмою [190].

3.2. Аналіз АЧХ СК БЕП рослин

3.2.1. Дослідження залежності амплітуд СК БЕП від частоти світлового впливу

Дослідження амплітудно-частотних (деякі дослідники вживають термін "спектральних", що не змінює суті справи [6,7]) характеристик, що провадилися дослідниками з рослинами кукурудзи [140,142,145,191], квасолі, огірка [6], пшениці [7], бобів та сої [140,145] виявили не тільки наявність одного чи кількох максимумів цих характеристик але й складний характер залежності частот, співвідношень амплітуд та кількості локальних максимумів характеристик від виду, сорту та віку рослин [7,41, 182,191] та деяких параметрів навколишнього середовища [7,41,73,182], при чому кількість локальних максимумів змінювалася навіть для однієї рослини в процесі її онтогенезу [6,7,142], що також було підтверджено дослідженнями автора (рис. 2.3.).

В дослідженнях О.І.Мартиненка [7] було виявлено, що для рослин пшениці характерна наявність трьох локальних максимумів АЧХ з періодами 40-60, 8-12 та 1-2 хвилини відповідно, при чому третій зі згаданих максимумів виявляється переважно лише при стресових зовнішніх впливах на рослину. При зміні зовнішніх чинників (перш за все температури) у досить широкому діапазоні значення частот залишалися досить стабільними, тоді як відповідні амплітуди змінювалися в досить широкому діапазоні [7]. Припущення про те, що спектральну характеристику при СК БЕП можна представити як суперпозицію трьох незалежних коливальних процесів, була також висловлена Л.Є. Никифоровою [6].

За припущеннями дослідників [6,7,191] перший зі згаданих максимумів, що відповідає найбільшому значенню амплітуди, пов'язаний з механізмом устячкової регуляції, що опосередковано підтверджується збігом вікової динаміки цього максимуму з аналогічною динамікою процесу терморегуляції [166].

Оскільки доведено, що максимуму амплітуд СК БЕП відповідає максимальна активізація фізіологічних процесів у рослини (див. рис. 1.1.) і існують, таким чином, деякі загальні частоти світлового впливу, на яких спостерігається максимальна амплітуда відгуку [6,41,167,182], то питання виявлення резонансних частот, дослідження їх особливостей, динаміки і природи набуває великого наукового та прикладного значення.

Очевидно, що максимальній амплітуді зміни фізіологічних параметрів відповідає співпадання частот зовнішнього чинника, що задає ритм, та власної частоти ходу фізіологічних процесів. Через наявність в реальній системі дисипації ця амплітуда завжди обмежена, а відхилення від резонансної частоти веде до поступового зниження амплітуди СК БЕП. Таким чином, при тестуванні рослин зовнішнім ритмозадаючим фактором на різних частотах можна використати для виявлення наявності прихованих коливальних процесів в системах регуляції рослин.

Частота світлового впливу у дослідях лежала у межах від 0,0005 рад/с (при менших частотах час встановлення коливань є неприпустимо великим) до 0,1 рад/с (при більших частотах амплітуди коливань були меншими за 1 мВ). Як зазначалося раніше, максимум, що спостерігається на найнижчих частотах, переважна більшість дослідників пов'язує з механізмом устячкової регуляції, оскільки період власних коливань устячок знаходиться в межах 15...50 хвилин [92,192] (за даними інших дослідників 15-60 [6,182], 30-60 [7] або 15-80 хвилин [139,193,194]).

Як бачимо з рис. 2.3, у ряді випадків безпосередньо визначити наявність та положення другого піку АЧХ досить складно, тому для виявлення прихованих максимумів амплітудно-частотної характеристики, які відповідали б власним частотам регулятивних систем, що не пов'язані безпосередньо з устячковою регуляцією, а також остаточного доведення зв'язку низькочастотного максимуму АЧХ СК БЕП з устячковою регуляцією було проведено досліді при пригніченні динаміки устячок.

При використанні вазелінового блоку спостерігалось різке зниження амплітуди СК БЕП на низьких частотах (рис. 3.3 та 3.4). Аналогічний ефект спричинює і дія специфічного регулятора устячкових рухів – абсцизової кислоти (АБК) (рис. 3.5). Разом з тим, вазеліновий блок практично не спричиняє впливу на характер СК БЕП в області більш високих частот та тим самим дозволив виявити наявність додаткового максимуму, в ряді випадків не дуже помітного.

Рис. 3.3. Залежність амплітуд СК БЕП рослин перцю від частоти ритмозадаючого фактора:

- 1,2 – сорт Подарок Молдови у віці відповідно 20 та 35 діб;
- 3,4 – те ж при обробці вазеліном.

Рис. 3.4. Залежність амплітуд СК БЕП рослин томатів від частоти ритмозадаючого фактора: 1,2 – сорт Ласточка у віці відповідно 20 та 35 діб ; 3,4 – те ж при обробці вазеліном.

Таким чином, підтверджено припущення про можливість представлення залежності амплітуди СК БЕП від частоти світлового впливу як суми трьох компонент [6,7], що стає найбільш очевидним при графічному аналізі кривих, наведеному на рис. 3.6. Першому максимуму (що відповідає найнижчій частоті), таким чином, відповідає саме устячкова регуляція. Природа ж компоненти на більшій частоті поки ще не отримала пояснення, що не викликає сумнівів, проте, цілий ряд даних дозволяє припустити її обумовленість наявністю ланцюга зворотного зв'язку між мембранним потенціалом та рН цитоплазми [136,137].

Рис

. 3.5. Залежність амплітуд СК БЕП рослин баклажанів від частоти ритмозадаючого фактора:

- 1 – сорт Алмаз у віці 26 діб;
- 2 – те ж при обробці АБК.

Це припущення також підтверджується наявністю коливань БЕП на таких же частотах при зміні водного режиму коренів рослин саме при наявності достатнього рівня освітлення рослин з подібною ж віковою динамікою [139]. Незалежність високочастотних компонент підтверджується також дослідженнями залежностей температури листа від частоти фактора, що задає ритм та вікової динаміки терморегуляції [142, 166], з яких випливає наявність збігу тільки для низьких частот.

Рис. 3.6. Графічний аналіз залежності амплітуд СК БЕП рослин перцю від частоти ритмозадаючого фактора (перець сорту Данюб у віці відповідно 30 діб).

3.2.2 Прояви генотипічної специфічності та нестационарності параметрів АЧХ СК БЕП рослин

Як бачимо з наведених даних, залежність амплітуди індукованих світлом коливань БЕП від частоти ритмозадаючого світлового фактору має складний характер і відображає одночасний вплив кількох механізмів, що обумовлюють виникнення градієнтів БЕП рослинної тканини. Конкретні умови проведення досліду та особливості фізіологічного стану рослинного об'єкту визначають конкретний вклад кожного з цих механізмів.

Як видно з рис. 2.3, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 та з літературних джерел [6,7,140,191,192], характер амплітудно-частотних характеристик, в тому числі співвідношення вкладів вказаних механізмів виявляє суттєву залежність від виду та сорту рослини. Так, в межах одного виду для рослин кукурудзи [142,191] та огірка [6] одного і того ж віку спостерігалось варіювання частоти першого (низькочастотного) максимуму аж до 3 раз при суттєвій різниці в максимальних амплітудах. Проте, ці данні потребують уточнення через можливе неврахування інших діючих факторів, зокрема, температури, яка суттєво впливає на значення амплітуд [7,166], та рівня змінного опромінення, який, як змінний вимушуючий фактор для нелінійних систем, повинен впливати як на значення амплітуд СК БЕП, так і на значення резонансних частот [87,169,180,182,195], що і спостерігалось у експерименті (рис. 3.7.).

Суттєвою є різниця у АЧХ для тієї ж рослини у різних стадіях розвитку і в різному віці, тобто, розсада є об'єктом з значною нестационарністю параметрів.

Узагальнюючи власні спостереження та літературні данні можна, разом з тим, виявити деякі загальні закономірності. Так, резонансні частоти, що відповідають як першому, так і другому пікам АЧХ СК БЕП, при розвитку рослини спочатку збільшуються, а потім поступово зменшуються. Розбіжність характеристик в межах окремого сорту менша, ніж в межах окремого виду і т.д..

Втім, дослідження амплітудно-частотних характеристик СК БЕП, у всьому частотному діапазоні при різних співвідношеннях діючих факторів потребують дуже значного обсягу експериментальних досліджень. До того ж, як відзначалося вище, максимуму стимуляції фізіологічних процесів у рослин відповідають максимальні амплітуди СК БЕП, тому для подальших досліджень необхідно саме визначення резонансних частот та амплітуд АЧХ. Тому доцільним є проведення активного експерименту для визначення залежностей резонансних частот та відповідних амплітуд амплітудно-частотних характеристик СК БЕП для розсади овочевих культур від їх віку та факторів зовнішнього середовища з метою визначення найефективніших частот змін рівнів опромінення в залежності

від цих параметрів. Визначення значень амплітуд є необхідним для подальшого визначення параметрів рівнянь та моделей рослин і до того ж не потребує проведення окремих дослідів.

Рис. 3.7. Залежність амплітуд СК БЕП рослин томатів сорту Український Тепличний 285 (35 діб) від частоти ритмозадаючого фактора: 1,2 – відповідно при змінній складовій опромінення 30 та 70 Вт/м² ФАР.

3.3. Планування та проведення активного експерименту для визначення залежностей параметрів АЧХ СК БЕП від параметрів середовища та віку рослин

Досліди з визначення резонансних періодів та амплітуд доцільно провести для перших двох піків амплітудно-частотних характеристик, оскільки через невеликі значення амплітуд поблизу третього піку точність визначення резонансної частоти буде невеликою і, до того ж, здійснювати ефективне опромінення з періодами в 1...2 хвилини наявними засобами складно, особливо в виробничих умовах. Для оцінки залежності параметрів резонансних піків від зовнішніх факторів та побудови рівняння регресії доцільним є проведення багатофакторного експерименту за допомогою теорії планування експерименту за наступними етапами [196,197]:

1. Визначення контрольованих і неконтрольованих факторів;

2. Визначення оптимального типу плану експерименту;
3. Побудова плану експерименту з визначенням меж варіювання факторів;
4. Проведення досліджень;
5. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії;
6. Визначення суттєвих коефіцієнтів у рівняннях регресії;
7. Побудова регресійних рівнянь;
8. Перевірка адекватності моделі.

3.3.1. Визначення вхідних факторів за оглядом літературних джерел та результатів попередніх дослідів

Як зазначалося вище, очевидною є залежність резонансних частот СК БЕП від віку рослини або її окремого органу. Крім того, було виявлено, що для першого (низькочастотного) максимуму спостерігається кореляція між значенням частоти та вмістом пігментів [6,54], водночас було виявлено, що вміст пігментів залежить при змінних рівнях опромінення як від амплітуди коливань освітленості, так і від рівня постійної освітленості (при її наявності) [54], тоді як для другого максимуму такої залежності, як і самого явища депігментації при попередніх дослідях автора не спостерігалося. Оскільки для отримання якісної розсади необхідно запобігти явищу депігментації, то при проведенні дослідів забезпечувався фоновий рівень опромінення 20 Вт/м² ФАР, що дещо перевищує рівень, який відповідає точці врівноваження фото дихання та фотосинтезу для пасльонових [17,19, 20,39,171], як зазначалося вище у підрозділі 1.1. Разом з тим слід зазначити, що попередні досліді автора не виявили суттєвої залежності значень резонансних частот та амплітуд СК БЕП від рівня постійної складової рівня опромінення (принаймні при рівнях змінної складової від 15 до 70 Вт/м² і значеннях постійної складової до 40 Вт/м²), тому постійну складову вирішено не враховувати, що співпадає з рекомендаціями дослідників для інших культур [6,41,198].

Таким чином, вік рослини та рівень змінної складової опромінення доцільно включити до вхідних факторів. Фізичні межі віку рослин визначаються з одного боку мінімальним терміном після появи першого справжнього листа, коли на ньому вже можна встановити датчик БЕП, а з другого – строком отримання придатної для висадки розсади. Для змінної складової опроміненості ці межі визначаються агротехнічними вимогами [8-10,27].

Співвідношення світлової та темної фаз в періоді доцільно прийняти 1:1, оскільки саме це співвідношення є найбільш ефективним з точки зору питомих енерговитрат і, до того ж, саме це співвідношення забезпечує максимальну стимуляцію росту розсади [6,199,200].

Оскільки агротехнічні вимоги передбачають підтримання вологості ґрунту у досить вузьких межах 60...70% ПВ [8-11], а проведення дослідів

має за мету встановлення залежності вихідних величин від вхідних саме в межах, що відповідають нормальним умовам вирощування розсади, а при попередніх дослідях зміна вологості субстрату у межах аж до 45...80% ПВ не чинила впливу на АЧХ СК БЕП рослин, то вологість ґрунту також не включаємо до числа діючих факторів.

Щодо залежності значення резонансних частот від температури, то слід зазначити, що була встановлена достовірна залежність амплітуд СК БЕП (при стабільності значень резонансних частот для другого піку АЧХ) в досить широкому температурному діапазоні при значних змінах амплітуд СК БЕП [7]. Вивчення залежності значень резонансних частот від температури оточуючого середовища раніше не носило систематичного характеру, тому є доцільним включити її до числа вхідних факторів. Метою даної роботи є встановлення параметрів режимів опромінення при нормальних умовах (в тому числі це стосується і температурних режимів) вирощування розсади овочевих культур в умовах захищеного ґрунту, тому температура оточуючого середовища, як фактор, що варіюється, береться в межах близьких до нормальних для різного віку розсади.

Таким чином, виходячи з наведеної вище інформації, для визначення значень резонансних частот та відповідних амплітуд СК БЕП доцільним буде проведення експерименту з трьома вхідними факторами, що контролюються: термін від появи першого справжнього листа; рівень змінного опромінення; температура повітря.

3.3.2. Визначення вхідних факторів за методом експертних оцінок

З метою верифікації вхідних факторів, що ймовірно чинять найсуттєвіший вплив на значення частот та амплітуд, що відповідають пікам АЧХ СК БЕП, вирішено було провести їх оцінку за допомогою опитування експертів у даній галузі науки. Експертам було запропоновано визначити, які фактори, на їх думку, впливають на значення резонансних амплітуд та частот в межах окремого сорту рослини на стадії вирощування розсади при знаходженні вхідних факторів у межах, близьких до агротехнічних вимог. Для перших чотирьох згаданих факторів виставлялися оцінки від 5 до 2 (у порядку значущості), а для п'яті та наступні оцінювалися у 1 бал. Якщо якийсь фактор не згадувався експертом, то такий фактор отримував оцінку 0 балів. Результати експертної оцінки наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 –
Експертні оцінки факторів, що впливають на значення резонансних
АЧХ СК БЕП

Фактори

Експерт	Стадія розвитку	Температура повітря	Температура ґрунту	Вологість ґрунту	Вологість ґрунту	Мінеральне живлення	Склад ґрунту	Посхідна складова опромінення	Змінна складова опромінення
Мартиненко О.І., д. т.н., НАУ, м. Київ	5	4	1	1	1	0	0	2	3
Никифорова Л.Є., к. т.н., ТДАТА, м. Мелітополь	5	3	1	2	0	1	0	1	4
Маслоброд С.М., д. б.н., Ін-т Генетики АН Молдови, м. Кишинів	4	3	0	1	1	1	1	2	5
Шабала С.М., к.б.н., Ун-т Тасманії, м. Хобарт, Австралія	5	4	0	2	1	0	0	1	3
Сума балів	19	13	2	6	3	2	1	6	15

Таким чином, за думкою експертів визначальними факторами при проведенні дослідів будуть саме стадія розвитку рослин (яку можна визначити як час від появи першого справжнього листа), температура повітря та змінна складова рівня опромінення, що за загальною сумою балів значно перевищують оцінку інших факторів, тобто думка експертів загалом співпала з результатами аналізу попередніх дослідів та огляду літературних джерел.

Таким чином, остаточно можна прийняти, що для визначення значень резонансних частот та відповідних амплітуд СК БЕП слід провести повнофакторного експерименту з трьома вхідними факторами, що контролюються:

X1 - термін від появи першого справжнього листа, діб;

X_2 – рівень змінного опромінення, Вт/м² ФАР;

X_3 - температура повітря, °С.

До факторів, що не контролюються слід віднести вплив вимірювальних приладів (перш за все датчиків БЕП) на рослини, мінеральний склад субстрату та його вологість (при підтриманні її в межах агротехнічних вимог), геофізичні впливи, впливи зовнішніх акустичних та електромагнітних полів.

3.3.3. Визначення оптимального типу і плану експерименту та значень рівнів варіювання входних факторів

Оскільки за попередніми даними було відомо, що періоди для обох піків мають явно нелінійну залежність як мінімум від одного з входних факторів – віку рослини, то за рівняння регресії обрано нелінійну залежність, тобто

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{123}X_1X_2X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2,$$

де Y – вихідна функція, тобто періоди і амплітуди першого та другого піків, які в подальшому позначаються відповідно як T_1 та T_2 , A_1 та A_2

Виходячи з того, що положення екстремуму та центральної точки плану були попередньо невідомими, а також з можливості проведення меншого числа дослідів (при повторності $m=1$) було обрано рототабельний центральний композиційний план (РЦКП) другого порядку [196]. Для РЦКП другого порядку характерною є однакова точність прогнозування функції цілі з допомогою рівняння регресії за будь-якою координатою і взагалі у будь-якому напрямку в області факторного простору, що вивчається на рівній відстані від центру експерименту, що слід вважати суттєвою перевагою РЦКП. В рототабельному центральному композиційному плані реалізуються три групи точок факторного простору, кожна з яких розташована в визначеній сфері:

1. Сфера з точками повнофакторного (або дрібнофакторного) експерименту – N_f ;

2. Сфера з зірковими точками – N_α , причому величина зіркового плеча обчислюється як

де n – число факторів;

p – показник дрібності;

3. Сфера з точками у центрі плану – N_0 .

Для кожного з діючих факторів було визначено (з урахуванням існуючих фізичних обмежень на варіювання значень факторів в конкретних умовах експерименту) значення верхнього ($x_{\text{ів}}$), нижнього ($x_{\text{ін}}$) та основного ($x_{\text{і0}}$), – в центрі області експерименту – рівнів відповідних факторів. Було визначено значення відповідних інтервалів варіювання

$$I_i = (x_{iB} - x_{iH})/2. \quad (3.9)$$

Дані про рівні та інтервали варіювання для кожного з факторів наведено у табл. 3.2.

Для зручності запису плану експерименту та обробки його результатів доцільно користуватися кодованими значеннями факторів:

$$\bar{X}_i = (x_{iB} - x_{i0}) / l_i. \quad (3.10)$$

Матрицю РЦКП для числа факторів $k=3$ [196] наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.2 –

Інтервали варіювання та рівні факторів

Фактор	Нульовий рівень	Інтервал варіювання	-1	+1	-α= -1.682	+α= +1.682
X1 – час від появи першого справжнього листа, діб	30	13	17	43	8	52
X2 – рівень змінного опромінення, Вт/м2 ФАР	40	18	22	58	10	70
X3 – температура повітря, °С	22.5	4.5	18	27	15	30

Таблица 3.3 –

Матриця РЦКП для k=3 [196]

[illegible]

18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Проведення експерименту та обробка його результатів

Окремі експерименти за наведеним вище планом провадилися у рандомізованому порядку при визначенні його за допомогою генератора випадкових чисел на ПЕОМ. Результати експериментів з визначення періодів та амплітуд, що відповідають першим двом низькочастотним пікам АЧХ СК БЕП для томатів, перцю та баклажанів наведені відповідно у табл. 3.4, 3.5 та 3.6 у порядку, що відповідає табл. 3.3.

Таблиця 3.4 –

Результати експериментів для томатів

	Сорт Український тепличний 285				Сорт Ласточка			
	Пік 1		Пік 2		Пік 1		Пік 2	
	Період , хв.	Амплітуда, мВ.	Період , хв.	Амплітуда, мВ.	Період , хв.	Амплітуда, мВ.	Період , хв.	Амплітуда, мВ.
1	47,0	2,60	8,00	1,00	45,00	2,00	9,00	1,20
2	58,0	6,00	7,00	2,40	55,00	5,80	8,50	2,20
3	35,0	5,80	7,50	1,60	36,00	5,40	9,00	1,80
4	45,0	10,80	7,00	4,60	47,00	9,80	8,00	2,40
5	38,0	3,80	8,00	1,20	41,00	2,80	9,00	1,40
6	48,0	6,60	6,50	2,80	49,00	7,00	8,50	2,60
7	33,0	6,40	7,50	2,80	39,00	6,20	8,50	2,40
8	45,0	11,40	6,00	4,80	52,00	10,80	8,00	4,40
9	61,0	3,80	9,50	1,40	63,00	2,60	11,50	1,40
10	60,0	7,20	8,00	2,80	60,00	6,80	8,50	3,00
11	30,0	4,40	6,50	1,40	37,00	3,80	8,50	1,20
12	24,0	11,20	4,50	4,00	25,00	10,40	6,00	3,80
13	31,0	5,80	6,00	2,20	34,00	5,20	7,50	2,40
14	26,0	7,20	5,00	3,40	27,00	6,80	6,00	3,00
15	32,0	6,60	5,00	3,00	28,00	5,80	6,00	2,80
16	31,0	6,00	6,00	2,40	33,00	5,60	6,50	2,40

1 7	29,0	6,20	6,00	2,60	29,00	6,40	7,00	3,00
1 8	26,0	7,00	5,00	2,60	34,00	5,20	7,50	2,60
1 9	28,0	7,20	5,50	2,60	29,00	6,60	7,50	3,00
2 0	27,0	7,20	6,50	2,80	30,00	6,20	6,00	2,80

Обчислення необхідних констант, визначення коефіцієнтів регресії, їх значимості та перевірка адекватності моделей провадилися за стандартною методикою [196,197]. Наведемо розрахункові формули для даного випадку, а саме з урахуванням, що число факторів $n=3$ а число повторних дослідів $m=1$ [196].

Спочатку визначаємо необхідні константи РЦКП:

де ω – номер сфери (1,2,3);

r_ω – радіус кожної сфери;

N_ω – кількість точок на кожній сфері.

Таблиця 3.5 –

Результати експериментів для перцю

	Сорт Подарок Молдови				Сорт Данюб			
	Пік 1		Пік 2		Пік 1		Пік 2	
	Період , хв.	Амплі туда, мВ.	Період , хв.	Амплі туда, мВ.	Період , хв.	Амплі туда, мВ.	Період , хв.	Амплі туда, мВ.
1	56,00	3,00	13,00	1,20	42,00	3,40	12,00	1,20
2	52,00	5,80	11,50	2,80	58,00	7,00	12,50	2,80
3	50,00	7,00	12,00	3,20	38,00	7,80	13,00	2,60
4	46,00	10,40	11,00	4,00	50,00	7,60	12,00	3,80
5	51,00	3,60	12,50	2,00	37,00	3,40	11,00	1,80
6	48,00	8,20	11,50	3,40	53,00	8,80	12,00	3,40
7	45,00	7,80	12,50	3,80	35,00	7,20	11,50	3,60
8	40,00	13,20	11,00	4,20	47,00	11,20	11,00	4,20
9	69,00	3,00	16,00	1,00	65,00	4,00	17,50	1,60
1 0	59,00	7,40	12,00	3,40	63,00	8,20	11,00	3,80
1 1	37,00	3,80	8,50	1,40	41,00	5,20	8,00	1,60

1 2	28,00	11,00	7,00	4,40	31,00	12,20	7,50	3,80
1 3	36,00	6,00	8,00	2,20	39,00	8,00	8,00	3,00
1 4	31,00	7,80	7,00	3,00	32,00	8,20	7,00	3,80
1 5	36,00	7,20	8,50	2,80	39,00	8,80	8,50	3,00
1 6	32,00	6,40	6,50	3,00	37,00	9,00	7,00	3,40
1 7	32,00	7,60	7,00	2,60	40,00	8,20	6,80	3,60
1 8	31,00	6,80	6,00	2,40	34,00	7,80	6,00	4,00
1 9	36,00	7,00	7,50	2,60	36,00	7,80	7,50	3,60
2 0	35,00	6,40	8,00	2,80	41,00	8,00	8,00	3,20

Для обчислення коефіцієнтів квадратичного рівняння регресії застосовувалися рівняння:

;

;

;

де Y_g – значення вихідної величини в g-й строчці матриці плану РЦКП.

Таблиця 3.6 –

Результати експериментів для баклажанів

	Сорт Алмаз				Сорт Донецький урожайний			
	Пік 1		Пік 2		Пік 1		Пік 2	
	Період , хв.	Амплі туда, мВ.	Період , хв.	Амплі туда, мВ.	Період , хв.	Амплі туда, мВ.	Період , хв.	Амплі туда, мВ.
1	43,00	4,40	8,00	1,40	44,00	4,00	9,50	1,20
2	54,00	11,80	10,00	3,00	57,00	9,80	11,00	2,40
3	38,00	9,00	8,50	2,40	41,00	7,20	8,50	2,60
4	49,00	16,00	11,00	4,00	51,00	11,40	11,00	4,00
5	40,00	6,20	8,00	1,80	42,00	5,80	9,00	1,60
6	51,00	13,80	10,50	3,40	54,00	10,20	11,50	3,20

7	34,00	10,40	8,50	3,00	37,00	8,60	9,00	3,40
8	46,00	16,80	9,50	4,60	49,00	13,00	10,50	4,40
9	70,00	3,20	13,00	2,00	73,00	6,20	13,00	1,80
10	62,00	12,00	12,50	4,80	69,00	8,40	13,00	4,60
11	33,00	4,20	8,50	1,60	35,00	7,20	9,00	1,60
12	27,00	13,20	7,50	5,40	29,00	14,40	8,50	5,80
13	34,00	9,20	7,50	4,00	36,00	7,80	9,00	3,00
14	27,00	12,40	7,00	5,00	29,00	11,40	8,50	4,40
15	28,00	9,60	6,50	5,20	29,00	10,80	7,50	4,40
16	33,00	10,60	7,50	5,40	33,00	9,60	8,00	4,20
17	29,00	12,80	7,00	4,80	29,00	8,60	8,50	4,60
18	27,00	11,80	7,00	4,40	34,00	9,00	9,00	3,40
19	32,00	10,60	8,00	4,80	30,00	11,20	9,50	4,20
20	28,00	10,80	8,50	5,00	31,00	8,80	9,50	4,00

В даному випадку дисперсія відтворення визначається за результатами $N_0=6$ дослідів в центрі експерименту:

Тоді значення дисперсій коефіцієнтів обчислюються як

Далі за стандартною методикою [188,190,196,197] за допомогою t-критерія Ст'юдента перевірялася статистична значимість коефіцієнтів рівняння регресії, а потім, після відкидання незначущих коефіцієнтів, визначалася дисперсія адекватності моделі

де d – кількість значимих коефіцієнтів в рівнянні;

- розраховане значення функції відгуку, розраховане для умов g -го досліджуваного плану.

За допомогою F-критерія Фішера перевірялася гіпотеза адекватності отриманої математичної моделі за відомою методикою [188,190,197].

Обчислення провадилися на ПЕОМ з використанням електронних таблиць Excel програмного пакету Microsoft Office – 98 [201]. Результати обчислень для кожного з рівнянь вміщено в Додатку А.

Оскільки при проведенні дослідів одночасно з резонансними періодами визначалися і відповідні резонансні амплітуди, то рівняння регресії були визначені і для відповідних амплітуд. В подальшому індекси "1" відповідають першому, більш низькочастотному піку, а "2" – другому, A – амплітудам, T – періодам.

Наведені нижче рівняння регресії для нормованих значень містять лише значимі коефіцієнти [177].

Для томатів сорту Український тепличний 285 рівняння регресії

$$T1=28,654+3,024X1-3,154X2-2,041X3+2,125X2X3+12,123X12;$$

$$A11+1,965X2+0,372X3+0,475X1X2-0,406X12+0,407X22;$$

$$T2=5,642-0,514X1+1,207X12;$$

$$A2=2,660+0,758X1+0,789X2+0,279X3+0,250X1X2-0,174X12.$$

Для томатів сорту Ласточка рівняння регресії

$$T1=30,335+2,705X1-2,649X2+2,250X2X3+11,783X12;$$

$$A11+1,881X2+0,450X3-0,385X12+0,464X22;$$

$$T2=6,726-0,552X1+1,253X12;$$

$$A2=2,769+0,548X1+0,584X2+0,292X3+0,250X2X3-0,231X12.$$

Для перцю сорту Подарок Молдови рівняння регресії

$$T1=33,476-2,402X1-3,011X2-1,972X3+11,699X12;$$

$$A11+2,189X2+0,668X3+0,475X1X3-0,410X12+0,368X22;$$

$$T2=7,176-0,858X1+2,805X12;$$

$$A2=2,681+0,603X1+0,794X2+0,249X3-0,225X1X2-0,180X22.$$

Для перцю сорту Данюб рівняння регресії

$$T1=37,811+3,853X1-2,695X2-1,928X3+9,130X12;$$

$$A11+1,682X2-0,650X1X2+0,750X1X3-0,880X12;$$

$$T2=7,229-0,800X1+2,858X12;$$

$$A2=3,463+0,637X1+0,637X2+0,274X3-0,265X12-0,265X22.$$

Для баклажанів сорту Алмаз рівняння регресії

$$T1=29,414+2,309X1-2,276X2-1,719X3+13,216X12;$$

$$A11+2,279X2+0,790X3-0,761X12;$$

$$T2=7,414+0,524X1+1,845X12;$$

$$A2=4,955+0,813X1+0,790X2+0,256X3-0,706X12-0,671X22-0,318X32.$$

Для баклажанів сорту Донецький урожайний рівняння регресії

$$T1=30,931+2,948X1-2,130X2-1,581X3+14,329X12;$$

$$A11+1,648X2+0,781X3-0,932X12;$$

$$T2=8,665+0,586X1+1,479X12;$$

$$A_2=4,151+0,725X_1+0,956X_2+0,330X_3-0,466X_{12}-0,289X_{22}-0,289X_{32}.$$

Для переходу до більш зручних у практиці рівнянь регресії, де вхідні фактори виражено у фізичних одиницях скористаємося рівняннями (3.16), після підстановки яких в наведені вище рівняння регресії у нормованих одиницях отримаємо такі рівняння.

Для томатів сорту Український тепличний 285 рівняння регресії

$$T_{127,1}=-4,071x_1-0,765x_2-1,544x_3+0,0261x_2x_3+0,0721x_{12};$$

$$A_{11}=-0,053x_2+0,083x_3+0,0021x_1x_2-0,0024x_{12}+0,0013x_{22};$$

$$T_2=13,3-0,469x_1+0,0071x_{12};$$

$$A_2=-1,89+0,078x_1+0,012x_2+0,062x_3+0,0011x_1x_2-0,0010x_{12}.$$

Для томатів сорту Ласточка рівняння регресії

$$T_1=117,7-3,975x_1-0,772x_2-1,111x_3+0,0278x_2x_3+0,0697x_{12};$$

$$A_1=-3,14+0,273x_1-0,010x_2+0,10x_3-0,0023x_{12}+0,0014x_{22};$$

$$T_2=14,7-0,487x_1+0,0074x_{12};$$

$$A_2=0,29+0,124x_1-0,035x_2-0,058x_3+0,0031x_2x_3-0,0014x_{12}.$$

Для перцю сорту Подарок Молдови рівняння регресії

$$T_1=117,9-4,338x_1-0,167x_2-0,438x_3+0,0692x_{12};$$

$$A_1=-0,21+0,096x_1+0,031x_2-0,096x_3+0,0081x_1x_3-0,0024x_{12}+0,0011x_{22}$$

;

$$T_2=24,1-1,062x_1+0,0166x_{12};$$

$$A_2=-1,99+0,085x_1+0,029x_2+0,055x_3-0,00096x_1x_2+0,00056x_{22}.$$

Для перцю сорту Данюб рівняння регресії

$$T_1=93,4-2,961x_1-0,150x_2-0,428x_3+0,0543x_{12};$$

$$A_1=1,82+0,248x_1+0,177x_2-0,385x_3-0,0028x_1x_2+0,0128x_1x_3-0,0052x_{12}$$

;

$$T_2=20,6-0,954x_1+0,0169x_{12};$$

$$A_2=-3,51+0,143x_1+0,101x_2+0,061x_3-0,0016x_{12}-0,00082x_{22}.$$

Для баклажанів сорту Алмаз рівняння регресії

$$T_1=108,1-4,514x_1-0,126x_2-0,382x_3+0,0782x_{12};$$

$$A_1=-9,41+0,513x_1+0,127x_2+0,176x_3-0,0045x_{12};$$

$$T_2=16,0-0,615x_1+0,0109x_{12};$$

$$A_2=-15,00+0,314x_1+0,209x_2+0,764x_3-0,0042x_{12}-0,00211x_{22}-0,$$

$$0157x_{32}.$$

Для баклажанів сорту Донецький урожайний рівняння регресії

$$T_1=113,1-4,860x_1-0,118x_2-0,351x_3+0,0848x_{12};$$

$$A_1=-6,66+0,458x_1+0,092x_2+0,174x_3-0,0055x_{12};$$

$$T_2=15,2-0,480x_1+0,0088x_{12};$$

$$A_2=-12,43+0,221x_1+0,124x_2+0,715x_3-0,0028x_{12}-0,00092x_{22}-0,$$

$$0141x_{32}.$$

Визначаючи за цими рівняннями резонансний період зміни рівнів опромінення виходячи зі значень вхідних факторів і встановлюючи ці значення за допомогою часозадаючих приладів керування опроміненням можна досягнути максимального стимулюючого та енергозберігаючого ефекту. Автором розроблено програму розрахунку значень оптимальних

параметрів на алгоритмічній мові високого рівня TurboPascal [202], яка наведена у Додатку В. Запропонований спосіб визначення періоду має ту перевагу перед іншими способами [170], що не потребує вимірювання біоелектричного потенціалу рослин в виробничих умовах, яке не є достатньо надійним та потребує нагляду за датчиками.

Аналіз отриманих рівнянь регресії демонструє наявність видової та сортової специфічності для параметрів спектральних характеристик СК БЕП, хоч і спостерігаються деякі спільні риси, а саме вигляд залежностей для резонансних періодів другого та першого піків та найбільший вплив на їх значення саме фактору віку рослин.

3.4. Визначення параметрів моделей рослин

Як бачимо, параметри АЧХ рослин при СК БЕП, як і належить параметрам нестационарного об'єкту, змінюються. Відповідно в процесі розвитку рослин і зміні деяких параметрів оточуючого середовища змінюються параметри моделей, наведених у підрозділі 2.2. Тому необхідно обчислити відповідні величини ω_0 , γ та δ рівнянь 2.16 та 2.22.

Якщо взяти два значення кругових частот ω_1 та ω_2 , амплітуд коливань A_1 та A_2 та зовнішніх сил P_1 та P_2 , то можна визначити параметри рівняння 2.16:

(3.11)

з яких можна знайти значення опорів, ємностей та індуктивностей. При розрахунку слід мати на увазі, що для того, щоб відразу отримати значення амплітуд коливань у фізичних одиницях, при чому за вихідну величину для контуру взяти напругу на ємності у мВ, рівну значенню i для СК БЕП рослини, а амплітуду зовнішньої вимушуючої сили P взяти у мілівольтах такою, що дорівнює половині значення змінної складової опроміненості у Вт/м² ФАР, що буде найбільш зручним з можливих варіантів, то слід обрахувати для рівнянь (3.11) та (3.12) значення вимушуючої сили P як

$$P=0,5 \times 2 \omega_{рез}^2,$$

де $\omega_{рез}$ – частота, що відповідає резонансу.

Таким чином можна розрахувати параметри моделей рослин при СК БЕП. Визначення цих параметрів ведеться у рамках згаданої раніше програми розрахунку значень параметрів на алгоритмічній мові високого рівня TurboPascal [202], яка наведена у Додатку Б.

Аналогічно розраховуємо параметри рівняння, що відповідає другому піку. Якщо взяти два значення (кругові частоти завжди дорівнюють ω_0), амплітуд коливань A_1 та A_2 та зовнішніх сил P_1 та P_2 , то можна визначити параметри рівняння (2.22):

(3.12)

з яких можна знайти значення опорів, ємностей та індуктивностей. Розрахунок параметрів також можна вести за згаданою вище програмою.

Для деяких значень віку рослин було проведено обчислення з визначенням коефіцієнтів рівнянь (2.16) та (2.22), які наведені в табл. 3.6 та 3.7 і за їх даними побудовані відповідні графіки залежностей амплітуд СК БЕП для 1-го та 2-го піків для різних значень змушуючих сил (тобто для різних значень змінної складової опроміненості), які були побудовані за допомогою ПЕОМ з використанням програмного пакету MathCad [203] і показані на рис. 3.8 та 3.9.

Таблиця 3.6 –

Ідентифікація коефіцієнтів рівнянь для томатів сорту Ласточка

Вік рослини, діб	Перший пік (рівняння 3.5)			Другий пік (рівняння 3.9)		
	2δ	ω_0	γ	$2\delta_0$	ω_0	γ
15	$1,405 \cdot 10^{-2}$	$8,266 \cdot 10^{-6}$	$1,464 \cdot 10^{-2}$	$7,229 \cdot 10^{-3}$	$1,462 \cdot 10^{-4}$	512,5
30	$1,457 \cdot 10^{-2}$	$1,379 \cdot 10^{-5}$	$2,466 \cdot 10^{-2}$	$5,864 \cdot 10^{-3}$	$2,719 \cdot 10^{-4}$	571,5
45	$6,242 \cdot 10^{-3}$	$5,031 \cdot 10^{-6}$	$7,692 \cdot 10^{-3}$	$1,349 \cdot 10^{-3}$	$2,018 \cdot 10^{-4}$	948,0

Таблиця 3.7 –

Ідентифікація коефіцієнтів рівнянь для перцю сорту Подарок

Молдови

Вік рослини, діб	Перший пік (рівняння 3.5)			Другий пік (рівняння 3.9)		
	2δ	ω_0	γ	$2\delta_0$	ω_0	γ
15	$1,173 \cdot 10^{-2}$	$5,420 \cdot 10^{-6}$	$1,130 \cdot 10^{-2}$	$7,662 \cdot 10^{-3}$	$7,735 \cdot 10^{-5}$	313,9
30	$1,307 \cdot 10^{-2}$	$1,199 \cdot 10^{-5}$	$1,878 \cdot 10^{-2}$	$8,119 \cdot 10^{-3}$	$2,126 \cdot 10^{-4}$	206,8
45	$6,960 \cdot 10^{-3}$	$5,754 \cdot 10^{-6}$	$8,665 \cdot 10^{-3}$	$1,159 \cdot 10^{-3}$	$1,113 \cdot 10^{-4}$	3113,5

Як бачимо з рис. 3.8 та 3.9 у зв'язку з тим, що для першого резонансного піку спостерігається стрімке зменшення значень амплітуди СК БЕП після зменшення періоду нижче резонансного, то при реалізації зазначеного методу доцільним є при розрахунку значення періоду для першого піку округляти отримане значення до більшого.

Рис. 3.8. Залежність амплітуд СК БЕП рослин томатів сорту Ласточка (вік 30 діб, $t^{\circ}=22,5^{\circ}\text{C}$) від частоти ритмозадаючого фактора (за розрахунками).

Рис. 3.9. Залежність амплітуд СК БЕП рослин перцю сорту Подарок Молдови (вік 30 діб, $t^{\circ} = 22,5^{\circ}\text{C}$) від частоти ритмозадаючого фактора (за розрахунками).

Таким чином, можна зробити висновок, що запропоновані моделі добре відбивають основні властивості рослин при СК БЕП і можуть бути використані при створенні систем моніторингу стану рослин, навколишнього середовища або систем управління параметрами оточуючого середовища з отриманням інформації від рослин.

3.5. Експериментальні дослідження виникнення та розповсюдження світлозалежних коливань біоелектричних потенціалів між частинами та органами рослин

Як відзначалося у першому та другому розділах, явища передачі електричного сигналу між органами рослин та між рослинами відіграють важливу роль у підтриманні цілісності рослин та ценозів та виконують важливі регуляторні функції, в тому числі впливаючи на процеси засвоєння світлової енергії та розвиток рослин в цілому. Тому постає задача дослідити основні закономірності виникнення та розповсюдження СК БЕП між органами рослин та між окремими рослинами.

Дослідниками спостерігався ефект передачі збудження від освітлених до неосвітлених ділянок листа, в основі чого, як вважають, лежить електротонічна взаємодія клітин [103,204]. Через великі значення згасання така передача збудження здійснюється на незначні відстані [205, 206]. В цілому ж явище розповсюдження СК БЕП від органа до органа є досить малодослідженим.

Так, при подачі періодичного світлового впливу на освітленому листі квасолі виникають СК БЕП, а реакція на неосвітленому листі з'являється з запізненням близько 1 хвилини. Амплітуда коливань БЕП у обох листів не залишалася незмінною, а періодично змінювалася з приблизно однаковим періодом в 2,5...3 години (рис. 3.10), при чому зміни амплітуд коливань листів відбувається майже в протифазі (деяке відхилення, ймовірно, викликано впливом третього листка, що знаходився під дією розсіяного світла). Спостерігається накладання швидких коливань з хвилинними періодами на більш повільні тригодинні коливання, що є проявами внутрішніх властивостей досить складної системи, якою є трійчастий лист квасолі, а також циркадної ритміки.

Однакові періоди змін амплітуд СК БЕП та протифазність коливань свідчать про періодичну взаємодію освітленого та затемненого листів, характер якої визначається їх фізіологічним станом. Вважається, що така взаємодія обумовлена перерозподілом асимілятів [76,100,207]. Біоелектрична реакція органів рослини на стресові впливи (температурні та хімічні впливи, механічне подразнення) на інші органи тієї ж рослини спостерігалася неодноразово, при чому вплив верхніх листів на нижні був більшим за зворотній, що, ймовірно, пояснюється фізіологічною полярністю рослин [75,207,208].

Явище розповсюдження СК БЕП також спостерігалася автором при проведенні дослідів на рослинах перцю, баклажанів, огірків та томатів за подібною ж схемою, але морфофізіологічні відмінності цих рослин від квасолі обумовлюють дещо слабшу взаємодію між листами різних рівнів, що в ряді випадків практично межує з можливостями апаратури, що використовувалася при проведенні досліджень, та більший вплив різноманітних збуджуючих чинників. Проте, явища, подібні до зазначених для СК БЕП трійчастих листів квасолі, спостерігалася і для цих культур (рис. 3.11, 3.12).

Величина періодів взаємодії між освітленими та неосвітленими змінювалася для різних рослин від 1,5 до 9 годин в залежності від умов проведення дослідів і віку рослин, при чому виявлено, що з віком листів

цей період збільшується.

Наявність періодичних коливань величин амплітуд СК БЕП можна пояснити явищем так званого "биття" для зв'язаних осциляторів з невеликою різницею між власними частотами, при чому має місце значна зв'язність між окремими осциляторами [180,181,195]. В цьому випадку період змін амплітуд можна визначити за формулою

$$T=2\pi/(\omega_2 - \omega_1). \quad (3.13)$$

Рис. 3.10. Періодична зміна амплітуди СК БЕП листів квасолі, що розповсюджуються (період зовнішнього впливу $T=15$ хвилин):

- 1 – освітлений лист;
- 2.- затемнений лист.

При достатній зв'язності між осциляторами відбувається перехід енергії від одного осцилятора до другого і обидва осцилятора здійснюють биття, оминаючи яких зсунута у часі на величину $T/4$.

Рис. 3.11. Періодична зміна амплітуди СК БЕП листів баклажанів, що розповсюджуються (період зовнішнього впливу $T=15$ хвилин): 1 – освітлений лист (другий справжній); 2.- затемнений лист (перший справжній).

Рис. 3.12. Характер зміни амплітуди СК БЕП листа перцю, що розповсюджуються (період зовнішнього впливу $T=15$ хвилин):

1 – освітлений лист ; 2.- затемнений лист.

При зміні різниці між власними частотами відповідним чином змінюється і період змін значень амплітуд коливань. Аналіз рівняння 3.13 пояснює зазначене вище явище збільшення періоду коливань величин амплітуд – при збільшенні віку рослин, як впливає з даних підрозділу 3.3, різниця між власними частотами окремих листів рослини зменшується,

отже, буде зростати період коливань.

3.6. Експериментальні дослідження виникнення та розповсюдження світлоіндукованих коливань біопотенціалів у системах рослин

Встановлено, що ефективність використання світлової енергії в ценозах помітно перевищує цю ж ефективність для окремих рослин [1,19, 20,42,209,210]. Головна увага дослідників приділялася, між тим, вивченню особливостей фотосинтетичної діяльності рослин в посіві різної густини та її впливу на характер мінерального та водного живлення [18,19,21,42,185, 211]. Також було встановлено багато закономірностей в адаптації фотосинтетичного апарату рослин у природних та штучних ценозах, зокрема таких як зміни в побудові зернин хлорофілу [42,175], вмісту та співвідношень різноманітних пігментів [19,21,42,175,212], зміни світлових кривих фотосинтезу та його добової ритміки [213], а також і адаптаційних змін в функціях та структурах корневих систем рослин в ценозах [214,215].

Конкуренцією за життєво важливі фактори середовища, значення якої не підлягає сумніву, пояснити всі ефекти внутрішньовидової взаємодії рослин не можна [1,211], тоді як взаємодія рослин в ценозах є чи не найголовнішим фактором еволюції видів [1,42,209]. Між тим, багато дослідників вважають, що в сутності групових ефектів та багатьох інших явищ, що спостерігаються при оптимальних умовах в фітоценозах знаходиться явище синхронізації коливань електричних полів рослин, при якому керуючі сигнали кодуються в частотній формі [75,211,216,217].

Не викликає сумніву сам факт важливої ролі взаємодії власних електромагнітних полів рослин [218], тоді як дослідження можливості безпосередньої передачі електричних сигналів між рослинами є досить нечисельними [75], як і спроби непрямого експериментального підтвердження ролі коливальних процесів обміну в фітоценотичних системах [216]. Між тим, є очевидною можливість встановлення ефективних прямих електричних контактів між корневими системами рослин, що разом ростуть, тому можна очікувати наявності в системах рослин закономірностей, подібних до тих, що спостерігалися при вивченні особливостей виникнення та розповсюдження СК БЕП між органами рослин.

При вивченні СК БЕП в системах з двох та чотирьох рослин у віці 20 та 25 діб спостерігався ефект передачі коливань від освітленої рослини до неосвітленої для рослин огірка, баклажанів, помідорів та перцю. У всіх випадках рослини знаходилися в вегетаційних контейнерах на відстані 4...5 см одна від одної при наявності ізолюючої перегородки між надземними частинами рослин для того, щоб запобігти безпосередньому контакту між ними. Одна з рослин накривалася непроникним для світла ковпаком і, після перевірки надійності світлової ізоляції цієї рослини, здійснювалася

подача періодичного світлового впливу зі зміною рівнів опроміненості від 0 до 50 Вт/м² з періодами 8 та 5 хвилин (що відповідає частотам біля 0,013 рад/с та 0,02 рад/с) з відведенням БЕП з середини перших листів за стандартною методикою, при цьому референтний електрод підлягав затемненню.

Для різних видів рослин амплітуди коливань виявилися різними, проте загальна картина встановлення коливань для затемнених рослин виявилася в загальних рисах досить подібною. Зокрема, амплітуди коливань БЕП для неосвітлених рослин, як і слід було очікувати виходячи з загальних уявлень про механізм передачі електричного збудження між рослинами перш за все через взаємодію їх корневих систем, виявили суттєву залежність від співвідношення освітлених та неосвітлених рослин. Так, в системах з трьома освітленими і однією неосвітленою рослиною максимальні амплітуди коливань досягали від 20 до 35% від амплітуд коливань у освітленої рослини (рис. 3.13 та 3.14), тоді як в системах з двох рослин відповідні амплітуди виявилися в 2,5...3,5 рази меншими. Подальше збільшення числа взаємодіючих рослин у системі не призводить до стрімкого зростання амплітуд, що пояснюється невисокою швидкістю передачі сигналу та експоненціальним характером його згасання з відстанню [74,75].

Рис. 3.13. Передача коливань від освітлених рослин до неосвітленої для системи з 4 рослин перцю (вік 20 діб):

1 – освітлена рослина; 2 - неосвітлена рослина.

При відведені БЕП з других листів також спостерігалось зменшення величини максимальних амплітуд приблизно у 1,5...2,2 рази і час їх досягнення дещо зростає. Максимальні амплітуди коливань на неосвітлених рослинах поступово збільшувалися, досягаючи максимуму за 5...8 годин, після чого спостерігалось деяке їх зменшення, яке потім змінювалось нарощуванням.

Рис. 3.14. Передача коливань від освітлених рослин до неосвітленої для системи з 4 рослин баклажанів (вік 25 діб):

1 – освітлена рослина;

2 - неосвітлена рослина.

На рис. 3.15, 3.16 та 3.17 показано динаміку амплітуд СК БЕП у освітленої та неосвітленої рослин в системах для двох рослин відповідно для перцю віком 20 діб, баклажанів (25 діб) та томатів (25 діб). У всіх випадках спостерігається періодична зміна амплітуд коливань БЕП у обох рослин з періодами коливань близькими до 11,5...12,5 годин і досить

значним зсувом за фазою.

Рис. 3.15. Динаміка амплітуд СК БЕП, що розповсюджуються від освітленої рослини до неосвітленої для системи з двох рослин перцю (вік 20 діб): 1 – освітлена рослина; 2 - неосвітлена рослина.

Значення періодів коливань амплітуд СК БЕП в системах рослин в кілька раз більше, ніж аналогічні значення для листів однієї рослини, що можна пояснити більшим обсягом елементів в системі та більшою довжиною метаболічних шляхів. Взагалі ж автор вважає, що не буде хибним припущення, що механізм розповсюдження СК БЕП між рослинами є аналогічним до механізму їх розповсюдження між органами однієї рослини, тобто СК БЕП листів освітлених рослин розповсюджуються як хвиля збудження по симпласту освітленої рослини до її коренів, а в зоні контактів коріння (як безпосередніх, так і через заряджені частки чи шари ґрунту) коливання БЕП в клітинах коренів освітленої рослини індукують коливання БЕП в клітинах коріння неосвітленої рослини з тією ж частотою ω , при тому, що ці клітини стають вторинними осциляторами та створюють хвилю збудження в неосвітленій рослині.

Рис. 3.16. Динаміка амплітуд СК БЕП, що розповсюджуються від освітленої рослини до неосвітленої для системи з двох рослин баклажанів (вік 25 діб):

1 – освітлена рослина; 2 - неосвітлена рослина.

Спостерігається при цьому також і зворотній вплив коренів неосвітлених рослин як вторинних осциляторів на характер змін БЕП в клітинах освітленої рослини. Взаємодія цих взаємних впливів і викликає періодичний характер змін амплітуд СК БЕП у системі рослин. В цьому процесі взаємодії СК БЕП важлива і роль ритмічних змін іонного складу в навколишньому ґрунті чи у розчині, оскільки у відмитих з ґрунту та поміщених водопровідну воду рослин ефект передачі коливань між освітленими та неосвітленими рослинами практично був відсутнім.

Рис. 3.17. Динаміка амплітуд СК БЕП, що розповсюджуються від освітленої рослини до неосвітленої для системи з двох рослин томатів (вік 25 діб): 1 – освітлена рослина; 2 - неосвітлена рослина.

Таким чином, розповсюдження СК БЕП є характерним як для цілісних рослин, так і для систем рослин.

Характер взаємодії між органами рослини багато в чому визначається умовами оточуючого середовища. Очевидним є факт, що в екстремальних умовах характер цих взаємодій доволі часто змінюється [219]. Тому вважалася цілком вірогідною наявність залежності періодичної взаємодії листів однієї рослини та рослин у системі, зокрема і СК БЕП, від зовнішніх факторів.

Тому була поставлена задача дослідити характер змін СК БЕП, що розповсюджуються між рослинами, при зміні умов оточуючого середовища. Серед параметрів навколишнього середовища, зокрема у захищеному ґрунті, найбільш важливими є водний режим та температура, які і були обрані для проведення досліджень.

Дослідження впливу нестачі вологи в ґрунті на характер змін СК БЕП велося для рослин томатів сорту Ласточка та перцю сорту Данюб у віці 20 діб, які вирощувалися, як вказано у розділі 2 та піддавалися дії чотириденної посухи з водним режимом рослин у межах біля 30% від

норми. Велося спостереження СК БЕП для двох рослин, що входили до системи з шести рослин.

При впливі на рослини ритмічного світлового фактору спостерігалось явище постійної зміни форми та амплітуди коливань СК БЕП без наявності їх стабілізації на протязі досить довгого проміжку часу (кількох діб), тоді як на протязі кількох десятків хвилин після поливу відбувалася стабілізація параметрів СК БЕП, що показано на рис. 3.18 та 3.19. Це явище можна пояснити тим, що після поливу відбулося зменшення ступеня взаємного впливу рослин (тобто зв'язку між ними) через те, що припинилася конкурентна взаємодія між рослинами, що входять до складу мікрофотоценозу, за водні ресурси.

Рис. 3.18. СК БЕП, що розповсюджуються від освітлених рослин до неосвітленої для системи з двох рослин перцю сорту Данюб (вік 20 діб) при $T=13$ хв.: а – при дефіциті води; б – через годину після поливу.

Також провадилося дослідження впливу температури на характер розповсюдження СК БЕП у системі з двох рослин перцю та томатів при

різних значеннях температури.

В нормальних умовах температура в факторостатній камері підтримувалася на рівні 25°C, а для створення екстремальних умов температуру встановили на рівні 37°C. Результати дослідів наведено в табл. 3.8.

Рис. 3.19. СК БЕП, що розповсюджуються від освітлених рослин до неосвітленої для системи з двох рослин томатів сорту Ласточка (вік 20 діб) при T=13 хв.: а – при дефіциті води; б – через півгодини після поливу.

Як бачимо, при умовах, близьких до норми, взаємодія між рослинами досить незначна і процес передачі СК БЕП від освітленої рослини до неосвітленої є досить тривалим, тоді як у екстремальних умовах при майже однакових значеннях амплітуд коливань БЕП у освітлених рослин як і у освітлених рослин в нормальних умовах, на неосвітлених рослинах спостерігаються коливання БЕП вже у перші години від початку дослідів і амплітуди цих коливань є значно більшими.

Вплив температури на величину амплітуди коливань, що розповсюджуються.

Фонова температура	Час після початку впливу, год.	Амплітуда коливань, мВ.			
		Рослини перцю		Рослини томатів	
		Освітлена	Затемнена	Освітлена	Затемнена
25°C	1	16,2±2,8	0	12,0±3,3	0
	3	14,2±2,1	0,6±0,13	12,2±2,9	0,4±0,15
	6	17,8±1,9	0,9±0,32	15,9±1,9	0,8±0,22
37°C	1	13,3±3,3	0,3±0,15	10,4±2,0	0,2±0,13
	2	11,2±2,5	1,1±0,23	12,2±2,4	0,8±0,16
	3	17,7±1,9	3,2±0,33	15,1±2,0	2,9±0,38
	6	18,2±2,3	4,9±0,35	17,7±1,3	4,3±0,43

Збільшення амплітуд СК БЕП для затемнених рослин можна пояснити одночасним посиленням взаємодії рослин та зменшенням величини згасання електричних сигналів, що розповсюджуються, через те, що змінилися властивості симпласту, кореневої системи та ґрунту, що проводять. Таким чином, можна зробити висновок, що у разі відхилення зовнішніх факторів від оптимальних для життєдіяльності рослин у них спостерігається підсилення взаємного впливу різних органів та збільшується ефективність взаємодії між окремими рослинами в системах рослин.

Це явище, таким чином, може бути перспективним для можливого використання для задач моніторингу умов середовища.

3.7. Вплив періодичних режимів опромінення, що відповідають пікам АЧХ СК БЕП, та умов вирощування на ріст рослин

Для практичного застосування періодичних режимів опромінення необхідно вивчити вплив згаданих режимів на параметри рослин, оскільки нові режими опромінення повинні забезпечувати отримання якісної розсади, що за показниками повинна бути не гіршою за ту, що вирощується при застосуванні існуючих технологій та режимів опромінення. Зокрема, рядом дослідників було відмічено, що при застосуванні періодичного опромінення рослини мали, при прискоренні росту та збільшенні довжини стебла, досить помітну депігментацію листів, що в ряді випадків навіть не дозволило отримати якісну розсаду та в кінцевому випадку може привести до отримання розсади з пониженою життєздатністю [5,38,71,119]. Проте, в зазначених дослідках періодичність опромінення добиралася довільно, без фізіологічного обґрунтування, а про можливість негативного впливу періодичного опромінення відомо було і раніше [5,22,108,115].

З іншого боку, зокрема при застосуванні періодичних режимів опромінення при вирощуванні огірків у спорудах захищеного ґрунту, явища депігментації не спостерігалось [6,16,34-36,39-41,167]. Проте, огірок у порівнянні з пасльоновими є менш світлолюбним, до того ж відсутність депігментації може бути пояснена наявністю фонового рівня постійного опромінення природного походження. Тим більш слід згадати, що для запобігання втрат хлорофілу тканинами рослин згідно з рекомендаціями [17,21,39,54,171,200] достатньо підтримувати на протязі всього періоду вирощування розсади овочевих культур значення постійної складової рівня опроміненості не нижче точки компенсації фотосинтезу та фотодихання [19,20,171], що становить для томатів біля 10...15 Вт/м² ФАР, а для перцю та баклажанів – 12...18 Вт/м² ФАР. При сприятливих погодних умовах фон природного опромінення навіть взимку є близьким до цього рівня, проте для вирішення питання про гарантоване отримання якісної розсади необхідно забезпечити згаданий рівень при недостатку природного фону штучними джерелами, а згадані рекомендації слід підтвердити дослідними даними.

Для визначення впливу режимів змінного опромінення на вміст хлорофілу у листі рослин рослини вирощувалися в кліматичній камері при стандартних умовах, вказаних у підрозділі 3.1. Температура повітря підтримувалася у межах 21...23°C. Періодичність опромінення обчислювалася за наведеними у підрозділі 3.3 рівняннями регресії та встановлювалися за допомогою реле часу. Оскільки різні режими опромінення могли привести до прискорення або уповільнення розвитку розсади, то було вирішено провести аналіз вмісту хлорофілу при появі у рослин сьомого справжнього листа. Визначення вмісту хлорофілу провадилося наступним чином: з рослини зрізалися всі листи, крім верхнього, визначалася їх площа, після чого для екстракції хлорофілу листи заморожуються рідким азотом, розтираються у порошок та заливаються 80%-м розчином ацетону, після чого отриманий розчин центрифугувався для відділення від крохмалю, білків та інших залишків. Після цього вміст хлорофілу визначався стандартним методом [18] та перераховувався на визначену раніше площу листів та визначалося його відношення до контролю, за який взято режим постійного опромінення на рівні 60 Вт/м² ФАР. Результати дослідів наведено у табл. 3.9. Вміст хлорофілу у контрольних рослин складав для томатів 5,1 мг/м² та для перцю 5,3 мг/м². Точність визначення вмісту хлорофілу складає 2,5%.

Оскільки наявність зниження вмісту пігментів більш ніж на 10...15% є небажаним через доволі помітне зниження інтенсивності фотосинтезу в рослинних тканинах, то очевидно є недоцільність використання режиму опромінення без наявності постійної складової [18-22,29,54]. Таким чином, на основі отриманих даних можна зробити висновок, що для запобігання депігментації розсади при вирощуванні томатів достатньо забезпечити наявність постійної складової рівня опромінення на рівні 10 Вт/м² ФАР, а перцю – 15 Вт/м² ФАР при використанні періодів опромінення, що

відповідають першому піку АЧХ СК БЕП та 10 Вт/м² ФАР для другого піку. Подальше збільшення постійного фону опромінення є недоцільним через зростаючі при цьому витрати енергії без помітного поліпшення якості розсади. При практичному використанні періодів, що відповідають другому піку АЧХ СК БЕП, у спорудах захищеного ґрунту постійну складову практично можна не передбачати через наявність достатнього природного фону.

Таблиця 3.9 –

Вміст хлорофілу у листі рослин при різних режимах опромінення
(% до контролю)

Рослина	Режим опромінення, Вт/м ² ФАР.							
	Перший пік АЧХ				Другий пік АЧХ			
	змін на скла дова 60	10 пос т. + 50 змі н.	20 пос т. + 40 змі н.	30 пос т. + 30 змі н.	змін а склад ова 60	10 пос т. + 50 змін .	20 пос т. + 40 змі н.	30 пос т. + 30 змі н.
Томати сорту Ласточка	72	96	103	102	90	98	100	103
Перець сорту Подарок Молдови	68	89	101	101	92	97	102	104

Як зазначалося у підрозділі 2.3, наявність взаємодії рослин у мікрофотоценозі при використанні періодичних режимів опромінення може мати суттєвий вплив на морфологічні характеристики рослин через наявність загального зовнішнього чинника для взаємодіючих біотехнологічних об'єктів та розвитку. за принципом біологічної доцільності органів для передачі збудження, якими є перш за все коренева система рослин.

Для перевірки цього припущення провадилося вирощування рослин перцю та томатів у варіантах по 10 рослин у контейнері ємкістю 3000 мл, та 10 рослин у такому ж контейнері, але розділеному непроникними перегородками (тобто при однаковому обсязі ґрунту на одну рослину) при застосуванні періодичних режимів, що відповідають першому та другому пікам АЧХ при підтриманні постійних умов середовища (температурі 23°C, змінній складовій опроміненості 50 Вт/м², постійній 10 Вт/м²) і встановленні щодобово значень періодів опромінення, що обчислювалися за рівняннями регресії, наведеними у підрозділі 3.3. Рослини вирощувалися до віку 40 діб, потім їх корені вимивалися від ґрунту та

визначалися морфологічні характеристики рослин. Результати дослідів наведено у табл. 3.10 та 3.11. Для порівняння наведені морфологічні показники розсади при вирощуванні в контейнерах з перегородками при постійному рівні опромінення 60 Вт/м².

Таблиця 3.10 –

Морфологічні характеристики 40-добових рослин томатів сорту Ласточка при різних режимах опромінення

Режим опромінення	Параметри розсади, М±D				
	Число листів	Довжина стебла, см	Маса надземної частини, г	Маса коренів, г.	Відношення маси коренів до маси рослини, %
Параметри для першого піку АЧХ, контейнер з перегородками	7,2±0,5	18,2±2,5	15,2±2,1	0,84±0,11	5,24±0,66
Те ж, контейнер без перегородок	7,1±0,3	17,6±1,1	15,4±1,2	0,99±0,08	6,06±0,42
Параметри для другого піку АЧХ, контейнер з перегородками	7,0±0,6	17,9±2,4	14,9±1,9	0,86±0,14	5,46±0,95
Те ж, контейнер без перегородок	7,2±0,2	17,5±1,3	15,3±1,0	1,04±0,10	6,37±0,63
Контроль	6,3±0,9	15,2±3,9	13,1±3,3	0,72±0,13	5,20±0,76

В обох варіантах розсада у порівнянні з контрольною групою має більш однорідні показники, що свідчить про позитивний вплив застосування періодичних режимів опромінення на ці показники, що підтверджується і спостереженнями дослідників для інших культур [54,199]. Також помітним є прискорення розвитку рослин при застосуванні періодичних режимів.

До того ж слід зауважити, що при вирощуванні рослин в умовах забезпечення їх взаємодії в рамках мікрофотоценозу морфологічні характеристики виявилися більш рівними, а розвиненість кореневої системи в цьому випадку виявилася більш значною, що підтверджує обґрунтованість зроблених раніше з теоретичних міркувань припущень.

Таблиця 3.11 –

Морфологічні характеристики 40-добових рослин перцю сорту Подарок Молдови при різних режимах опромінення

Режим опромінення	Параметри розсади, M±D				
	Число листів	Довжина стебла, см	Маса надземної частини, г	Маса коренів, г.	Відношення маси коренів до маси рослини, %
Параметри для першого піку АЧХ, контейнер з перегородками	6,7±0,6	15,8±2,4	7,2±0,8	0,79±0,10	9,88±1,02
Те ж, контейнер без перегородок	6,8±0,3	16,0±1,4	7,4±0,6	0,82±0,08	10,01±1,04%
Параметри для другого піку АЧХ, контейнер з перегородками	6,5±0,7	15,9±2,0	6,9±0,9	0,75±0,13	9,80±1,15%
Те ж, контейнер без перегородок	6,9±0,3	16,1±1,2	7,3±0,5	0,84±0,10	10,33±0,93%
Контроль	6,0±0,8	14,2±2,9	6,1±3,3	0,62±0,13	9,25±1,24%

3.8. Основні напрямки для практичної реалізації енергозберігаючих періодичних режимів

Реалізація періодичних режимів опромінення розсади рослин у теплицях, параметри яких розраховуються за наведеними вище у цьому розділі рівняннями регресії, загалом не викликає великих технічних труднощів. Для цього в найпростішому випадку цілком придатні реле часу та командні апарати, що випускаються промисловістю в достатньо широкому діапазоні, в поєднанні з відповідною пускозахисною апаратурою для освітлювальних установок. Для реалізації режимів періодичного опромінення в цьому випадку необхідно визначити вік рослини, змінну складову опромінення та температуру повітря, а потім за допомогою ЕОМ з відповідною розрахунковою програмою (Додаток Б) або безпосередньо за відповідним рівнянням регресії розрахувати значення періоду. Зазначені реле або командні апарати настроюються у відповідності з розрахованими значеннями параметрів періодичних режимів та здійснюють керування освітлювальними приладами. Проте у

цьому випадку необхідно принаймі раз на початку кожної доби провадити розрахунок та настроювання апаратури, а при нестабільності температури повітря у межах доби на протязі часу використання опромінення навіть і частіше. Тому значно зручніше використовувати пристрої, що автоматично визначають та встановлюють значення періоду при вимірюванні вхідних величин на базі мікропроцесорних пристроїв. Для випробувань запропонованих режимів у лабораторних та виробничих умовах автором було розроблено кілька з можливих варіантів подібних пристроїв, опис яких наведено в наступному розділі.

Слід зазначити, що реалізація режимів, що відповідає першому піку, можлива не тільки при використанні ламп розжарення, але й для більш економічних газорозрядних ламп високого тиску, повторний пуск яких відбувається після охолодження на протязі 10-12 хвилин.

Реалізація для таких ламп режимів, що відповідають другому піку, в ряді випадків ускладнена. Проте, ці режими можна реалізувати для ламп розжарювання як при їх використанні для опромінення розсади в комбінації з лампами високого тиску або без них [8,12,16,22]. Можлива також реалізація періодичного опромінення для другого піку АЧХ, якщо використовувати відомі схеми для режимів очікування та для роботи на підвищених частотах [24,34,40,44]. Однак переобладнання пускозахисної апаратури може виявитися затратним, тому більш раціональним є використання рухомих джерел світла за відомими конструкціями [13,16]. Останнє рішення до того ж дозволяє скоротити загальну кількість встановлених опромінювачів.

При застосуванні періодичних режимів опромінення у великих розсадних відділеннях доцільним є використання схеми включення опромінювачів за принципом "хвиля, що біжить", тобто з порядковим включенням. Такий спосіб включення дозволяє знизити пускові струми у мережі, а при вирощуванні розсади способом без горщечок чи касет додатково забезпечує стимуляцію розвитку кореневої системи розсади як через активізацію ценотичної взаємодії між рослинами (як це показано у підрозділі 3.7) так і через явище стимуляції перерозподілу зарядів у ґрунті при зміні розподілу електростатичних зарядів та електромагнітних полів, яка супроводжує комутацію опромінювачів [220].

Слід підкреслити, що встановлення параметрів періодичних режимів за значеннями частот, що відповідає пікам АЧХ СК БЕП забезпечує максимально можливу для даних конкретних параметрів оточуючого середовища стимуляцію фізіологічних процесів, а отже, і максимально можливе використання світлової енергії, тоді як при різних параметрах зовнішнього середовища амплітуди СК БЕП, а отже і конкретні швидкості росту рослин можуть бути різними, що і відкриває шлях до регуляції ростових процесів через встановлення згаданих параметрів при забезпеченні мінімумів питомого енергоспоживання.

Слід згадати, що при використанні зв'язаного регулювання рівня опромінення та температури повітря перевагу серед можливих варіантів

зазвичай віддають встановленню більш високих значень температур та низьких значень рівнів опромінення через те, що частка питомих витрат на опромінення помітно перевищує частку на підтримання температурного режиму в зимовий період, тоді як в весняно-літній положення змінюється на протилежне [13]. Значна інерційність об'єкту управління, тобто споруд захищеного ґрунту, щодо такого параметра як температура дещо ускладнює застосування пов'язаного регулювання параметрів режимів опромінення та температури, проте розвиток засобів для зонного регулювання температури надає можливість і для пошуків у цьому напрямку.

Застосування сучасних електронних приладів, перш за все мікропроцесорних засобів, дозволяє реалізувати оперативне обчислення та встановлення параметрів періодичних режимів в залежності від визначених вхідних параметрів та керування комутацією опромінювачів з більш високою точністю, ніж забезпечують реле часу. До того ж такі пристрої можуть забезпечити оперативне встановлення оптимальних з точки зору енергозбереження та стимуляції розвитку рослин режимів при застосуванні періодичних режимів опромінення у системах керування за кількома пов'язаними параметрами мікроклімату (частіше за все це рівень опромінення та температура [12,13,31]) та надають можливість для розробки систем керування швидкістю розвитку рослин при збереженні оптимальності за енерговитратами.

Висновки до розділу

1. Параметрам розсади овочевих культур, як біотехнічного об'єкту управління, властива суттєва нестаціонарність, яка також проявляється і для параметрів амплітудно-частотних характеристик СК БЕП рослин, які було заплановано визначити для застосування при адаптивному управлінні параметрами періодичних режимів опромінення у системі "розсада – середовище" за моделлю.

2. Виявлено, що вигляд та параметри АЧХ СК БЕП залежать від генотипічної (видової та сортової) специфічності рослин, їх віку та параметрів оточуючого середовища, причому ці залежності носять складний характер і їх доцільно визначати з використанням методів активного експерименту.

3. Виявлено, що найбільшого ефекту слід очікувати при використанні режимів періодичного опромінення розсади рослин, що відповідають першим двом пікам амплітудно-частотних характеристик СК БЕП. Експериментально доведено, що перший (самий низькочастотний) пік АЧХ СК БЕП, на відміну від інших піків, пов'язаний з механізмами регуляції устячкових апертур рослин.

4. Визначено, що значення параметрів періодичних режимів опромінення в межах окремого сорту залежать перш за все від віку рослин,

змінної складової рівня опромінення та температури оточуючого середовища.

5. За результатами обробки проведених експериментальних досліджень за рототабелним центральним композиційним планом отримані рівняння регресії для періодів та амплітуд, що відповідають резонансним пікам АЧХ СК БЕП для двох сортів томатів, перцю та баклажанів. Отримані рівняння регресії дають можливість розрахувати параметри ефективних періодичних режимів для зазначених культур в залежності від віку, виду, сорту рослин, змінної складової рівня опромінення та температури повітря у теплиці, а також розрахувати параметри запропонованих у розділі 2 моделей рослин.

6. Експериментально встановлено факт розповсюдження світлоіндукованих коливань біопотенціалів як між органами рослини, так і між сусідніми рослинами у мікрофітоценозі. Отримано експериментальні дані, що свідчать про наявність динамічної взаємодії між органами та рослинами, оскільки амплітуди коливань, що розповсюджуються, періодично змінюється, а величина періоду визначається особливостями рослин та цілим рядом зовнішніх факторів. Є вірогідною сигнальна роль коливань, що розповсюджуються, у координації взаємодії частин та окремих органів в системі цілісної рослини та між окремими рослинами в їх системах, що відкриває нові можливості для регулювання процесів розвитку рослин та поліпшення ефективності використання рослинами світлової енергії.

7. Встановлено, що для запобігання депігментації рослинних тканин у розсади овочевих культур роду пасльонових достатньо забезпечити наявність постійної складової рівня опромінення на рівні біля 10 Вт/м² ФАР, а перцю – 15 Вт/м² ФАР при використанні періодів опромінення, що відповідають першому піку АЧХ СК БЕП та 10 Вт/м² ФАР для другого піку.

8. Доведено, що при застосуванні періодичних режимів опромінення при вирощуванні рослин в умовах забезпечення їх взаємодії в рамках мікрофотоценозу морфологічні характеристики рослин виявилися більш рівними, а розвиненість кореневої системи помітно кращою, що підтверджує обґрунтованість зроблених раніше з теоретичних міркувань припущень. Помітним виявився факт прискорення розвитку рослин, що свідчить про позитивний вплив застосування періодичних режимів опромінення. Таким чином при використанні періодичних режимів опромінення рослин має місце стимуляція як рослини в цілому, так і рослин у фітоценозі.

9. Розглянуто основні можливі шляхи практичного впровадження ефективних періодичних режимів опромінення.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ТА ВИРОБНИЧИХ ВИПРОБУВАНЬ БІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ "РОЗСАДА- СЕРЕДОВИЩЕ" ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1. Опис біотехнічної системи "розсада-середовище" з адаптивним управлінням параметрами опромінення за моделлю

4.1.1. Алгоритм періодичного опромінення розсади овочевих культур

Виходячи з результатів проведених дослідів, які наведено у попередньому розділі, автором розроблено алгоритм періодичного опромінення розсади овочевих культур, блок-схема якого наведена на рис. 4.1. Оскільки отримані данні відносяться до періоду розвитку рослин після 8 діб після появи першого справжнього листа, то у період до цього значення прийнято режим з періодом зміни рівнів опроміненості у 1 годину. Слід також враховувати, що при використанні технологій вирощування розсади, які передбачають пікірування воно провадиться при появі першого справжнього листа [8-10], тому застосування запропонованого алгоритму опромінення можливе як для технологій з пікіруванням розсади, так і без нього.

Можлива робота системи у двох варіантах: з додатковим застосуванням стимуляції розвитку кореневої системи при застосуванні вмикання опромінювачів за схемою "хвиля, що біжить" або без нього. Вибір конкретного варіанту визначається технологією, що застосовується для вирощування розсади, та площею розсадного відділення. Так, в разі невеликої площі або застосування вирощування розсади в горщиках чи касетах згадане застосування буде неможливим.

Для запобігання втрат хлорофілу тканинами рослин та недопущення перевитрат енергії згідно з рекомендаціями [17,39,54,171,200], що підтверджуються результатами дослідів автора (див. підрозділ 3.7)

доцільно підтримувати на протязі всього періоду вирощування розсади овочевих культур значення постійної складової рівня опроміненості не нижче точки компенсації фотосинтезу та фотодихання [19,20,171], тобто, для томатів на рівні біля 10 Вт/м² ФАР, а для перцю та баклажанів – 10...15 Вт/м² ФАР. Тому в разі зниження природного фону опроміненості нижче зазначених меж в разі застосування варіанту без додаткової стимуляції слід передбачити необхідний рівень штучного електроопромінення з допомогою опромінювачів, що працюють в безперервному режимі на протязі частини доби, що використовується для опромінення. При застосуванні схеми включення "хвиля, що біжить" регулювання фонові складові опромінення можливе також за рахунок зміни кількості опромінювачів, що комутуються на протязі одного періоду.

Загалом же опромінення розсади за запропонованим алгоритмом здійснюється наступним чином. Перед початком роботи вводиться код, що відповідає конкретному виду та сорту рослини, що вирощується, а також початковий час від появи першого справжнього листа. Якщо від появи першого справжнього листа минуло менше 8 діб, то період опромінення встановлюється рівним 75 хвилинам. При досягненні рослинами віку в 8 діб після появи першого справжнього листа за допомогою вимірювальних перетворювачів визначається змінна складова опроміненості та температура повітря в теплиці. Далі, за рівнянням регресії визначаються параметри режимів опромінення, які потім встановлюються та підтримуються. При застосуванні описаного нижче пристрою (чи аналогічного) для автоматичного встановлення періоду опромінення передбачена можливість зміни параметрів режимів на протязі даної доби (наприклад, при зміні температурного режиму). При настанні наступної доби параметр віку рослини збільшується на одиницю, розрахунок повторюється аналогічним чином та встановлюються нові параметри режимів.

Рис. 4.1. Блок-схема алгоритму опромінення розсади овочевих культур

Ця процедура триває до досягнення розсадою визначених [8-10] морфологічних показників, а саме до появи 8-10 справжнього листа.

При використанні описаного в підрозділі 4.2 приладу (або аналогічних) контроль вхідних чинників, обчислення та встановлення параметрів здійснюється автоматично. В цьому разі можлива також корекція параметрів періодичних режимів опромінення при змінах або регулюванні параметрів середовища на протязі тієї ж доби.

При використанні періодичних режимів опромінення в розсадних відділеннях з порівняно великою площею, як вже вище згадано, можливим є використання описаного в підрозділах 2.3 та 3.7 ефекту взаємного впливу рослин у мікрофотоценозі з використанням, наприклад, розробленого автором приладу "Хвиля-1" (або ж аналогічних приладів), опис якого наведено нижче, що також передбачено у запропонованому алгоритмі. При цьому обраховуються значення часу покрокового переключення та часу (або кількості кроків) від вмикання до вимикання конкретного ряду опромінювачів.

4.1.2. Пристрої управління

Застосування сучасних засобів мікропроцесорної техніки та електроніки дозволяє реалізувати визначені режими без необхідності додаткового обчислення та встановлення параметрів режимів, яке є необхідним для схем з застосуванням реле часу.

Для випробувань запропонованих режимів у лабораторних та виробничих умовах автором був розроблений один з можливих варіантів пристрою на базі мікроконтролеру K145ИК1910, який забезпечує автоматичне обчислення та встановлення параметрів режимів за вибраним оператором видом та сортом рослини. Пристрій, функціональна схема якого наведена на рис. 4.2, зовнішній вигляд – на рис. 4.3, працює таким чином. Мікроконтролер по шині управління здійснює керування цифро-аналогового перетворювача за допомогою вихідних сигналів У1-У6, через який надходять та перетворюються у цифровий код сигнали з первинних перетворювачів: температури повітря, часу опромінювання та рівнів опроміненості. Як пристрій запам'ятовування (ПЗП) використовується мікросхема типу K145PE2П. Для відображення значень параметрів використовується цифровий індикатор. Сигнали У1-У6 на ПЗП та ЦАП

подаються по чергово, для ПЗП вони визначають адреси констант та даних, а для ЦАП комутують входи резистивної матриці. Сигнали У7 та У8 використовуються для подачі сигналів управління на пристрій комутації та гальванічної розв'язки опромінювачів або ж для подачі сигналу управління на пристрій "Хвиля-1". Робота мікропроцесорної системи синхронізується тактовим генератором.

Рис. 4.2. Функціональна схема пристрою "Ритм-1".

Це управління здійснюється за програмою, що записана до ПЗП ВІС та визначає реалізацію згаданих рівнянь регресії згідно з кодом, що відображається на індикаторі при натиснутій кнопці "індикатор-код". Для завдання коду використовуються клавіші "код-вид" (при натисканні клавіші необхідне число разів на індикаторі встановлюється код виду: 1 – для томатів, 2 – для перцю, 3 – для баклажанів) та "код-сорт" (для сорту 1 чи 2 у даному виді). При натисканні кнопки "індикатор-період" на індикаторі відображається значення періоду, що встановлене приладом у хвиликах. Для завдання віку рослини від появи першого справжнього листа використовуються дві клавіші "вік" для завдання десятків та одиниць діб з встановлення віку натисканням клавіш необхідне число разів.

Рис. 4.3. Зовнішній вигляд пристрою "Ритм-1".

Для використання періодичних режимів опромінення в розсадних відділеннях з використанням описаного в підрозділах 2.3 та 3.7 ефекту взаємного впливу рослин у мікрофотоценозі (у випадку, коли не використовується технологія вирощування розсади у окремих горщиках або касетах) а також для зниження пускових струмів з застосуванням включення опромінювачів за принципом хвилі, що біжить, автором розроблено прилад "Хвиля-1".

При роботі приладу передбачена можливість зміни кількості ламп у групі, що комутується за один період від 6 до 10 для створення можливості зміни постійного рівня опроміненості при зміні природного фону. Така можливість регулювання постійної складової опроміненості у порівнянні з використанням окремих опромінювачів, що працюють постійно, має ту перевагу, що в останньому випадку складно забезпечити можливість регулювання постійної складової опромінення та до того ж спрацьовування опромінювачів через різну кількість пусків відбувається нерівномірно.

Оскільки при використанні опромінювачів з лампами високого тиску (наприклад, ламп ДРЛФ-400) при включенні останніх час пуску (тобто час, за який світловий потік від лампи сягає 90% від номінального) складає близько 3,5-4,5 хвилин, то для створення скважності світлових імпульсів у періоді близькою до $m=0,5$ передбачене подавання напруги на лампу, що запускається з випередженням на один крок програмного управління, який складає

$$\tau = \frac{T}{N} \quad (4.1)$$

де T – тривалість періоду, що встановлюється приладом "Ритм-1" за рівняннями регресії (див. розділ 3), с;

N – кількість опромінювачів в групі, що комутується за період.

Для розрахунку співвідношення між змінною та постійною складовою опроміненості скористаємося з того, що постійній складовій відповідає мінімальний рівень опроміненості у випадку, коли над даною рослиною знаходиться середина групи ламп, що не горять, тоді як змінна складова дорівнює різниці між максимальним та мінімальним рівнем. Максимальному ж рівню відповідає випадок, коли над рослиною знаходиться середина групи ламп, що горять. Якщо не враховувати

відбиття світла, то для розрахунку рівнів можна скористатися точковим методом [221], тоді горизонтальна освітленість

$$\dots, \quad (4.2)$$

де α_i – кут між вертикальною лінією, що проходить через центр лампи, та лінією, що з'єднує центр лампи та точку, для якої йде розрахунок ;

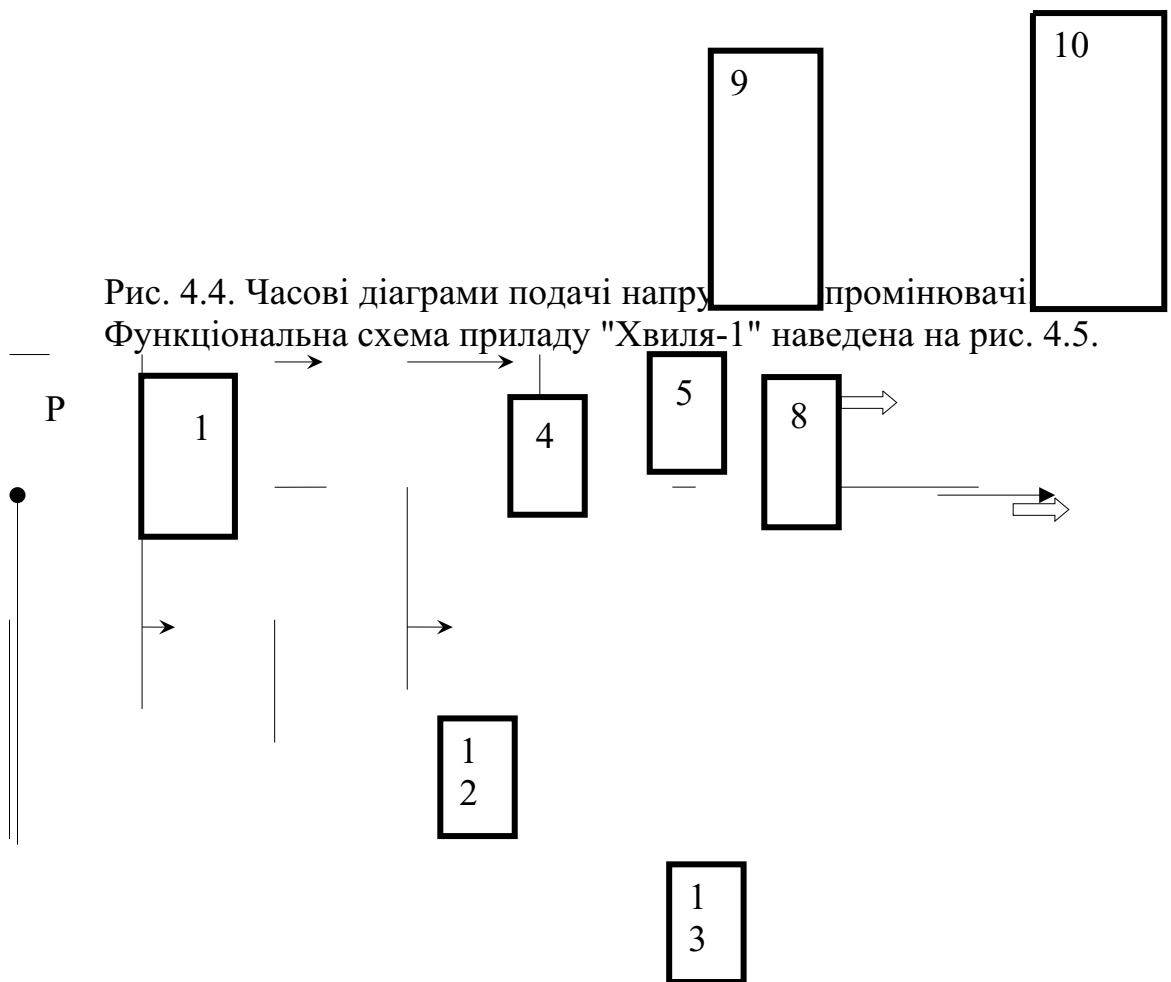
h – висота підвісу лампи, м.

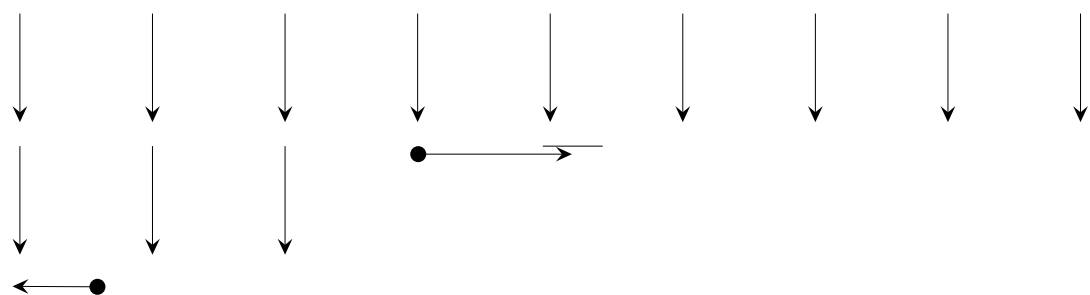
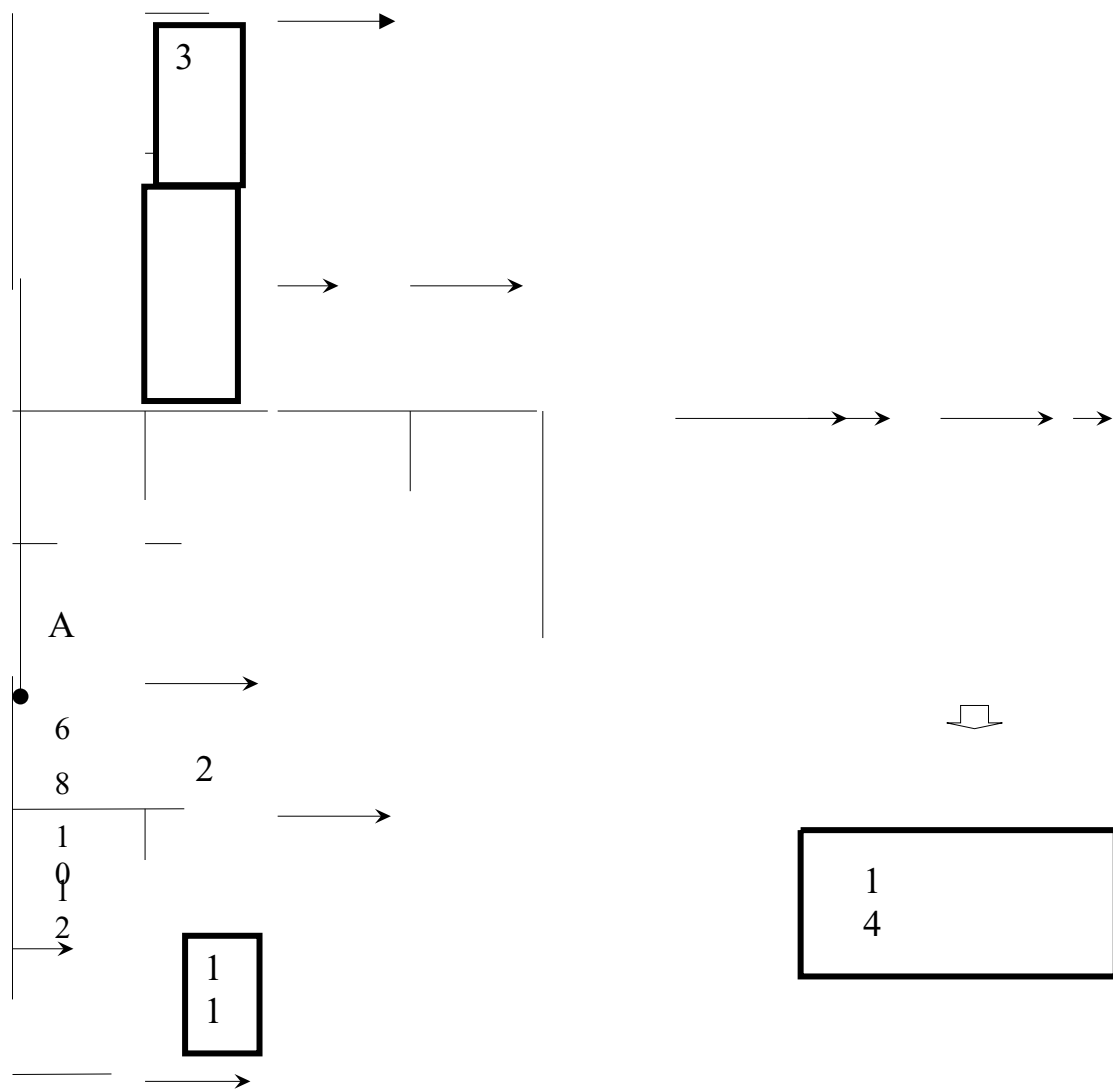
У свою чергу

$$\dots, \quad (4.3)$$

де d – відстань між рядами ламп, м.

Чисельні розрахунки при $h=d$ для ламп ДРЛФ-400 показують, що при $N=6$ постійна складова буде дорівнювати приблизно 0,24 змінної, при $N=8$ – приблизно 0,16, при $N=10$ приблизно 0,08, тобто, при наявності навіть трьох рівнів регулювання можна змінювати постійну складову майже в 3 рази, чого цілком достатньо для ефективного використання електричної енергії, що йде на опромінення. Часові діаграми подачі напруги для групи з 8 рядів опромінювачів наведено на рис. 4.4. Для груп у 6 чи 10 рядів часові діаграми мають схожий вигляд з врахуванням рівняння (4.1).





Період
од
Від
приладу
“Ритм 1”

Опромінені
сть

До шафи
керування та
опромінювачів



Рис. 4.5. Функціональна схема приладу "Хвиля-1":

1. Блок вибору режиму
2. Блок вибору команди (6, 8, 10 або 12)
3. Блок регулювання заповнення періоду опромінення
4. Елемент І
5. Елемент АБО
6. Тактовий генератор
7. Блок підбору довжини тактового імпульсу
8. Лічильник
9. Дешифратор
10. Блок комутації
11. Блок вибору сигналу від приладу «Ритм-1»
12. Елемент І
13. Елемент АБО
14. Блок комутації опромінювачів

Прилад "Хвиля-1" є електронною схемою, що погоджує прилад "Ритм 1" та опромінювачі. Прилад "Хвиля 1" складається з пристрою вибору режимів роботи та електронної схеми, яка призначена для вибору кількості рядів опромінювачів у групі, що комутується, в залежності від нього рівня опроміненості у теплиці та організації належної комутації опромінювачів.

Прилад має ручний та автоматичний режим роботи, вибір між якими здійснюється перемикачем, що знаходиться на передній панелі приладу. Про роботу приладу у автоматичному режимі свідчить горіння світлодіода. При роботі в ручному режимі на вхід блоку 1 від перемикача Р/А надходить сигнал.

В залежності від положення перемикачів "Рядів у групі" (6, 8, 10 або 12) на виході блоку 2 формується сигнал для визначення довжини тактового імпульсу, що формується тактовим генератором 6 та, в залежності від довжини періоду, що надходить від приладу "Ритм-1", в блоці 7 відбувається його поділ на обрану кількість тактів (6, 8, 10 або 12). Далі сигнали від блоків 1, 2 та 7 надходять до блоку 3, де формується сигнал, що дорівнює довжині періоду та є заповненим тактовими імпульсами. Отриманий таким чином сигнал проходить через блоки 4 та 5 та надходить на лічильник 8, що перетворює послідовність імпульсів у двійковий код. Перетворений таким чином сигнал надходить на дешифратор 9 та комутатор 10, який комутує опромінювачі за законом $n+k$ (n – порядковий номер ряду опромінювачів, а k приймає значення 6, 8, 10 або 12). Далі блок комутації 14 формує функцію переключення

опромінювачів за розробленим раніше алгоритмом.

При автоматичному режимі роботи перемикач Р/А переводять натисканням у положення А – автоматичний режим роботи. При цьому пристрій виконує ті ж функції, що і в ручному режимі, але кількість рядів ламп у групі і, відповідно, кількість тактів у періоді обирається в залежності від сигналів від приладу "Ритм-1". В автоматичному режимі спочатку відбувається перевід всіх елементів у нульовий стан. Далі на вхід блоку 1 надходить сигнал з кнопки Р/А, що формує робочий сигнал з врахуванням інформації від приладу "Ритм-1" (період та нижній рівень опроміненості) елементом 11, який потім надходить до блоку 12. В подальшому схема працює подібно ручному режиму.

Зовнішній вигляд приладу "Хвиля-1" наведено на рис. 4.6.

Рис. 4.6. Зовнішній вигляд пристрою "Хвиля-1".

4.2. Результати лабораторних випробувань періодичного опромінення розсади овочевих культур

4.2.1. Методика проведення лабораторних випробувань

Метою проведення лабораторних випробувань є визначення рівня енергоспоживання при використанні періодичних режимів електроопромінення та дослідження впливу цих режимів на морфологічні параметри розсади в умовах, наближених до виробничих.

Пророщування насіння велося як зазначено у підрозділі 3.1. Вирощування розсади перцю та томатів велося в експериментальній теплиці площею 10 м², яка була поділена навпіл з встановленням світлонепроникної перегородки між контрольною та експериментальною ділянками. Рослини вирощувалися на стелажах, заповнених свіжим ґрунтом, до якого додавався компост з рослинних залишків у співвідношенні 4:1, як і рекомендується для вирощування розсади в умовах степової чорноземної зони України [8-10,15]. Ґрунт брався

кожного разу свіжий з перевіркою на вміст необхідних живильних речовин [9] перед заповненням стелажів він подрібнювався з видаленням каміння та інших сторонніх включень. Рослини висаджувалися на відстані 8 см (тобто забезпечувалась площа живлення біля 64 см² згідно рекомендацій [8-10]) одна від одної без застосування пікірування.

Полив рослин вівся теплою відстояною водою (температура біля 22...24°C) при зниженні вологості ґрунту нижче 65% ПВ з орієнтовною витратою 10...15 л/м².

Температура повітря підтримувалася з застосуванням електричного обігріву в межах 14...16 °C при відключенні опромінення та 18...20°C при включенні. На контрольній ділянці опромінення велося у постійному режимі при значенні постійного рівня опромінення 60 Вт/м² ФАР з тривалістю 12 годин за добу, визначену агротехнічними вимогами [8-10,15,222]. Для періодичного режиму опромінення використовувалися режими, що відповідають першому та другому пікам АЧХ СК БЕП, при цьому постійна складова рівня опромінення була 20 Вт/м² ФАР, а змінна – 40 Вт/м² ФАР (відповідає нульовому рівню для варіювання цього фактору у рівняннях регресії) з такими ж тривалостями опромінення на протязі доби, як і для контролю. У зв'язку з тим, що необхідно було мати можливість використовувати режими, що відповідають другому піку АЧХ, як опромінювачі використовувалися лампи розжарювання ПГ-220-1000 з водяним фільтром товщиною 15 см для зменшення надлишкового випромінювання у інфрачервоній області спектру, які комутувалися за допомогою описаного вище приладу "Ритм-1". Також провадилося вирощування розсади за тих же умов при використанні як опромінювачів ламп високого тиску ДРЛФ-400 тільки для режимів, що відповідають першому піку АЧХ СК БЕП.

Згідно агротехнічних вимог вирощування розсади закінчувалося при досягненні рослинами фази розвитку, якій відповідає наявність 9 справжнього листа для томатів та перцю та 8 справжнього листа для баклажанів [9,15,222]. При вирощуванні розсади овочевих культур пікірування не використовувалося. При досягненні розсадою цієї фази розвитку визначалися час вирощування та спожита на опромінення електрична енергія за показаннями лічильників енергії, які контролювали тільки споживання енергії опромінювачами, з перерахуванням на площу ділянки. Морфологічні характеристики рослин визначалися для 100 рослин кожної культури, які були зібрані рівномірно з різних ділянок площі вирощування, при цьому рослини бралися разом з оточуючим ґрунтом, після чого корені ретельно відмивалися від ґрунту у проточній воді.

4.2.2. Енергоспоживання при випробуванні різних періодичних режимів опромінення

Для того, щоб перевірити, чи дійсно при встановленні періодичності опромінення розсади овочевих культур за значеннями, що відповідають

пікам АЧХ СК БЕП рослин, спостерігається найбільша економія енергії, що йде на опромінення, було проведено вирощування розсади в експериментальній теплиці при застосуванні таких режимів опромінення (з параметрами, що вказані у попередньому пункті):

- 1) постійний рівень опромінення (контроль);
- 2) до 8-го дня від появи першого справжнього листа – період у 75 хв., після – середнє від значень періодів від 8-го до 52-го днів, тобто за формулою

де T_i – значення періоду, обчислене за рівнянням регресії для i -го дня від появи першого листка, хв.,

з наступним округленням до 0,5 хвилин;

- 3) до 8-го дня від появи першого справжнього листа – період у 75 хв., від 8-го до 22-го – середнє від значень періодів за цей термін, від 23-го до 37-го – середнє від значень періодів за цей термін, від 38-го – середнє від значень періодів, обрахованих від 38-го до 52-го днів, тобто за формулами

- 4) періодичність опромінення встановлювалася приладом “Ритм-1”.

Таким чином, режим 3 буде проміжним між режимами 2 та 4. Вибір інтервалів часу, за який осереднюється значення періоду, обумовлений тим, що на початку та наприкінці вирощування розсади значення періодів швидко змінюються. Значення періодів для режимів 2 та 3 наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 –
Значення періодичності опромінення у різних режимах

Режим	Вік від появи першого листа, діб	Томати сорту Ласточка		Перець сорту Подарок Молдови		Баклажани сорту Алмаз	
		1-й пік АЧХ СК БЕП	2-й пік АЧХ СК БЕП	1-й пік АЧХ СК БЕП	2-й пік АЧХ СК БЕП	1-й пік АЧХ СК БЕП	2-й пік АЧХ СК БЕП
2	8-22	49,5	10,0	60,5	13,5	53,0	10,5
	23-37	33,0	7,0	37,5	8,0	34,0	9,0
	від 38	56,0	8,5	54,0	11,5	59,0	12,0
3	від 8	43,5	8,0	48,5	10,5	47,0	10,5

Обчислена періодичність опромінення встановлювалася для цих режимів за допомогою реле часу. Експеримент провадився при

застосуванні ламп розжарювання (для обох піків) та люмінесцентних ламп високого тиску (тільки для першого піку). У другому випадку при настроюванні приладів управління враховувався час пуску ламп. Для того, щоб виключити вплив природного фону опромінення на рослини дослід провадився при екрануванні приміщення світло відбивною та світлонепроникними плівками.

Значення питомого енергоспоживання при опроміненні розсади у різних режимах при застосуванні ламп розжарювання та люмінесцентних ламп наведені для томатів у табл. 4.2, для перцю – у табл. 4.3, для баклажанів - у табл. 4.4. та на рис.4.7-4.9.

Таблиця 4.2 –

Значення питомого енергоспоживання при вирощуванні розсади томатів сорту Ласточка у різних режимах

Опр омін юва ч	Показник	Реж им 1 (конт роль)	Пік 1			Пік 2		
			Реж им 2	Реж им 3	Реж им 4	Реж им 2	Реж им 3	Реж им 4
Лам па роз жар юва ння	Час вирощування, діб	55	54	53	51	53	52	50
	Питоме споживання енергії, кВт·год/м ² (% до контролю)	631 (100)	419 (66,4)	413 (65,5)	398 (63,1)	416 (65,9)	407 (64,5)	390 (61,8)
ДРЛ Ф- 400	Час вирощування, діб	54	54	53	50	-	-	-
	Питоме споживання енергії, кВт·год/м ² (% до контролю)	272 (100)	195 (71,7)	193 (70,9)	180 (66,2)	-	-	-

Таблиця 4.3 –

Значення питомого енергоспоживання при вирощуванні розсади перцю сорту Подарок Молдови у різних режимах

Опр омін юва ч	Показник	Реж им 1 (конт роль)	Пік 1			Пік 2		
			Реж им 2	Реж им 3	Реж им 4	Реж им 2	Реж им 3	Реж им 4

Лампа розжарювання	Час вирощування, діб	62	61	59	56	59	57	55
	Питоме споживання енергії, кВт·год/м ² (% до контролю)	710 (100)	486 (68,5)	470 (66,2)	443 (62,4)	460 (64,8)	450 (63,4)	441 (62,1)
ДРЛ Ф-400	Час вирощування, діб	61	60	58	55	-	-	-
	Питоме споживання енергії, кВт·год/м ² (% до контролю)	308 (100)	224 (72,7)	218 (70,8)	201 (65,3)	-	-	-

Як можна бачити з отриманих даних, при використанні періодів, що відповідають пікам АЧХ СК БЕП (режим 4) дійсно має місце найбільше енергозбереження, і до того ж спостерігається максимальне прискорення розвитку розсади, тоді як у режимі 2 таке прискорення практично відсутнє, особливо для першого піка. Тому найбільш доцільним буде саме використання режиму 4, оскільки при цьому у спорудах закритого ґрунту буде наявною ще й економія теплової енергії, води, добрив та інших ресурсів. Слід зазначити, що режими 2 та 3 для піку 2 були значно ефективнішими за ті ж режими для піку 1 ймовірно через те, що для піку 2 значення резонансних періодів мають помітно меншу дисперсію.

Питоме енергоспоживання при застосуванні адаптивного управління опроміненням виявилось на 33...38% меншим, ніж при постійному опроміненні при зменшенні строку вирощування розсади на 4...8 діб.

Таблиця 4.4 –
Значення питомого енергоспоживання при вирощуванні розсади баклажанів сорту Алмаз у різних режимах

Опр омін юва ч	Показник	Реж им 1 (конт роль)	Пік 1			Пік 2		
			Реж им 2	Реж им 3	Реж им 4	Реж им 2	Реж им 3	Реж им 4
	Час вирощування, діб	68	67	65	61	65	63	61

Лам па роз жар юва ння	Питоме споживання енергії, кВт·год/м ² (% до контролю)	778 (100)	518 (66,5)	502 (64,5)	485 (62,3)	505 (64,9)	490 (63,0)	483 (62,1)
ДРЛ Ф- 400	Час вирощування, діб	69	68	66	60	-	-	-
	Питоме споживання енергії, кВт·год/м ² (% до контролю)	349 (100)	248 (71,1)	241 (69,1)	227 (65,0)	-	-	-

З результатів дослідів бачимо, що при застосуванні ламп розжарювання та люмінесцентних ламп високого тиску стимулюючий ефект практично був тотожним, проте в другому випадку споживання енергії буде меншим через кращі енергетичні та світлотехнічні характеристики джерела опромінення. Те, що при застосуванні періодичних режимів відносно зниження споживання електроенергії було для ламп ДРЛФ-400 дещо меншим, ніж для ламп розжарювання пояснюється більш частими пусками ламп в періодичних режимах, при яких втрати в лампах високого тиску вищі.

Рис. 4.7. Час вирощування розсади при різних режимах опромінення.

Рис. 4.8. Питомі витрати електроенергії у різних режимах опромінювання при використанні ламп розжарювання.

Рис. 4.9. Питомі витрати електроенергії у різних режимах опромінювання при використанні ламп ДРЛФ-400.

Таким чином, доведено, що застосуванню адаптивного управління опроміненням за визначеними моделями у вигляді рівнянь регресії дійсно відповідає найбільше енергозбереження та максимальне прискорення

розвитку рослин для обох низькочастотних піків АЧХ СК БЕП а також можливість використання для створення зазначених режимів ламп високого тиску (для періодів, що відповідають першому піку АЧХ СК БЕП) та ламп розжарювання.

4.2.3. Вплив періодичного опромінення розсади овочевих культур з встановленням періодів за піками АЧХ СК БЕП на її якість

У ході лабораторних випробувань визначалися морфологічні параметри рослин, що були отримані при вирощуванні при застосуванні відповідних режимів опромінення, а саме число листів, довжина та маса надземної частини, маса кореневої частини та співвідношення маси кореневої частини до маси всієї рослини. Для визначення морфологічних параметрів використовувалися результати вимірювання параметрів для 100 рослин у кожній з груп.

Інформація про середні дані для деяких морфологічних параметрів (а саме довжини надземної частини та маси надземної та підземної частин рослини та їх співвідношення) розсади овочевих культур, що були отримані при цих режимах наведена у табл. 4.5. та 4.6. Оскільки морфологічні параметри рослин, що вирощувалися при застосуванні різних джерел опромінення, не мали суттєвих розбіжностей в цих таблицях наведені дані щодо рослин, які вирощувалися при застосуванні ламп розжарювання для того, щоб відобразити вплив режимів, що відповідають обом пікам. Те ж стосується і даних для рис.4.10 – 4.18.

У табл. 4.5. та 4.6. використані такі позначення: ТЛ – томати сорту Ласточка, ППМ – перець сорту Подарок Молдови, БА – баклажани сорту Алмаз.

Таблиця 4.5 –
Морфологічні характеристики надземної частини рослин при вирощуванні розсади у різних режимах

Показник (середнє)	Періодичне опромінення						Контроль			
	Пік 1			Пік 2						
	ТЛ	ППМ	БА	ТЛ	ППМ	БА	ТЛ	ППМ	БА	
Довжина, см	5,4	2 2 1,8	6,2	2 2 5,0	2 2 2,0	2 2 6,8	2 2 3,9	2 2 1,0	2 2 4,9	2
Маса, г.	5,8	2 9 ,4	9,4	1 2 6,3	2 9 ,6	9,6	1 2 3,4	2 9 ,2	9 1 7,1	1

Розподіл морфологічних показників розсади овочевих культур, що вирощувалися при різних режимах опромінення, показано на рис. 4.10. - 4.18.

Таблиця 4.6 –

Морфологічні характеристики кореневої частини рослин при
вирощуванні розсади у різних режимах

Показник (середнє)	Періодичне опромінення						Контроль		
	Пік 1			Пік 2					
	ТЛ	ППМ	БА	ТЛ	ППМ	БА	ТЛ	ППМ	БА
Маса, г.	2,84	1,12	0,98	2,88	1,13	1,07	2,63	0,83	0,79
Відношення до маси рослини, %.	10,2	10,6	5,1	10,1	10,6	10,1	10,1	8,3	4,5

Як видно з отриманих даних, при вирощуванні розсади овочевих культур при періодичних режимах спостерігається прискорений розвиток розсади та більша рівномірність у параметрах розсади у порівнянні з контрольною групою як для періодів, що відповідають першому, так і другому пікам АЧХ СК БЕП, тобто якість розсади покращується. Зокрема, позитивною рисою розсади, яка вирощувалася при періодичних режимах опромінення є той факт, що відбулося досить помітне збільшення маси кореневої системи (див. рис. 4.12, 4.15, 4.18) та співвідношення маси кореневої системи до маси всієї рослини (див. табл. 4.6). Ці показники є важливими з точки зору більшого проценту розсади, яка прийнялася, та скорішого отримання раннього врожаю, чому сприяють зазначені морфологічні показники [11,15]. Слід зазначити, що покращення цих показників було досягнуто без застосування обробки розсади хімічними препаратами. З отриманих даних бачимо, що є перспективним використовувати режими опромінення, що відповідають другому піку АЧХ СК БЕП, при вирішенні питання про можливість застосування більш ефективних щодо використання електроенергії люмінесцентних опромінювачів.

Рис. 4.10. Розподіл розсади томатів сорту Ласточка при різних режимах опромінення за довжиною надземної частини.

Рис. 4.11. Розподіл розсади томатів сорту Ласточка при різних режимах опромінення за масою надземної частини.

Рис. 4.12. Розподіл розсади томатів сорту Ласточка при різних режимах опромінення за масою кореневої системи.

Рис. 4.13. Розподіл розсади перцю сорту Подарок Молдови при різних режимах опромінення за довжиною надземної частини.

Рис. 4.14. Розподіл розсади перцю сорту Подарок Молдови при різних режимах опромінення за масою надземної частини.

Рис. 4.15. Розподіл розсади перцю сорту Подарок Молдови при різних режимах опромінення за масою кореневої системи.

Рис. 4.16. Розподіл розсади перцю сорту Алмаз при різних режимах опромінення за довжиною надземної частини.

Рис. 4.17. Розподіл розсади перцю сорту Алмаз при різних режимах опромінення за масою надземної частини.

Рис. 4.18. Розподіл розсади перцю сорту Алмаз при різних режимах опромінення за масою кореневої системи.

4.3 Результати випробувань періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур у виробничих умовах

Як показали попередні експериментальні дослідження, з точки зору енергозбереження доцільним є як використання періодичних режимів, що відповідають першому піку СХ СК БЕП при використанні газорозрядних ламп високого тиску, так і при використанні періодичних режимів, що відповідають другому піку СХ СК БЕП. Такі режими є вигідними навіть при використанні ламп розжарювання, або ще краще при використанні газорозрядних ламп високого тиску при використанні спеціальних схем включення [24,34, 37,40,44], або ж при використанні ламп розжарення для створення змінної складової рівня опромінення в поєднанні з газорозрядними лампами високого тиску, які створюють постійну складову рівня опромінення. При цьому використовується відношення тривалості світлової фази до тривалості періоду близьке до $m \cong 0,5$, що відповідає найнижчій витраті енергії на створення одиниці сухої маси рослини з тієї ж площини [198,199].

При проведенні виробничих випробувань періодичних режимів опромінення за наведеним вище алгоритмом використовувалися періодичні режими, що відповідають першому піку АЧХ СК БЕП, оскільки використовувалися як джерела світла лампи високого тиску типу ДРЛФ-

400 зі звичайними пусковими пристроями. При проведенні виробничих випробувань у СФГ "Прогрес-2" Бериславського району Херсонської області (далі на рис. 4.19. – 4.24. та у табл. 4.7. та 4.8. позначене як Об'єкт 1 або скорочено О1) площа розсадного відділення у 600 м² була поділена на дві рівні ділянки для вирощування розсади томатів сорту Ласточка та перцю сорту Подарок Молдови з використанням для управління періодичністю опромінення приладу "Ритм-1". При цьому вирощування розсади велося з використанням поліетиленових мішків з ґрунтом, для томатів – з пікіруванням, а для перцю – без пікірування. Вирощування розсади, а потім і отримання урожаю велося за стандартними технологіями з дотриманням необхідних агротехнічних прийомів і умов [8,9,15,222].

Виробничі випробування у СОК "Ґрунт" Каховського району Херсонської області (далі на рис. 4.19. – 4.24. та у табл. 4.7. та 4.8. позначене як Об'єкт 2 або скорочено О2) проводилися у розсадному відділенні теплиці площею у 1000 м², що було поділено навпіл для вирощування розсади томатів сорту Ласточка та перцю сорту Подарок Молдови безпосередньо на поверхні ґрунту без застосування пікірування з використанням для управління періодичністю опромінення приладів "Ритм-1" та "Хвиля-1" за алгоритмом, описаним у підрозділі 4.1 при вирощуванні розсади у торфоплитах, при умовах, аналогічних вказаним вище.

Як і при експериментальних випробуваннях, при проведенні виробничих випробувань розсада вирощувалася до появи 9 справжнього листа у основної маси рослин. Для порівняння були враховані відповідні показники за попередні роки, коли опромінення при вирощуванні розсади велося за звичайною схемою. Витрати електроенергії фіксувалися за показаннями лічильників електричної енергії та приводилися до одиниці площі розсадного відділення. Надходження урожаю від рослин, що вирощувалися з отриманої розсади, велося за зростаючим підсумком з перерахуванням на одиницю площі. Результати випробувань наведені у табл. 4.7. та 4.8.

Таблиця 4.7 -

Результати виробничих випробувань при вирощуванні томатів сорту Ласточка.

Об'єкт	Показник	Контроль				Експеримент
		1998/9 9 рік	1999/0 0 рік	2000/0 1 рік	середнє	2000/01 рік
1	Час вирощування, діб	55	54	56	55	50
	Питомі енерговитрати кВт·год/м ²	146	138	151	145	94
	Врожайність, кг/м ²	17,5	15,9	17,0	16,8	18,4

2	Час вирощування, діб	55	55	55	55	49
	Питомі енерговитрати кВт·год/м ²	150	156	144	150	95
	Врожайність, кг/м ²	18,1	16,8	17,6	17,5	19,4

Таблиця 4.8 -

Результати виробничих випробувань при вирощуванні перцю сорту Подарок Молдови.

Об'єкт	Показник	Контроль				Експеримент
		1998/99 рік	1999/00 рік	2000/01 рік	середнє	2000/01 рік
1	Час вирощування, діб	62	61	60	61	56
	Питомі енерговитрати, кВт·год/м ²	312	316	308	312	206
	Врожайність, кг/м ²	7,5	7,9	7,7	7,7	8,5
2	Час вирощування, діб	60	64	63	62	54
	Питомі енерговитрати, кВт·год/м ²	302	316	312	310	198
	Врожайність, кг/м ²	7,6	7,8	7,7	7,7	8,7

Надходження врожаю з одиниці площі для рослин, що були отримані зі згаданої розсади, збільшилося для томатів на 1,6 кг/м² (або ж на 9,7%), а для перцю на 0,8 кг/м² (або ж на 9,6%) на об'єкті 1, та відповідно на 1,9 кг/м² (або ж на 11%) та на 1,0 кг/м² (або ж на 13%) на об'єкті 2. Загалом, як бачимо, використання разом приладів "Ритм-1" та "Хвиля-1" є більш ефективним.

Також визначалися морфологічні параметри отриманих рослин виходячи з вимірювань для випадково вибраних 100 рослин для кожної ділянки (рис. 4.19. – 4.24.) аналогічно описаним вище експериментальним дослідженням. Як видно з отриманих даних, при вирощуванні розсади овочевих культур при використанні періодичних режимів опромінення спостерігається прискорений розвиток розсади та більша рівномірність у параметрах розсади.

Рис. 4.19. Розподіл розсади томатів сорту Ласточка за довжиною надземної частини.

Також підтвердився ефект прискореного розвитку кореневої системи рослин, які вирощувалися при застосуванні періодичних режимів електроопромінення, особливо при сумісному застосуванні приладів "Ритм-1" та "Хвиля-1", яке було здійснене на об'єкті 2, та підтвердився позитивний вплив цього показника на врожайність овочевих культур, що були отримані з зазначеної розсади.

Рис. 4.20. Розподіл розсади томатів сорту Ласточка за масою надземної частини.

Рис. 4.21. Розподіл розсади томатів сорту Ласточка за масою кореневої системи.

Рис. 4.22. Розподіл розсади перцю сорту Подарок Молдови за довжиною надземної частини.

Рис. 4.23. Розподіл розсади перцю сорту Подарок Молдови за масою надземної частини.

Рис. 4.24. Розподіл розсади перцю сорту Подарок Молдови за масою кореневої системи.

До того ж питоме споживання електричної енергії зменшилося на 35% для томатів і на 34% для перцю на об'єкті 1 та на 37% та 36% відповідно на об'єкті 2. Таким чином, підтверджується доцільність сумісного застосування приладів в спорудах великої площі при застосуванні технологій вирощування розсади з забезпеченням взаємодії рослин у фотоценозі через кореневу систему.

4.4. Визначення економічної ефективності від впровадження біотехнічної системи "розсада-середовище"

Застосування періодичних режимів опромінення розсади веде до економії енергоресурсів як за рахунок меншого споживання електроенергії, так і за рахунок деякого прискорення розвитку розсади, що в кінцевому випадку теж веде до економії енергоресурсів. Слід зазначити, що прискорення розвитку розсади сприяє отриманню більшого раннього врожаю (як правило, більш дорогого) як і деякому збільшенню загального врожаю, тобто, веде до отримання додаткового прибутку [6,198,200]. Проте, через велику кількість та різноманітність факторів, які впливають на якісні та кількісні показники врожайності (перш за все це ступінь дотримання агротехнічних вимог при вирощуванні рослин), кількісний показник впливу застосування періодичних режимів на додатковий прибуток оцінити доволі важко. Тому при подальших розрахунках цей ефект враховується як різниця між врожайністю рослин, що вирощувалися з розсади, отриманої при застосуванні періодичних режимів, та рослин з розсади, що вирощувалася при застосуванні стандартних режимів опромінення [8,9,15] в перерахунку на площу, яка буде зайнята розсадою, що вирощувалася на площі розсадного відділення у 0,1 га.

В подальшому обрахування економічної ефективності будемо провадити для визначеної площі розсадного відділення (наприклад, в 1000 м², що є типовим значенням для площі розсадних відділень невеликих теплиць). Таким чином, за один рік вирощування розсади рослин економічний ефект від впровадження періодичних режимів опромінення рослин складе:

$$E_p = N_{\text{ц}} \cdot (\Delta W \cdot Be + \Delta P \cdot S) - \Delta A_0, \quad (4.4)$$

де $N_{\text{ц}}$ – кількість циклів вирощування розсади за рік;

ΔW - економія електроенергії за рахунок зменшення енергоспоживання за весь термін вирощування розсади, кВт·год;

Be – діючий тариф на електроенергію для сільськогосподарських виробників, $Be = 0,11$ грн / кВт·год;

ΔP – вартість додатково отриманої продукції з 1 га, грн;

S – площа, на якій вирощується отримана розсада, га;

ΔA_0 - амортизаційні відрахування на нове обладнання, що встановлюється, грн.

$$, \quad (4.5)$$

де ΔE - економія електроенергії при введенні періодичних режимів опромінення (за даними випробувань), %;

W_s - питома споживання електроенергії при вирощуванні розсади, кВт·год/м²;

S_p - площа розсадного відділення, м².

Розрахунок проведемо для варіанту використання періодичних режимів опромінення з використанням рівняння регресії для першого

піку, для яких є надійні данні виробничих випробувань окремо для вирощування розсади томатів та для вирощування розсади перцю та баклажанів. Відповідні величини тоді будемо позначати індексами "т" та "п" відповідно.

За отриманими даними, $\Delta E_p = 36\%$, $W_{Sp} = 310$ кВт·год/м² при вирощуванні розсади перцю та баклажанів та $\Delta E_t = 37\%$, $W_{St} = 150$ кВт·год/м² при вирощуванні розсади томатів, $S = 1000$ м², тоді при вирощуванні розсади томатів

$$W_t = 0,37 \cdot 150 \cdot 1000 = 55500 \text{ кВт·год},$$

а при вирощуванні розсади перцю та баклажанів

$$W_p = 0,36 \cdot 310 \cdot 1000 = 111600 \text{ кВт·год}.$$

В свою чергу

$$\Delta A_0 = a \cdot K_z, \quad (4.6)$$

де a - норма амортизаційних відрахувань на нове обладнання, $a = 0,15$ [46];

K_z - вартість додатково встановлених засобів керування та пускового обладнання, $K_{zt} = 66300$ грн. та $K_{zp} = 98600$ грн.

$$\Delta A_{0t} = 0,15 \cdot 66300 = 9945 \text{ грн.}$$

$$\Delta A_{0p} = 0,15 \cdot 98600 = 14790 \text{ грн.}$$

Вартість додатково отриманої продукції в перерахунку на 1 га (площа, яка займається розсадою з 0,1 га) для томатів і на 1,1 га для перцю

$$\Delta P = \Delta P \cdot C \cdot S, \quad (4.7)$$

де ΔP – додатковий врожай за результатами виробничих випробувань з 1 м², кг;

C – ціна за 1 кг продукції, грн;

S – площа, на якій вирощуються рослини, м².

Тоді обрахуємо за рівнянням (4.7) вартість додатково отриманої продукції для томатів, прийнявши (див. попередній підрозділ) $\Delta P = 1,7$ кг

$$\Delta P = 1,7 \cdot 6,5 \cdot 10000 = 110500 \text{ грн.},$$

та для перцю $\Delta P = 1,0$ кг

$$\Delta P = 1,0 \cdot 9,5 \cdot 10000 = 95000 \text{ грн.},$$

Тоді, якщо прийняти для вирощування розсади в двох сівоzmінах $N = 2$, площі $S_t = 1,0$ га $S_p = 1,2$ га то річний економічний ефект

$$E_{rt} = 2 \cdot (55500 \cdot 0,11 + 110500 \cdot 1,0) - 9945 = 223265 \text{ грн.}$$

$$E_{rp} = 2 \cdot (111600 \cdot 0,11 + 95000 \cdot 1,2) - 14790 = 237762 \text{ грн.}$$

Додаткові капіталовкладення на впровадження періодичних режимів опромінення розсади:

$$K_0 = K_M + K_P + K_K \quad (4.8)$$

де K_M - вартість переобладнання електричної мережі, грн.;

K_P - вартість переобладнання і наладки пускозахисної апаратури, грн.;

K_K – вартість пристрою керування, грн.

За даними калькуляцій та проведених виробничих випробувань $K_{Mt} = 66300$, $K_{Pt} = 74550$, $K_K = 640$, $K_{Mp} = 98600$, $K_{Pp} = 82280$, тоді

$$K_{0t} = 66300 + 74550 + 640 = 141490 \text{ грн.};$$

$$K_{0п}=98600+82280+640=181520 \text{ грн.}$$

Таким чином, термін окупності капіталовкладень:

$$, \quad (4.9)$$

року; року.

Для того, щоб визначити, чи будуть ефективними капіталовкладення, розглянемо два варіанта:

- 1) використання для переобладнання запозичених фінансових ресурсів;
- 2) використання для переобладнання власних фінансових ресурсів.

Для обох варіантів капіталовкладення будуть ефективними тільки в тому випадку, якщо існує рішення рівняння для $m > 0$

$$(4.10)$$

де K_0 - сума капітальних вкладень, грн.;

T - термін окупності капіталовкладень, років;

t – термін від отримання кредиту або направлення власних коштів на придбання обладнання до початку експлуатації модернізованого обладнання, приймаємо $t=0,25$ року;

P - процентна ставка банку на вільні засоби юридичної особи, розміщені в банку (у випадку напрямку на модернізацію власних засобів) або процентна ставка банку на кредит, що видається (у випадку притягнення кредитних засобів), % за рік.

Рівняння (4.10) при скороченні на K_0

$$(4.11)$$

є трансцендентним і не може бути розв'язаним у радикалах, тому це рівняння доцільно вирішувати графічно, при цьому можна буде також визначити межі термінів для повернення кредитів. Для цього достатньо побудувати графік функції

$$, \quad (4.12)$$

та визначити, при яких значеннях m функція $f(m)$ перетинає вісь абсцис. З врахуванням того, що середня банківська ставка на запозичені кошти $P=21\%$ річних а річний відсоток для довгострокового кредитування банком $P=37\%$ на рис. 4.21. та 4.22. було визначено при побудові графіків [203], що як у варіанті використання власних коштів, так і при використанні запозичень у банку капіталовкладення будуть вигідними і, таким чином, впровадження періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур є економічно доцільним.

Рис. 4.25. Визначення вигідності капіталовкладень при використанні кредиту.

Рис.4.26. Визначення вигідності капіталовкладень при використанні власних коштів.

Визначенні строки повернення кредитів наведено в табл. 4.9. В цій таблиці оптимальний строк повернення кредиту визначений як строк, при якому різниця між прямою росту доходів та кривою росту кредитної заборгованості є найбільшою, тобто при якому m функція $f(m)$ за рівнянням (4.12) на рис. 4.25 та 4.26 досягає мінімуму.

Таблиця 4.9 –

Вирощування розсади:	Строки повернення кредитів		
	Строки повернення кредитів з відсотками:		
	мінімальний	оптимальний	Максимальний
томатів	1,17	5,1	7,90
перцю та баклажанів	1,47	4,5	6,86

Таким чином, розрахунки показують, що впровадження періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур є економічно виправданим як при вирощуванні розсади томатів, так і при вирощуванні розсади перцю та баклажанів. Більш того, при існуючій тенденції до збільшення вартості енергоносіїв та зниження облікових банківських ставок економічні показники ефективності впровадження енергозберігаючих періодичних режимів опромінення розсади повинні ще більш поліпшитися.

4.5. Рекомендації щодо впровадження отриманих результатів у розсадних відділеннях споруд захищеного ґрунту

Як впливає з проведених досліджень, в розсадних відділеннях споруд закритого ґрунту найбільш ефективним є застосування запропонованого способу опромінення розсади овочевих культур при сумісному використанні приладів управління “Ритм-1” та “Хвиля-1”, що дозволяє використати ефект додаткової стимуляції рослин у мікрофотоценозі при застосуванні без горщечкових технологій вирощування розсади. Крім того, застосування приладу “Хвиля-1” дозволяє рознести у часі включення опромінювачів, запобігши тим самим перевантаженню мережі та апаратури. Цей прилад дозволяє автоматично підтримувати як змінну, так і постійну складову рівня опромінення. Тому застосування цього приладу, що має невелику собівартість, буде доцільним і в тому випадку, якщо для вирощування розсади (наприклад, з міркувань зниження трудомісткості чи інших) будуть застосовані технології з використанням горщечків, пакетів або касет [4,8-10,15]. Звичайно, в такому випадку стимуляція за рахунок взаємодії рослин у мікрофотоценозі буде відсутня. При використанні зазначених приладів з автоматичними системами управління мікрокліматом необхідно в тих з них, де передбачено введення температурної надбавки при підвищеному рівні опромінення (наприклад, для комплектів УТ-12УЗ, “Тельтов”, КТ-1 [48,49, 221]) необхідно встановити перемички паралельно резисторам надбавки для виключення її введення та від’єднати виходи для керування опроміненням від магнітних пускачів, приєднавши останні безпосередньо до приладу “Хвиля-1”.

Прилад “Хвиля-1” не можна застосовувати тільки в приміщеннях, де вміщується менше 12 рядів опромінювачів, тобто практично у всіх розсадних відділеннях теплиць, крім невеликих. Якщо ж буде прийняте рішення для управління застосовувати тільки прилад “Ритм-1” або ж реле часу з встановленням періодичності опромінення за значеннями, обчисленими за рівняннями регресії, то необхідно буде забезпечити у розсадному відділенні необхідний рівень постійної складової опромінення на рівні не менше 10 Вт/м² ФАР для томатів і не менше 15 Вт/м² ФАР для перцю та баклажанів, для чого необхідно виділити опромінювачі, якими будуть переключатися встановленими автоматичними системами управління мікрокліматом з встановленням їх задатчиків на згаданому рівні. При цьому необхідно під час подачі напруги на котушки магнітних пускачів, що комутують опромінювачі, що забезпечують змінну складову опромінення, заблокувати можливість комутацій опромінювачів, що забезпечують постійну складову, автоматичною системою управління, а в системах управління, що передбачають введення температурних надбавок (“Тельтов”, УТ-12УЗ та деякі інші) ще й блокування змін цих надбавок, для чого достатньо використати блок-контакти пускачів або проміжні реле.

Для використання приладів управління при вирощуванні розсади інших видів та сортів рослин необхідно (аналогічно з проведеним автором дослідженням) визначити відповідні рівняння регресії, а за ними провести перепрограмування ПЗП у приладі “Ритм-1” або внести відповідні зміни у програму для обчислення значень періодів (при використанні реле часу).

При вирішенні проблеми комутації більш економічних, ніж лампи розжарювання, люмінесцентних ламп високого тиску перспективним є використання режимів, що відповідають другому піку АЧХ СК БЕП, оскільки параметри таких режимів змінюються при рості розсади більш повільно та можуть бути легко реалізовані при використанні реле часу.

Висновки до розділу

1. За результатами проведених дослідів автором розроблено алгоритм періодичного опромінення розсади овочевих культур, який передбачає можливість вибору періодів опромінення, що відповідають першому чи другому піку АЧХ СК БЕП рослин відповідних видів та сортів при певних умовах опромінення, їх віку та температури навколишнього середовища.

2. При проведенні лабораторних досліджень розглядалися можливості та особливості реалізації згаданого алгоритму для періодів, що відповідають обом пікам АЧХ СК БЕП. Виявлено, що у всіх випадках при вирощуванні розсади овочевих культур розсада досягає етапу готовності (за який взято строк появи 9 справжнього листа для томату та перцю та 8 для баклажанів) на 4...8 діб раніше за ту, що вирощувалася при постійному рівні опромінення, при скороченні споживання енергії на 33...38%. При цьому розсада має більшу вирівненість за морфологічними параметрами.

3. Випробуваннями згаданого алгоритму опромінення в виробничих умовах при застосуванні періоди опромінення, що відповідають першому піку АЧХ підтверджено, що застосування періодичного опромінення сприяє прискоренню розвитку розсади на 5...7 діб та скороченню витрат електричної енергії на 34...37% та отриманню розсади більш високої якості за вирівненістю та розвитком кореневої системи, що призвело до збільшення врожайності для томатів на 9...11% та для перцю на 9...13%.

4. З результатів експериментальних та виробничих досліджень видно, що найбільш ефективною є реалізація алгоритму опромінення з використанням ефекту взаємодії рослин у мікрофотоценозі.

5. Проведені техніко-економічні розрахунки засвідчили досить високу економічну ефективність застосування періодичних режимів опромінення і показали, що капіталовкладення як при використанні власних фінансових резервів, так і при залученні кредитних ресурсів банків є економічно виправданими і тому доцільними. Зокрема, строк окупності капіталовкладень складе біля 0,64...0,76 року. Визначені економічно доцільні та найбільш вигідні строки повернення залучених

кредитів.

6. Застосування періодичних режимів опромінення розсади овочевих культур за запропонованим алгоритмом у спорудах захищеного ґрунту дозволить досягнути значної економії електроенергії та досягти прискорення розвитку розсади, поліпшення її якості та показників врожайності. Дано рекомендації щодо впровадження розробки у розсадних відділеннях споруд захищеного ґрунту.

ВИСНОВКИ

1. Одним з найбільш ефективних напрямків зниження енерговитрат є застосування періодичних режимів опромінення. Для ефективного зниження енерговитрат при нормальному розвитку розсади параметри таких режимів повинні бути добре обґрунтованими та змінюватися у залежності від стану рослин та середовища. Як параметр стану рослин обрано світлозалежні біоелектричні реакції, зв'язок яких з найважливішими параметрами фізіологічного стану рослин та параметрами оточуючого середовища є доведеним.

2. Амплітудно-частотні характеристики світлозалежних біоелектричних реакцій мають більш високу відтворюваність у порівнянні з окремими реакціями. Встановлення залежностей параметрів АЧХ СК БЕП рослин від умов навколишнього середовища та стану рослин дозволяє обґрунтувати параметри періодичних режимів опромінення за максимумами амплітуд СК БЕП, тобто, за піками АЧХ. Через параметричну нестаціонарність біотехнічного об'єкта управління, яким є розсада овочевих культур у системі "розсада-середовище", та для запобігання негативним наслідкам об'єкт-приладної взаємодії доцільним є адаптивне управління опроміненням у цій системі за моделлю.

3. З теоретичного аналізу основних реакцій в рослинних тканинах, що фотосинтезують, випливає, що існують певні діапазони періодів опромінення з найбільш ефективним використанням рослинами світлової енергії. Конкретні тривалості періодів для ефективних щодо енергоспоживання періодичних режимів опромінення залежать як від параметрів середовища, так і від параметрів рослин, причому ці залежності носять складний характер і їх треба визначати з використанням методів активного експерименту.

4. Запропоновано моделі рослин при виникненні СК БЕП як простих послідовних електричних контурів та наведено рішення диференціальних рівнянь, що їх описують. З розгляду моделі для процесу розповсюдження світлоіндукованих коливань в системі рослин у мікрофотоценозі як ланцюга з однакових лінійних зв'язаних осциляторів (як окремий осцилятор береться рослина) зроблено висновок, що при вирощуванні розсади овочевих культур при використанні періодичних режимів опромінення слід очікувати поліпшення ефективності використання рослинами світлової енергії без погіршення якісних показників розсади та навіть покращення розвиненості кореневої системи рослин.

5. При експериментальному дослідженні АЧХ СК БЕП розсади овочевих культур роду пасльонових у діапазоні частот $0,0005 \dots 0,1$ рад/с було виявлено три резонансних піки та встановлено зв'язок першого з них з механізмами устячкової регуляції рослин. Для практичного використання найбільш придатні періодичні режими опромінення, параметри яких відповідають першим двом низькочастотним пікам АЧХ СК БЕП, що лежать у діапазонах частот $0,0014 \dots 0,0043$ рад/с та $0,0061 \dots 0,023$ рад/с відповідно. Експериментальні дослідження, що провадилися для ряду сортів зазначених культур, дозволили встановити залежності періодів та амплітуд СК БЕП для цих піків від стадії розвитку рослин, рівня змінної складової опромінення та температури повітря у вигляді рівнянь регресії.

6. При експериментальному дослідженні закономірностей виникнення та розповсюдження СК БЕП між органами однієї рослини та між сусідніми рослинами в мікрофотоценозі встановлено, що при використанні періодичних режимів опромінення має місце як стимуляція рослини в цілому, так і рослин у фітоценозі.

7. Отримання залежностей резонансних періодів від зазначених параметрів дозволило обґрунтувати спосіб періодичного опромінення розсади овочевих культур в умовах захищеного ґрунту та запропонувати мікропроцесорні пристрої для його реалізації. Розроблено програму для обчислення на ПЕОМ параметрів періодичних режимів опромінення для кількох видів та сортів рослин а також для обчислення параметрів моделей рослин.

8. Лабораторні випробування показали, що при застосуванні періодичних режимів опромінення з параметрами, що відповідають як першому, так і другому пікам АЧХ СК БЕП рослин, термін вирощування розсади овочевих культур скорочується на $4 \dots 8$ діб при економії електричної енергії на $33 \dots 38\%$. При цьому покращується якість розсади, особливо при застосуванні безгорщечкових методів вирощування, коли спостерігається стимуляція розвитку кореневої системи розсади.

9. Виробничі випробування періодичного опромінення розсади томатів, перцю та баклажанів, що провадилися в СФГ "Прогрес-2" Бериславського району Херсонської області та СОК "Грунт" Каховського району Херсонської області з параметрами, що відповідають першому піку АЧХ СК БЕП, показали, що строк отримання розсади скорочується на $5 \dots 7$

діб при зменшенні витрат електричної енергії на опромінення на 34...37%, а якість розсади покращилася. Випробування показали, що найбільш ефективною є реалізація алгоритму опромінення з використанням ефекту взаємодії рослин у мікрофотоценозі, тобто при застосуванні безгорщечкових технологій вирощування розсади. Загальна врожайність, отримана від рослин, вирощених з розсади, що вирощувалася при періодичному опроміненні, була більшою на 9...13% у порівнянні з контрольною групою.

10. Техніко-економічні розрахунки показали, що річний економічний ефект від застосування періодичних режимів з перерахунку на 0,1 га розсадного відділення теплиці при вирощуванні розсади томатів складе біля 223265 грн. при терміні окупності капіталовкладень біля 0,636 року, а при вирощуванні розсади перцю та баклажанів річний економічний ефект складе біля 237762 грн. при терміні окупності капіталовкладень біля 0,763 року. Після проведення досліджень за запропонованою методикою для інших сортів та культур з модернізацією пристроїв управління можливе широке впровадження періодичних режимів штучного опромінення розсади овочевих культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). – Кишинев: Штиинца, 1990. – 432 с.
2. Яковенко К.І. Овочівництво України на порозі ХХІ століття // Вісник аграрної науки. – 2000. - №8. – С. 21-24.
3. О государственной поддержке овощеводства защищенного грунта // Картофель и овощи. – 2000. - №2. – С. 13.
4. Казеко В.Г. Эффективность овощеводства защищенного грунта. – Мн.: Ураджай, 1990. – 48 с.
5. Мошков В.С. Актиноритмизм растений. – М.: ВО Агропромиздат, 1987. – 272 с.
6. Никифорова Л.Є. Обґрунтування енергозберігаючих режимів електричного опромінення рослин огірків в умовах захищеного ґрунту: Автореф. дис...канд. техн. наук:) 05.20.02. / ТДАТА – Мелітополь, 1999.- 22 с.
7. Мартыненко А.И. Идентификация растительных биосистем с использованием информации от растений: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.07. – К., 1993.- 282 с.
8. **Индустриальная технология производства рассады овощных культур / Л.М. Шульгина, Х. Симидчиев, Г. Цеклеев, В. Каназирска / Под. ред. Л.М. Шульгиной. – К.: Урожай, 1990. – 192 с.**
9. **Довідник по овочівництву закритого ґрунту / Л.М. Шульгіна, Г. Л. Бондаренко, М.О. Скляревський та ін./ За ред. Л.М. Шульгіної.- К.: Урожай, 1989.- 216 с.**

10. Гордій М.В., Васянович В.Д., Одобецька А.О. Вирощування овочів у міжгосподарському теплично-овочевому комбінаті. – К.: Урожай. – 96 с.
11. Микаелян Г.А., Краевая Н.И. Промышленная технология производства рассады овощных культур. – М.: Колос, 1984. – 143 с.
12. Леман В.М. Проблемы и перспективы светокультуры растений в промышленных теплицах // Труды ЧИМЭСХ., вып. 75.- Челябинск: ЧИМЭСХ. – 1973. - С. 251-253.
13. Прищеп Л.Г. Эффективная электрификация защищенного грунта. – М.: Колос, 1980. – 208 с.
14. Рысс А.А., Гурвич Л.И. Автоматическое управление температурным режимом в теплицах. – М.: Агропромиздат, 1986. – 128 с.
15. Лихацкий В.И., Бургарт Ю.Є. Овочівництво: Практикум. – К.: Вища шк., 1994. – 366 с.
16. Леман В.М. Курс светокультуры растений. - М.: Высшая школа, 1961.- 206 с.
17. Нормирование светотехнических установок для светокультуры растений / А.М. Бодолати, Е.М. Мудрак, Г.С. Сарычев, О.К. Черепанова, Г.Я. Иванов // Электрификация и автоматизация технологических процессов в сельском хозяйстве Сибири: Сб. науч. тр. ВАСХНИЛ. Сиб.отделение. – Новосибирск: Сиб. ИМЭ, 1990. – С. 82-85.
18. Фотосинтез и биопродуктивность: методы определения: Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. А.Т. Мокроносова. – М.: ВО Агропромиздат, 1989. –460 с.
19. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений / Н.Н. Третьяков, Е.И. Кошкин, Н.М. Макрушин и др.; под ред. Н.Н. Третьякова. – М.: Колос, 1998. – 640 с.
20. Рубин Б.А. Проблемы физиологии в современном растениеводстве. – М.: Колос, 1979, - 302 с.
21. Свет и развитие растений / Шаин С.С. и др. - М.: Сельхозиздат, 1963,- 624 с.
22. Мошков Б.С. Роль лучистой энергии в выявлении потенциальной продуктивности растений. – М.: Наука, 1973. - 60 с.
23. Сторожев П.И., Гусаров В.П. Влияние УФ-облучения на качество и урожайность овощной продукции в зимних теплицах // Применение электроэнергии в технологических процессах сельскохозяйственного производства. – М.: ВИЭСХ, 1988.-- С. 46-54.
24. Скрыпник Н.Н., Герасимчук Ю.В. Исследование характеристик тепличных облучателей растений. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства., вып. 48, К.: Урожай, 1980. - С. 87-90.
25. Большина Н.П. Спектры ламп с учетом интенсивности излучения для растений // Эффективность электрификации с.х. производства в Предуралье. – Ижевск: Ижевский СХИ, 1983. – С. 55-62

26. Голобокова Р.А., Зайцев Ю.Н., Квашин Г.Н. Эффективность воздействия различных газоразрядных ламп // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1987. - №3 - С. 57-58.
27. Зайцев В.Н., Свентицкий И.И. Оценка действия оптического излучения на растения // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. - 1979. - №12. – С. 10-12.
28. Китлаев Б.Н. Биофизические аспекты перспективных электро-технологий в растениеводстве // Основные вопросы энергетики в защищенном грунте. – М.: ВИЭСХ, 1982.- С. 65-72.
29. Попова О.Ф., Эйдельман З.М., Пайкина Э.Я. О развитии фотохимической активности пластиды и связи с биосинтезом хлорофиллов а и b // Фотосинтез и пигменты как факторы урожая. - К.: Наукова думка, 1965. – С. 109-116.
30. Китлаев Б.Н. Теоретические и прикладные аспекты фотоэлектрических воздействий на семена и растения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1982. - №4. – С. 21-26.
31. Сторожев П.И. Исследование по обоснованию автоматического регулирования в теплице температуры воздуха, согласованной с оптическим облучением растений: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.20.02 / МИИСП – М., 1974.- 22 с.
32. Борисов Ю.С., Левашов В.Г., Козлов Ю.А. Оценка ущерба от отказов электрооборудования в теплицах // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства. Вып. 1(59). – М.: ВИЭСХ.- 1987. - С. 16-23.
33. Свентицкий И.И., Георгиев Г.Д. Эксергетический анализ при решении задач получения энергии и биомассы // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. - №3. – С.19-21.
34. Глухов И.В., Кузнецов О.И. К вопросу светимпульсного облучения растений // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства. Вып. 2(29). - М.: ВИЭСХ. - 1976. – С. 8-12.
35. Молчанов А.Г. Способ регулирования фотосинтетической облученности // Электрификация и автоматизация с.х. производства. Науч. труды Ставропольского СХИ.- Ставрополь: Ставропольский СХИ. – 1984.- С. 15-17.
36. Молчанов А.Г. Влияние переменного облучения на рассаду огурцов в защищенном грунте // Электрификация и автоматизация с. х. производства. Науч. труды Ставропольского СХИ., вып. 44, том 5 - Ставрополь: Ставропольский СХИ. – 1981.- С. 27-29.
37. Большина Н.П., Овчукова С.А., Козинский В.А. Обеспечение режимов искусственного облучения растений // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1984. – №10. - С. 55-57.
38. Шевелуха В.С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. – М.: Колос, 1980. – 455 с.

39. Никифорова Л.Е., Сабо А.Г., Шабала С.Н. Энергосберегающий эффект при ритмических изменениях освещения при выращивании растений в условиях защищенного грунта // Материалы Республиканского научно-техн. семинара по улучшению показателей тепловых двигателей и ресурсосбережению.- Мелитополь: ТГАТА.- 1995.-С. 22.

40. Живописцев Е.Н., Большина Н.П., Обухов С.Г. Совершенствование установок для облучения растений // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1984. – №10. - С. 54-55.

41. Никифорова Л.Є. Залежність біоелектричної реакції рослин від дії зовнішніх факторів // Труды Таврической государственной академии – Вып.1., Т. 8. - Мелитополь: ТГАТА, 1998. – С. 47-51.

42. Горышина Т.К. Фотосинтетический аппарат растений и условия среды. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. – 204 с.

43. Рыбин И.А. Феномен автоколебаний светозависимой биоэлектрической активности листьев кукурузы // Науч. докл. высш. школы. Биол. науки. – 1975. - №7. – С. 40-43.

44. Кистень Г.Е., Скрыпник Н.Н., Герасимчук Ю.В., Садовый А.Ф., Ковальшин Б.М. Установка для импульсного облучения растений // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1985. – №5. - С. 51-54.

45. Ермак В.Д., Кукарских А.К., Носов В.В. Полевая автоматическая измерительная система для биологических исследований // Приборное оснащение и автоматизация научных исследований в биологии (тезисы докл. Всесоюзной конф. "Биоприбор-81"). – Кишинев. – 1981. – Т. 1. – С. 29-30.

46. Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики. – М.: Агропромиздат, 1990. – 243 с.

47. Садовой А.Ф., Советов В.П. Установки искусственного климата. – М.: Агропромиздат, 1985. – 72 с.

48. Беликов Ю.М. Автоматизация управления микроклиматом в тепличных комбинатах // Техника в сельском хозяйстве. – 1984. - №1. – С. 26-29.

49. Рысс А.А., Гурвич Л.И. Синтез оптимального управляющего устройства температурным режимом теплицы // Автоматизация технологических процессов в полеводстве и овощеводстве. Науч. труды ЧИМЭСХ. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1984. – С. 32-40.

50. Способ оптимизации условий выращивания зерновых культур: А.с. 1470238 СССР, МКИ А01G 7/00 / Е.И. Ермаков, С.Н. Мелещенко (СССР). - Открытия. Изобретения. – 1989. - № 13.

51. Система оптимизации температурного режима растений: А.с. 468611 СССР, МКИ А01G 7/00 / А.В. Малиновский, В.Л. Корбут (СССР). - Бюлл. изобретений. – 1975. - № 16.

52. Система регулирования режима выращивания растений на открытой плантации: А.с. 1223858 СССР, МКИ А01G 7/00 / Д.И. Авалиани, А.Б. Брандт, В.А. Гуркин (СССР). - Бюлл. изобретений. – 1986. - № 14.

53. Система оптимизации факторов внешней среды при выращивании растений: А.с. 1680011 СССР, МКИ А01G 7/00 / В.А. Мудрик, Вл.А. Мудрик (СССР). - Бюлл. изобретений. - 1991. - № 36.

54. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н., Жакотэ А.Г. Влияние периодического светового воздействия на резонансной частоте колебаний биопотенциалов на рост и развитие растений // Физиология и биохимия культурных растений. - 1989. - Т.21. - С.27-31.

55. Жученко А.А., Зеликовский З.И., Балашов А.Н., Базиленко О.К., Казанцев Э.Ф. Проблемно-ориентированный комплекс для эколого-генетических исследований // Приборное оснащение и автоматизация научных исследований в биологии (тезисы докл. Всесоюзной конф. "Биоприбор-81"). - Кишинев. - 1981. - Т. 1. - С. 3-5.

56. Устройство для автоматического управления поливом: А.с. 1017230 СССР, МКИ А01G 25/16 / О.А. Ильницкий, С.С. Радченко, В.А. Баранецкий (СССР). - Бюлл. изобретений. - 1983. - № 18.

57. Способ управления процессом выращивания растений в условиях регулируемой среды: А.с. 409688 СССР, МКИ А01G 31/00 / Н.Д. Келлер, Ю.Н. Липов, В.Д. Шеповалов (СССР). - Бюлл. изобретений. - 1974. - № 1.

58. Способ определения сроков полива растений: А.с. 1639498 СССР, МКИ А01G 7/00 / А.И. Лексин, И.И. Молодцов (СССР). - Открытия. Изобретения. - 1991. - № 13.

59. Способ выращивания растений: А.с. 1384270 СССР, МКИ А01G 7/00 / А.И. Мартыненко, И.П. Масло, В.И. Мищенко, В.Е. Начинкин, В.М. Федоров (СССР). - Открытия. Изобретения. - 1988. - № 12.

60. Ильинский О.А., Семин В.С. Автоматическое устройство для оптимизации полива растений по физиологическим параметрам // Приборное оснащение и автоматизация научных исследований в биологии (тезисы докл. Всесоюзной конф. "Биоприбор-81"). - Кишинев. - 1981. - Т. 2. - С. 26-27.

61. Способ выращивания растений: А.с. 908278 СССР, МКИ А01G 7/00 / В.Л. Корбут (СССР). - Бюлл. изобретений. - 1982. - № 8.

62. Система регулирования факторов внешней среды для оптимизации фотосинтеза растений: А.с. 535921 СССР, МКИ А01G 7/00 / А.В. Малиновский, В.Л. Корбут (СССР). - Бюлл. изобретений. - 1976. - № 43.

63. Никифорова Л.Є., Сабо А.Г. Алгоритми для автоматичного діагностування стану сільськогосподарських біооб'єктів // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Вип.6. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – С. 415-419.

64. Устройство для исследования воздействия внешних факторов окружающей среды на растение: А.с. 1005688 СССР, МКИ А01G 7/00 / О.Л. Анисимов, М.Д. Бородин, Т.В. Позднева, Ю.Н. Филипповский, Л.Л. Смирнова (СССР). - Бюлл. изобретений. - 1983. - № 11.

65. Устройство для исследования воздействия внешних факторов окружающей среды на растение: А.с. 1028279 СССР, МКИ А01G 7/00 / В.П. Будянов, Ю.Н. Филипповский (СССР). - Бюлл. изобретений. – 1983. - № 26.

66. Устройство для выращивания растений: А.с. 682181, СССР, МКИ А01G 7/00 / Ю.Н. Филипповский, Т.В. Позднева, М.Д. Бородин, О.Л. Анисимов, Ю.А. Корякин (СССР). - Бюлл. изобретений. – 1979. - № 32.

67. Балашов А.Н., Зеликовский З.И. Экспериментальный автоматизированный проблемно-ориентированный комплекс для эколого-генетических исследований // Изв. АН МССР (Сер. биол. и хим. наук). – 1983. - №4. – С. 59-65.

68. Васильев В.И. Распознающие системы. – К.: Наукова думка, 1983. – 421 с.

69. Желев Д.Д., Шор И.Я. Автоматизированный способ идентификации генотипов по динамическим реакциям растений // Принципы и методы экоинформатики. – М. – 1986. – С. 280-282.

70. Способ генотипической идентификации растений: А.с. 1271460 СССР, МКИ А01G 7/00 / И.Я. Шор, Э.Ф. Казанцев, Д.Д. Желев, Н.А. Иваненко (СССР). - Бюлл. изобретений. – 1986. - № 43.

71. Мартыненко А.И., Мартыненко И.И. Энерго- и ресурсосберегающее управление в теплицах с использованием информации от растений // Сборник докладов III съезда АВОК. – М., 1993. – С. 133-135.

72. Адыгезалов В.Ф. Фотоиндуцированные биоэлектрические потен-циалы листьев высших растений. – Баку: Элм, 1987. – 76 с.

73. Масло И.П., Мартыненко А.И. Результаты исследований электрической активности сельскохозяйственных растений при действии гербицида // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Вып. 60.– К.: Урожай, 1984. – С. 53-57.

74. Мартыненко А.И. К вопросу о роли электрического поля в растениях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Вып. 57.– К.: Урожай, 1983. – С. 58-60.

75. Маслоброд С.Н. Электрофизиологическая полярность растений . – Кишинев: Штиинца, 1973. – 172 с.

76. Курсанов А.Л. Транспорт ассимилянтов в растении. – М.: Наука, 1976. – 647 с.

77. Оприлов В.А. Распространяющееся возбуждение и транспорт ассимилянтов во флоэме // Физиология растений. – 1978. – Т. 25, №5. – С. 1042-1054.

78. Оприлов В.А. Распространяющееся возбуждение у высших растений //Успехи современной биологии. – 1977. – Т. 83, №3. – С. 442-458.

79. Алиев Д.А., Адыгезалов В.Ф. Информационная роль биопотенциалов в растительных объектах // Изв. АН АзССР. Сер. биол. н. – Баку: Элм, 1982. - №1. – С. 110-116.

80. Гунар И.И., Паничкин Л.А. О передаче электрического возбуждения у растений // Изв. ТСХА. – 1970. – №5. С. 3-9.
82. Синюхин А.М. Функциональное значение потенциалов действия растительного организма. Вторая функция флоэмного пучка высших растений // Изв. АН СССР. Сер. биол. – 1972. – №5. – С. 747-755.
83. Транспорт веществ и биоэлектrogenез у растений / Под ред. В.А. Оприлова. – Горький: Университет, 1983. – 84 с.
84. Becker R.O. The significance of bioelectric potential // Bioelectrochem. and bioenerg. - 1974. – Vol. 1., N. 1-2. – P. 187-199.
85. Picard B.G. Electric signals in higher plants // Naturwissenschaften. – 1974. – Vol. 61. – P. 60-64.
86. Sibaoka T. Action potentials and rapid plant movements // Plant Growth Subst. – Berlin: e.a., 1980. – P. 462-469.
87. Simons P.J. The role of electricity in plant movements // Physiol. Plant. – 1981. – Vol. 87. – P. 11-37.
88. Bentrup F.W. Reception and transduction of electrical and mechanical stimuli // Physiol. movements. – Berlin: e.a., 1979. – P. 42-70.
89. Picard B.G. Action potentials resulting from mechanical stimulation of pea epicotyls // Planta. – 1971. – Vol. 97., N. 2. – P. 106-115.
90. Петрушенко В.В. Адаптивные реакции растения. – К.: Виш. школа, 1981. – 181 с.
91. Тарусов Б.Н., Китлаев Б.Н., Доскоч Я.Е. Биофизические методы диагностики устойчивости растений и перспективы их применения в селекции // Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды. – Л.: Колос, 1976. – С. 191-204.
92. Лялин О.О. Электрические свойства клеточных мембран и межклеточных контактов высших растений: Дис...д-ра биол. наук. – М., 1980. – 382 с.
93. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Взаимосвязь между внутриклеточной и внеклеточной биоэлектрическими реакциями растений // Биофизика. – 1976. – Т. 21. – С. 519-523.
94. Рыбин И.А. Феноменология и происхождение светозависимой биоэлектрической активности // Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений. – Свердловск: Ун-т, 1980. – С. 5-22.
95. Рыбин И.А., Михеева С.А. О природе биоэлектрической реакции листа растения на включение и выключение света // Докл. АН СССР. Сер. Биол. наук. – 1973. – Т. 208., №3. – С. 742.
96. Рыбин И.А., Оболонский В.В., Михеева С.А. О двух компонентах светоиндуцированных электрореакций листьев высших растений // Физиология растений. – 1977. – Т. 24., №6. – С. 1165-1173.
97. Рыбин И.А., Шавнин С.А., Михеева С.А. О светоиндуцируемой электрореакции листьев бобов // Физиология и биохимия культурных растений. – 1979. – Т. 11., №4. – С. 345-350.

98. Шавнин С.А. О взаимосвязи светозависимой биоэлектрической активности и фотосинтеза // Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений. – Свердловск: Ун-т, 1980. – С. 77-85.

99. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Природа электрогенеза и транспорт ионов в растительных клетках // Докл.АН СССР. – 1978. – Т. 242., №5. – С. 1229-1232.

100. Лялин О.О. рН–зависимая электрогенная помпа растительных кле-ток // Ионный транспорт в растениях. – К.: Наукова думка, 1979. – С. 10-14.

101. Busa W., Niccitelli R. Metabolic regulation via intracellular pH // Amer. J. Physiol. 1984. Vol. 246., N. 4. P. 409-438.

102. Pilet P.E., Versel J.M., Mayor G. Growth distribution and surface pH pattern along maize roots // Planta. 1983. Vol. 158., N. 5. P. 398-402.

103. Glass H.B. Effect of light on the bioelectric potentials of isolated Elodea leaves // Plant. Physiol. 1933. Vol. 8. P. 263-274.

104. Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений / Под ред. И.А. Рыбина. – Свердловск: Ун-т, 1977. – 119 с.

105. Haake O. Uber die Ursache electrichen Strome in Pflanzen // Flora. – 1892. – Vol. 57. – P. 455.

106. Регуляция функций мембран растительных клеток / Под ред. М.Н. Гончарика. – Минск: Наука и техника, 1979. – 198 с.

107. Адыгезалов В.Ф., Гродзинский Д.М. Изучение связи фотоиндуцированных биопотенциалов с фотосинтетическими процессами у растений // Физиология и биохимия культурных растений. – 1976. – Т.8., №6. – С. 601-606.

108. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Светоиндуцированные изменения внутриклеточного электрического потенциала листа элодеи как отражение взаимоотношений между фотосинтезом и дыханием // Управление скоростью и направлением биосинтеза у растений. – Красноярск, 1973. – С. 28-29.

109. Успенская В.Д. Биоэлектрический потенциал фотосинтеза // Докл. АН СССР. – 1951. – Т. 78. – С. 259-262.

110. Christ R. Investigation photoelectric effects of Pelargonium Zonale // Aiton. Ber. Schweiz. Bot. Gez. 1955. Vol. 65. P. 387.

111. Nishizaki Y. Physiological studies on photo-electric response in plant tissues. 1. Effect of length of light and dark period upon photoelectric response in green leaves // Sci. Rep. RITV. -1958. D. 9. P. 107-116.

112. Nishizaki Y. Physiological studies on photo-electric response in plant tissues. 2. The effects of different intensities on photoelectric response in green leaves // Bot. Mag. Tokio. -1959. Vol. 72. P. 337-346.

113. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Сравнительное изучение светоиндуцированных изменений электрических потенциалов растений // Физиология растений. – 1975. – Т. 22. - С. 49-54.

114. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Светоиндуцированная биоэлектрическая реакция // Вопросы биологии. – Томск, 1977. – С. 153-163.

115. Оболонский В.В., Рыбин И.А. Роль спектрального состава и интенсивности света в формировании светостимулируемой биоэлектрической реакции растения // Управление скоростью и направлением биосинтеза у растений. – Красноярск, 1973. – С. 30-31.
116. Оболонский В.В., Рыбин И.А. Биоэлектрические эффекты перехода из одной спектральной области в другую на листьях кукурузы и бобов // Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений. – Свердловск: Ун-т, 1977. – С. 89-98.
117. Рыбин И.А., Оболонский В.В. О возможной фитохромной регуляции светозависимой биоэлектрической активности листьев кукурузы // Физиология и биохимия культурных растений. – 1976. – Т. 8., №6. – С. 595-600.
118. Horwitz B.A. Bioelectric response of higher plants induced by photosynthetically active radiation // Photosynthetica. – 1971. – Vol. 5. – P. 414.
119. Хит О. Фотосинтез. – М.: Мир, 1972.- 316 с.
120. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Природа светоиндуцированных изменений внутриклеточного электрического потенциала растений и его взаимосвязь с процессами фотосинтеза // Биология и биофизика. – Томск, 1975. – С. 71-77.
121. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Зависимость светоиндуцированного внутриклеточного потенциала элодеи от процессов фотосинтеза // Цитология. – 1977. – Т. 19., №5 - С. 508-513.
122. Новак В.А., Иванкина Н.Г. Природа светоиндуцированной биоэлектрической реакции растений при внутриклеточном отведении // Studia biophysica. – 1977. – Т. 65., В. 2. - С. 143-154.
123. Galston A.W. Circumnutation, rhythms and light-regulated movements in plants // Plant Growth Subst. Berlin, 1980. P. 437-443.
124. Shabala S.N., Newman I.A., Morris J. Oscillation in H^+ and Ca^{2+} Ion Fluxes around the Elongation Region of Corn Roots and Effects of External pH. // Plant Physiol. 1997. Vol. 113. - P. 111-118.
125. Бобров В.А., Юрин В.М., Яглова Л.Г., Курелла Г.А. Электрические и термодинамические свойства H^+ -АТФазных каналов электрогенной помпы на плазмолемме клеток // Физиология растений. – 1979. – Т.26., №6. – С. 1193-1201
126. Петрушенко В.В. О возможном механизме фотоиндуцированной гиперполяризации плазмолеммы растительной клетки // Харовые водоросли и их исп. в иссл. биол. процессов клетки. – Вильнюс, 1973. – С. 350-358.
127. Picard B.G., Ding J.P. The mecanosensory calcium-selective ion channel: key component of a plasmalemma control centre? // Aust. J. Plant Physiol. - 1993. – Vol. 20. – P. 439-459.
128. Воробьев Л.Н. Регулирование мембранного транспорта в растении // Итоги науки и техники. Сер. Физиология растений. Т. 4. Ионный транспорт в растениях. – М., 1980. – С. 5-125.

129. Davies R.S. Photoinduced changes in electrical potentials and H^+ - activities of the chloroplast, cytoplasm and vacuole of *Phaeoceres* leaves // Membr. Transp. in Plants. – Berlin: Heid, N-Y.: Springer-Verlag, 1974. – P. 197-201.

130. Андрианов В.К., Булычев А.А., Литвин Ф.Ф. Возможные механизмы связи фотосинтеза и дыхания с генерацией биопотенциалов в клетках *Nitella flex.* // Харовые водоросли и их исп. в иссл. биол. процессов клетки. – Вильнюс, 1973. – С. 315-329.

131. Dyenes M., Andrianov V.K., Bulychhev A.A., Kurella G.A. Light-induced H^+ - accumulation in the vacuole of *Nitellopsis obtusa* // J. Exp. Bot. 1978. Vol. 29., N. 112. P. 1185-1196.

132. Felle H., Bentrup F.W. Light-dependent changes of membrane potential and conductance in *Riccia fluitance* // Membr. Transp. in Plants. Berlin: Heid, N-Y.: Springer-Verlag, 1974. P. 188-196.

133. Jaffe M.I. Phytochrome-mediated bioelectric potentials in mung bean seedlings // Science. 1968. Vol. 162. - P. 1016-1017.

134. Рыбин И.А. Суточная цикличность биоэлектрической реакции на включение и выключение света // Биологические науки. – 1974. – №1. - С. 13-52.

135. Aimi R., Shibasaki S. Circadian rhythms and light control of the diurnal leaf movement of phaseolus in regulation to bioelectric responses // 6th Int. Congr. Photobiol.. – Bichem, 1984. – P. 193.

136. Дечев Г.О. О кинетике перехода растительных организмов в новые стационарные состояния // Изв. на Биол. инст. БАН. – 1961. – Т. 11. - С. 93-108.

137. Georgiev G.D., Sougarev T., Nedev H. Shape of compulsory oscillation of a plant's bioelectric potential obtained by a device for extremal light regulation // Comp. Rend. Bulg. Acad. Sci.. – 1974. – Vol. 27., N. 2.- P. 247-250.

138. Лялин О.О. Некоторые закономерности биоэлектрической реакции листа растения на свет // Труды МОИП АН СССР. – 1964. – Т. 9. - С. 150.

139. Шабала С.Н., Шевченко В.А., Маслоброд С.Н., Третьяков Н.Н. Электрофизиологическая характеристика растений при периодическом изменении параметров среды в условиях водной культуры // Физиология и биохимия культурных растений. – 1991. – Т. 23., №4. – С. 386-390.

140. Дорошек А.С. О динамике биоэлектрических переходных процессов листьев растений // Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений. – Свердловск: Ун-т, 1980. – С. 84-91.

141. Мун Ф. Хаотические колебания: Пер. с англ.– М.: Мир, 1990. – 312 с.

142. Cardon Z.G., Berry J.A., Woodrow I.E. Dependence of the extent and direction of average stomatal response in *Zea mais* and *L.Phaseolus vulgaris* L. on the frequency of fluctuations in environmental stimuli // Plant Physiology.

1994. Vol.105. P. 1007-1013.

143. Waller J.C. Plant electricity. 2. Towards on interpretation of the photo-electric current in leaves // *New Physiol.* 1926. Vol.28. P. 291-302.

144. Рыбин И.А., Оболюнский В.В., Михеева С.А., Бирюкова Е.Г., Тихомирова Л.Г. Феноменология светозависимой биоэлектрической активности листьев растений // *Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений.* – Свердловск: Ун-т, 1977. – С. 23-62.

145. Шавнин С.А. Влияние анаэробных условий на биоэлектрические реакции листьев кукурузы и бобов при активности листьев растений при включении и выключении света // *Светозависимая биоэлектрическая активность листьев растений.* – Свердловск: Ун-т, 1977. – С. 77-85.

146. Шавнин С.А. О взаимосвязи светозависимой биоэлектрической активности листьев растений с фотосинтезом и фотодыханием // *Тезисы докл. 6-й Всесоюз. конф. по фотоэнергетике растений.* – Львов, 1980. – С. 40-41.

147. Rapp P.E. An atlas of cellular oscillators // *J. Exp. Biol.* – 1979. - Vol. 81. – P. 281-306.

148. Kristie D.N., Joliffe J.J. High-resolution studies of growth oscillation during stem elongation // *Can. J. Bot.* – 1986. – Vol. 64, N.11. – P. 2399-2405.

149. Карманов В.Г., Мелещенко С.Н. Механизм автоколебаний водного обмена в растении // *Биофизика.* 1982. Т.27, №1 – С.144-149.

150. Пятыхин С.С. Ритмическая электрическая активность у проростков тыквы при воздействии повреждающего и умеренного температурных раздражителей // *Ферменты, ионы и биоэлектrogenез у растений.* – Горький, 1982. – С. 98-106.

151. Ogata K., Kishimoto U. Rhythmic change of membrane potentials and cyclosis of Nitella internode // *Plant & Cell Physiol.* - 1976. – Vol. 72. – P. 201.

152. Штальберг Р., Полевой В.В. Изучение природы ритмических колебаний мембранного потенциала клеток coleoptiles кукурузы // *Докл. АН СССР.* – 1979. Т.247. – С. 761-764.

153. Connor J.A., Kreulen D.L., Prosser C.L. Relation between oxidative metabolism and the slow rhythmic potentials in mammalian intestinal muscle // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1976. Vol. 73. P. 4239-4243.

154. Berridge M.J., Rapp P.E. A comparative survey of the function mechanism and control of cellular oscillators // *J. Exp. Biol.* 1979. - Vol. 81 . P. 217-278.

155. Nelson P.G., Henkart M.P. Oscillatory membrane potentials in cells of mesenchymal origin. The role of an intracellular calcium regulating system // *J. Exp. Biol.* 1979. - Vol. 81. P. 317-338.

156. Bush D.S. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling // *Ann. Rev. Plant Physiol. & Plant Mol. Biol.* – 1995. - Vol. 46. – P. 95-122.

157. Broda H., Schweiger H.-G. Long-term measurement of endogenous diurnal oscillations of the electrical potential in an individual *Acetabularia* cell //

Eur. J. Cell. Biol. - 1981. – Vol. 26., N.1. – P. 201-211.

158. Карманов В.Г., Савин В.Н. Автоколебательный характер изменений некоторых функций растений // Колебательные процессы в биологических и химических системах. – М.: Наука, 1967. – С. 308-318.

159. Гладунов И.М. К вопросу о ритмичности поглощения ионов солей растениями // Физиология и биохимия растений. – Кишинев: Штииница. – 1975. – С. 50-61.

160. Ogawa T. Simple oscillation in photosynthesis of higher plants // Biochimica et Biophysica Acta. - 1982. –Vol. 681. – P. 103-109.

161. Goto N., Chiba Y. Oscillation in the growth rate and a shortening of the lag time for IAA response by cotyledons, giberellin acid and sucrose in bean hypocotyls // Plant & Cell Physiol. – 1983. – Vol. 24. – P. 1297-1303.

162. Биологические ритмы. Т.1.: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Ашоффа. – М.: Мир, 1984. – 414 с.

163. Gutovski I. Analysis of oscillatory plant transpiration // J. Interdiscipl. Cycle Res. – 1981. – Vol. 12, N.4. – P. 273-291.

164. Лазарева Н.П., Борисова Т.А., Жолкевич В.Н. Об автоколебательном характере нагнетающей деятельности корневой системы // Докл. АН СССР. – 1986. Т.289. - №3. – С. 761-764.

165. Гуляев Б.И. Релаксационные автоколебания газообмена листьев // Физиология и биохимия культурных растений. – 1977. Т.9. - №25. – С. 250-256.

166. Shabala S.N. Leaf temperature kinetics measure plant adaptation to extreme high temperatures // Aust. J. Plant Physiol. - 1996. –Vol. 23. – P. 442-452.

167. Никифорова Л.Є. Обґрунтування енергозберігаючих режимів електричного опромінення рослин огірків в умовах захищеного ґрунту // Труды Таврической государственной академии – Вып.1. Т. 8. - Мелитополь: ТГАТА, 1998. – С. 41-46.

168. Полевой В.В. Система регуляции у растений // Вестник ЛГУ. – 1981. – №21. – С. 105-109.

169. Михеева С.А., Рыбин И.А. Зависимость переходной биоэлектрической реакции на включение и выключение света от интенсивности освещения // Вопросы регуляции фотосинтеза. – 1973. – №3. – С. 77-83.

170. Пат. №25497 А Україна, МКИ6 А01G9/26. Спосіб опромінення рослин у теплицях та пристрій для його здійснення / Никифорова Л.Є. (Україна).- Опубл. 30.10.98, Бюл. №6.

171. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 312 с.

172. Марри Дж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 397 с.

173. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Пер. с немецкого. – М.: Наука, 1965. – 704 с.

174. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 223 с.
175. Лебедев С.И., Ларин А.П., Литвиненко Л.Г., Силаева А.М., Сакало Н.Д. Влияние минерального питания и освещения на структуру хлоропластов и продуктивность фотосинтеза сельскохозяйственных растений // Фотосинтез и пигменты как факторы урожая. Республиканский межведомственный сборник. – К.: Наукова думка, 1965. – С. 72-81.
176. Табенцкий А.А. Образование хлоропластов как фактор продуктивности сельскохозяйственных растений // Фотосинтез и пигменты как факторы урожая. Республиканский межведомственный сборник. – К.: Наукова думка, 1965. – С. 6-20.
177. Сабо А.Г. Визначення параметрів періодичних режимів опромінення при аналізі спектральних характеристик світлоіндукованих коливаннях біоелектричних потенціалів рослин // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.1., Т. 19. – Мелітополь: ТДАТА, 2001. – С. 101-105.
178. Сабо А.Г. Осциляторна модель рослини при світлоіндукованих коливаннях біоелектричних потенціалів // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.1., Т. 17. – Мелітополь: ТДАТА, 2000. – С. 89-94.
179. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М.: Энергия, 1968. – 504 с.
180. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
181. Основы теории колебаний: Учеб. руководство / В.В. Мигулин, В.И. Медведев, Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин / Под ред. В.В. Мигулина. – М.: Наука, 1988. – 392 с.
182. Шабала С.Н. Вынужденные колебания биопотенциалов листьев высших растений // Известия ТСХА. – 1989. – Вып. 4. – С. 86-89.
183. Белоусов Л.П. Биологический морфогенез как процесс самоорганизации // Общие проблемы физико-химической биологии. – М., 1985. – Т.5. – С. 84-129.
184. Бауэр Э.С. Теоретическая биология. – М.: Изд-во АН СССР, 1935. – 206 с.
185. Гродзинский А.М. Химическое взаимодействие растений. – К.: Наукова думка, 1981. – 218-с.
186. Крастина Е.Е. О влиянии внешних условий на параметры циркадных ритмов и биологические часы растений // Колебательные процессы в биологических и химических системах. – М.: Наука, 1967. – С. 351-365.
187. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергия, 1975. – 408 с.

188. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

189. Шабала С.Н., Гэинэ А.В., Маслоброд С.Н. Метод усредненной регистрации биоэлектрических сигналов высших растений // Изв.АН МССР. Сер. биол. и хим. наук. –1998. - №1. - С. 61-63.

190. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1965. – 511 с.

191. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н. Частотные характеристики вынужденных колебаний биопотенциалов растений // Биоэлектрогенез и мембранный транспорт у растений. – Горький, 1989. – С. 78-83.

192. Reich P.B. Oscillation in stomatal conductance of hybrid poplar leaves in the light and dark // Physiol. Plant. – 1984. – Vol. 61, N.4. – P. 541-548.

193. Гладунов И.М. к вопросу о ритмичности поглощения ионов солей растениями // Физиология и биохимия растений. – Кишинев: Штиинца, 1975. – С. 50-61.

194. Карманов В.Г., Мелещенко С.Н. Механизм автоколебаний водного обмена в растении // Биофизика. – 1982. – 27, №1. – С. 144-149.

195. Пиппард А. Физика колебаний. - М.: Высшая школа, 1985. – 453 с.

196. Мойсюк Б.Н. Элементы теории оптимального эксперимента. Ч.2. – М.: МЭИ, 1976. – 84 с.

197. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер; Под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 522 с.

198. Никифорова Л.Є. Результати експериментальних досліджень ефективності режимів резонансно-періодичного опромінення розсади огірків // Труды Таврической государственной академии – Вып.1. Т. 7. - Мелитополь: ТГАТА, 1998. – С. 90-93.

199. Диордиев В.Т., Никифорова Л.Е. Влияние резонансно-периодического режима облучения на рассаду огурцов в защищенном грунте // Техника в сельском хозяйстве. Сб. науч. тр. – Вып.1., Т. 3. - Мелитополь: ТГАТА, 1998. – С. 3-5.

200. Діордієв В.Т., Никифорова Л.Є., Сабо А.Г. Оптимізація режимів резонансно-періодичного опромінення розсади огірків за критерієм енергозбереження // Труды Таврической государственной академии – Вып. 1., Т. 7. - Мелитополь: ТГАТА, 1998. – С. 26-33.

201. Никольсон Дж., Никольсон С. Открой для себя Excel 97 : Пер. с англ. – К.: Комиздат; Диалектика, 1997. – 416 с.

202. Поляков Д.В., Круглов И.Ю. Программирование в среде Турбо Паскаль (версия 5.5): Справ.-метод. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1992. – 576 с.

203. Очков В.Ф. Mathcad 8 Pro для студентов и инженеров. – М.: КомпьютерПресс, 1999. – 523 с.
204. Тасаки И. Нервное возбуждение. – М.: Мир. 1971. – 219 с.
205. Мелкумян В.Г., Рогатых М.П., Зубарев Т.Н. Об информационной роли потенциалов действия у клеток ацетабулярии // Докл. АН СССР. – 1975. – Т.224, №5. – С. 1223-1225.
206. Brickmann E.B., Lüttge U. Lichtabhängige membranpotentialschwankungen und deren interzelluläre Weiterleitung bei panaschierten Photosynthese-Mutanten von Oenotera // Planta – 1974. – Vol. 119. – P. 47-57.
207. Люттге У., Хигинботат Н. Передвижение веществ в растениях. – М.: Колос, 1984. – 408 с.
208. Полевой В.В. Фитогормоны. – Л.: Изд. ЛГУ, 1982. – 247 с.
209. Камшилов М.М. Эволюция биосферы. – М.: Наука, 1974. – 254 с.
210. Либберт Э. Физиология растений. – М.: Мир, 1976. – 580 с.
211. Сельков Е.Е. Колебания в биохимических системах. Экспериментальные данные, гипотезы, модели // Колебательные процессы в биологических и химических системах. – М.: Наука, 1967. – С. 7-22.
212. Тихомиров А.А., Сидько Ф.Я. Состояние пигментного аппарата и формирование структуры ценозов при различной интенсивности и спектре излучения // Физиология растений. – 1982. – Т. 29, В. 3. – С. 457-464.
213. Жакотэ А.Г. Влияние взаимозатенения и степени облученности прямой солнечной радиацией на интенсивность фотосинтеза листьев винограда // Физиология растений. – 1983. – Т. 30, В. 2. – С. 315-323.
214. Крастина Е.Е. Минеральное питание подсолнечника при ценотическом взаимодействии растений // Известия ТСХА. – 1984. – В. 5. – С. 95-103.
215. Крастина Е.Е. Изменение удельной поглощающей активности корней подсолнечника при ослаблении ценотического взаимодействия растений // Известия ТСХА. – 1985. – В. 1. – С. 97-105.
216. Николаев Л.А. Основы химии биологических процессов. – М.: Высшая школа, 1971. – 240 с.
217. Титов Ю.В. Изучение взаимоотношений растений в элементарных группах // Проблемы аллелопатии. – К.: 1976. – 188 с.
218. Коловский Р.А. Биоэлектрические потенциалы древесных растений. – Новосибирск : Наука, 1973. – 176 с.
219. Lüttge U. Co-operation of organs in intact higher plants: a review // Membr. Transp. Plants. – Berlin : e.a., 1974. – P. 353-362.
220. Иванько И.П., Заржава С.Г., Мартыненко А.И., Петренко Н.Н., Свирень Н.А., Шмат С.И. Использование в растениеводстве естественных электродвижущих сил // Техника в сельском хозяйстве. – 1990. - №4. – С. 28-29.
221. Живописцев Е.Н., Косицин О.А. Электротехнология и электрическое освещение. – М.: Агропромиздат, 1990. – 303 с.

222. Воронина М.В., Штрейс Р.И., Селиванова О.К. Перец сладкий в защищенном грунте. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 56 с.

Додаток А
Результати розрахунку рівнянь регресії

Таблиця А.1 -
Результати розрахунків та аналізу рівнянь регресії для томатів сорту
Український тепличний 285.

Показник	Дисперсія помилок спостереження D_n	Дисперсії помилок для груп коефіцієнтів				Помилка неадекватності S_n	Критерій Фішера розрахунковий F_p
		S_0	S_i	S_{ij}			
Період, пік 1	5,36667	0,945	0,627	0,819	0,610	239,948	4,412
Амплітуда, пік 1	0,268	0,211	0,140	0,183	0,136	5,010	1,712
Період, пік 2	0,36667	0,247	0,164	0,214	0,160	6,502	1,061
Амплітуда, пік 2	0,04267	0,084	0,056	0,073	0,054	1,992	4,633

Таблиця А.2 -
Результати розрахунків та аналізу рівнянь регресії для томатів сорту Ласточка.

Показник	Дисперсія помилок спостереження D_n	Дисперсії помилок для груп коефіцієнтів				Помилка неадекватності S_n	Критерій Фішера розрахунковий F_p
		S_0	S_i	S_{ij}			
Період, пік 1	5,9	0,991	0,657	0,859	0,640	296,062	4,518
Амплітуда, пік 1	0,27867	0,215	0,143	0,187	0,139	4,606	1,281
Період, пік 2	0,475	0,281	0,186	0,244	0,182	11,591	1,617
Амплітуда, пік 2	0,05467	0,095	0,063	0,083	0,062	1,978	3,464

Таблиця А.3 -
Результати розрахунків та аналізу рівнянь регресії для перцю сорту Подарок Молдови.

Показник	Дисперсія помилок спостереження	Дисперсії помилок для груп коефіцієнтів				Помилка неадекватності	Критерій Фішера розрахунковий
		S_0	S_i	S_{ij}			

	ження Dn					i Sn	нковий Fr
Період, пік 1	5,06667	0,918	0,609	0,796	0,593	138,315	2,230
Амплітуда , пік 1	0,22	0,191	0,127	0,166	0,124	6,895	3,293
Період, пік 2	0,875	0,381	0,253	0,331	0,246	39,856	3,379
Амплітуда , пік 2	0,044	0,086	0,057	0,074	0,055	1,545	3,345

Таблиця А.4 -

Результати розрахунків та аналізу рівнянь регресії для перцю сорту Данюб.

Показник	Дисперсія помилок спостере ження Dn	Дисперсії помилок для груп коефіцієнтів				Помил ка неадек ватност і Sn	Критері й Фішера розраху нковий Fr
		S0	Si	Sij			
Період, пік 1	6,96667	1,076	0,714	0,933	0,695	284,529	3,584
Амплітуда , пік 1	0,26667	0,211	0,140	0,183	0,136	8,658	3,052
Період, пік 2	0,8	0,365	0,242	0,316	0,236	48,930	4,680
Амплітуда , пік 2	0,12267	0,143	0,095	0,124	0,092	0,996	0,347

Таблиця А.5 -

Результати розрахунків та аналізу рівнянь регресії для баклажанів сорту Алмаз.

Показник	Дисперсія помилок спостере ження Dn	Дисперсії помилок для груп коефіцієнтів				Помил ка неадек ватност і Sn	Критері й Фішера розраху нковий Fr
		S0	Si	Sij			
Період, пік 1	5,9	0,991	0,657	0,859	0,640	274,128	4,146
Амплітуда, пік 1	1,2387	0,454	0,301	0,393	0,293	30,508	1,963
Період, пік 2	0,54167	0,300	0,199	0,260	0,194	9,974	1,118
Амплітуда, пік 2	0,1227	0,143	0,095	0,124	0,092	3,708	3,158

Таблиця А.6 -

Результати розрахунків та аналізу рівнянь регресії для баклажанів сорту
Донецький урожайний.

Показник	Дисперсія помилок спостереження D_n	Дисперсії помилок для груп коефіцієнтів				Помилка неадекватності S_n	Критерій Фішера розрахунковий F_p
		S_0	S_i	S_{ij}			
Період, пік 1	4,4	0,855	0,568	0,742	0,553	221,318	4,530
Амплітуда, пік 1	1,19467	0,446	0,296	0,386	0,288	22,048	1,346
Період, пік 2	0,66667	0,333	0,221	0,289	0,215	8,139	0,601
Амплітуда, пік 2	0,17067	0,168	0,112	0,146	0,109	3,273	1,772

Табличне значення критерію Фішера складає $F_{\text{тості}} 0,95$

Таблиця А.7 –

Визначення значимих коефіцієнтів рівнянь регресії для томатів сорту Український тепличний 285.

Коефіцієнт	Період, пік 1.			Амплітуда, пік 1			Період, пік 2			Амплітуда, пік 2		
	Значення за розрахунком	Критичне значення	З	Значення за розрахунком	Критичне значення	З	Значення за розрахунком	Критичне значення	З	Значення за розрахунком	Критичне значення	З
			(3/Н)			(3/Н)			(3/Н)			(3/Н)
B0	28,654	2,429	3	6,691	0,543	3	5,642	0,635	3	2,660	0,217	3
B1	3,024	1,611	3	1,604	0,360	3	-0,514	0,421	3	0,758	0,144	3
B2	-3,154		3	1,965		3	-0,365		Н	0,789		3
B3	-2,041		3	0,372		3	-0,221		Н	0,279		3

B12	0,125	2,106	H	0,475	0,471	3	0,063	0,550	H	0,250	0,188	3
B13	0,125		H	-0,075		H	-0,188		H	-0,100		H
B23	2,125		3	-0,075		H	-0,063		H	0,100		H
B123	0,375		H	-0,075		H	-0,063		H	-0,150		H
B11	12,123	1,569	3	-0,406	0,351	3	1,207	0,410	3	-0,174	0,140	3
B22	0,281		H	0,407		3	0,058		H	0,039		H
B33	0,811		H	-0,052		H	0,058		H	0,074		H

Таблиця А.8 –

Визначення значимих коефіцієнтів рівнянь регресії для томатів сорту Ласточка.

Ко ефі ціє нт	Період, пік 1.			Амплітуда, пік 1			Період, пік 2			Амплітуда, пік 2		
	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З а ч и м і с т ь (3 / H)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З а ч и м і с т ь (3 / H)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З а ч и м і с т ь (3 / H)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З а ч и м і с т ь (3 / H)
B0	30,335	2,547	3	5,921	0,543	3	6,726	0,723	3	2,769	0,245	3
B1	2,705	1,690	3	1,762	0,360	3	-0,552	0,479	3	0,548	0,163	3
B2	-2,649		3	1,881		3	-0,418		H	0,584		3
B3	-0,956		H	0,450		3	-0,210		H	0,292		3
B12	0,750	2,208	H	0,125	0,471	H	-0,063	0,626	H	0,050	0,213	H
B13	0		H	0,075		H	0,063		H	0,200		H
B23	2,250		3	-0,025		H	-0,063		H	0,250		3
B123	0,500		H	-0,025		H	0,063		H	-0,150		H
B11	11,783	1,645	3	-0,385	0,351	3	1,253	0,467	3	-0,231	0,158	3
B22	1,001		H	0,464		3	0,281		H	-0,125		H

B33	0,824		H	0,075		H	0,104		H	-0,055		H
-----	-------	--	---	-------	--	---	-------	--	---	--------	--	---

Таблиця А.9 –

Визначення значимих коефіцієнтів рівнянь регресії для перцю сорту
Подарок Молдови.

Ко ефі ціє нт	Період, пік 1.			Амплітуда, пік 1			Період, пік 2			Амплітуда, пік 2		
	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)
B0	33,476	2,360	3	6,864	0,553	3	7,176	0,981	3	2,681	0,220	3
B1	-2,402	1,566	3	1,728	0,367	3	-0,858	0,651	3	0,603	0,146	3
B2	-3,011		3	2,189		3	-0,331		H	0,794		3
B3	-1,972		3	0,668		3	-0,117		H	0,249		3
B12	-0,250	2,046	H	0,175	0,480	H	0	0,850	H	-0,225	0,191	3
B13	0		H	0,475		3	0		H	-0,075		H
B23	-0,250		H	0,075		H	0,125		H	-0,075		H
B123	-0,250		H	0,025		H	-0,125		H	-0,025		H
B11	11,699	1,525	3	-0,410	0,358	3	2,805	0,634	3	-0,067	0,142	H
B22	0,564		H	0,368		3	0,596		H	-0,180		3
B33	0,917		H	0,191		H	0,507		H	0,074		H

Таблиця А.10 –

Визначення значимих коефіцієнтів рівнянь регресії для перцю сорту Данюб.

Період, пік 1.		Період, пік 2	
----------------	--	---------------	--

Ко ефі ціє нт				Амплітуда, пік 1						Амплітуда, пік 2		
	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розраху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Значе ння за розрахунок	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розрахунок	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)
B0	37,811	2,767	З	8,277	0,541	З	7,229	0,938	З	3,463	0,367	З
B1	3,853	1,836	З	1,457	0,359	З	-0,800	0,622	З	0,637	0,244	З
B2	-2,695		З	1,682		З	0,356		Н	0,637		З
B3	-1,928		З	0,356		Н	0,117		Н	0,274		З
B12	-1,000	2,399	Н	-0,650	0,469	З	0	0,813	Н	-0,175	0,318	Н
B13	0		Н	0,750		З	0		Н	-0,075		Н
B23	0,500		Н	0,150		Н	0,125		Н	0,025		Н
B123	0		Н	0,300		Н	-0,125		Н	-0,075		Н
B11	9,130	1,788	З	-0,880	0,350	З	2,858	0,606	З	-0,265	0,237	З
B22	-0,770		Н	0,039		Н	0,596		Н	-0,265		З
B33	-0,947		Н	-0,173		Н	0,507		Н	-0,018		Н

Таблиця А.11 –

Визначення значимих коефіцієнтів рівнянь регресії для баклажанів сорту Алмаз.

Ко ефі ціє нт	Період, пік 1.			Амплітуда, пік 1			Період, пік 2			Амплітуда, пік 2		
	Зна чен ня за розрахунок	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розрахунок	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Значе ння за розрахунок	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)	Зна чен ня за розрахунок	Кр ит ич не зна че нн я	З н а ч и м і с т ь (З / Н)

	аху нко м	че нн я	м і с т ь (3 / Н)	аху нко м	че нн я	м і с т ь (3 / Н)	ом	че нн я	м і с т ь (3 / Н)	роз рах ун ко м	че нн я	м і с т ь (3 / Н)
B0	29,414	2,547	3	10,953	1,167	3	7,414	0,772	3	4,955	0,367	3
B1	2,309	1,690	3	3,162	0,774	3	0,524	0,512	3	0,813	0,244	3
B2	-2,276		3	2,279		3	-0,050		Н	0,790		3
B3	-1,719		3	0,790		3	-0,128		Н	0,256		3
B12	0,125	2,208	Н	-0,200	1,012	Н	-0,125	0,669	Н	0	0,318	Н
B13	0,125		Н	-0,050		Н	-0,125		Н	0		Н
B23	-0,125		Н	-0,200		Н	-0,250		Н	0,050		Н
B123	0,125		Н	-0,100		Н	-0,250		Н	0		Н
B11	13,216	1,645	3	-0,761	0,754	3	1,845	0,498	3	-0, 706	0,237	3
B22	0,490		Н	-0,372		Н	0,166		Н	-0, 617		3
B33	0,667		Н	0,370		Н	0,099		Н	-0, 318		3

Таблиця А.12 –

Визначення значимих коефіцієнтів рівнянь регресії для баклажанів сорту Донецький урожайний.

Ко ефі ціє нт	Період, пік 1.			Амплітуда, пік 1			Період, пік 2			Амплітуда, пік 2		
	Зна чен ня за розр аху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З на ча и м і с т ь (3	Зна чен ня за розр аху нко м	Кр ит ич не зна че нн я	З на ча и м і с т ь (3	Значе ння за розра хунк ом	Кр ит ич не зна че нн я	З на ча и м і с т ь (3	Зна чен ня за роз рах ун ко м	Кр ит ич не зна че нн я	З на ча и м і с т ь (3

			/			/			/			/
			H			H			H			H
			)			)			)			)
B0	30,931	2,199	3	9,672	1,146	3	8,665	0,856	3	4,151	0,433	3
B1	2,948	1,459	3	1,647	0,760	3	0,586	0,568	3	0,725	0,287	3
B2	-2,130		3	1,648		3	-0,365		H	0,956		3
B3	-1,581		3	0,781		3	-0,221		H	0,330		3
B12	-0,375	1,907	H	0,475	0,994	H	0,063	0,742	H	0,250	0,378	H
B13	0,125		H	-0,075		H	-0,188		H	-0,100		H
B23	-0,125		H	-0,075		H	-0,063		H	0,100		H
B123	0,375		H	-0,075		H	-0,063		H	-0,150		H
B11	14,329	1,421	3	-0,932	0,740	3	1,479	0,553	3	-0,466	0,280	3
B22	0,279		H	0,407		H	0,058		H	-0,289		3
B33	0,809		H	-0,052		H	0,058		H	-0,289		3

Додаток Б

Програма для обчислення параметрів періодичних режимів та визначення параметрів моделей та рівнянь

```

Program Periods;
Uses CRT;
Var A,B,vid:byte;
    omegalsq, omega2sq, omega01sq, omega02sq, omega01, omega02,
    twodelta1, twodelta2, gamma1, gamma2: real;
    C, T1, T11, T2, Am1, Am2, Am11, Am22, forc1: real;
    ch: char;
Begin
    ClrScr;
    writeln ('ввести время в сутках от появления 1-го листа');
    read(A);
    writeln('A=',A);
    writeln ('вести значение переменной сост. освещенности Вт/м2 ФАР');
    read (B);
    writeln ('B=',B);
    writeln ('ввести температуру воздуха в градусах Цельсия');
    read (C);
    writeln ('C=',C:3:1);
    writeln ('вести код сорта и вида растения:');
    writeln ('томаты сорта Украинский тепличный 285 код 11');
    writeln ('томаты сорта Ласточка код 12');
    writeln ('перец сорта Подарок Молдовы код 21');
    writeln ('перец сорта Данюб код 22');
    writeln ('баклажаны сорта Алмаз код 31');
    writeln ('перец сорта Донецкий урожайный код 32');
    read (vid);
    writeln ('код сорта-вида vid=',vid);
    case vid of
        {расчет параметров режимов и вспомогательных величин}
        11: Begin

```

```

T1:=127.1-4.071*A-0.761*B-1.544*C+0.0261*B*C+0.0721*A*A;
Am1:=-0.96+0.186*A-0.053*B+0.083*C+0.0021*A*B-0.0024*A*A+0.0013*B*B;
T2:=13.3-0.469*A+0.0071*A*A;
Am2:=-1.89+0.078*A+0.012*B+0.062*C+0.0011*A*B-0.001*A*A;
T11:=127.1-4.071*A-0.761*1.1*B-1.544*C+0.0261*1.1*B*C+0.0721*A*A;
Am11:=-0.96+0.186*A-0.053*1.1*B+0.083*C+0.0021*1.1*A*B-0.0024*A*A+0.0013*B*B*1.
21;
Am22:=-1.89+0.078*A+0.012*1.1*B+0.062*C+0.0011*1.1*A*B-0.001*A*A;
    End;
    12: Begin
T1:=117.7-3.975*A-0.772*B-1.111*C+0.0278*B*C+0.0697*A*A;
Am1:=-3.14+0.273*A-0.01*B+0.1*C-0.0023*A*A+0.0014*B*B;
T2:=14.7-0.487*A+0.0074*A*A;
Am2:=0.29+0.124*A-0.035*B-0.058*C+0.0031*C*B-0.0014*A*A;
T11:=117.7-3.975*A-0.772*1.1*B-1.111*C+0.0278*1.1*B*C+0.0697*A*A;
Am11:=-3.14+0.273*A-0.01*1.1*B+0.1*C-0.0023*A*A+0.0014*B*B*1.21;
Am22:=0.29+0.124*A-0.035*1.1*B-0.058*C+0.0031*1.1*C*B-0.0014*A*A;
    End;

    21: Begin
T1:=117.9-4.338*A-0.167*B-0.438*C+0.0692*A*A;
Am1:=-0.21+0.096*A+0.031*B-0.096*C+0.0081*A*C-0.0024*A*A+0.0011*B*B;
T2:=24.1-1.062*A+0.0166*A*A;
Am2:=-1.99+0.085*A+0.029*B+0.055*C-0.00096*A*B+0.00056*B*B;
T11:=117.9-4.338*A-0.167*1.1*B-0.438*C+0.0692*A*A;
Am11:=-0.21+0.096*A+0.031*1.1*B-0.096*C+0.0081*A*C-0.0024*A*A+0.0011*B*B*1.21;
Am22:=-1.99+0.085*A+0.029*1.1*B+0.055*C-0.00096*1.1*A*B+0.00056*B*B*1.21;
    End;

    22: Begin
T1:=93.7-2.961*A-0.15*B-0.428*C+0.0543*A*A;
Am1:=1.82+0.248*A+0.177*B-0.385*C-0.0028*A*B+0.0128*A*C-0.0052*A*A;
T2:=20.6-0.954*A+0.0169*A*A;
Am2:=-3.51+0.143*A+0.101*B+0.061*C-0.0016*A*A-0.00082*B*B;
T11:=93.7-2.961*A-0.15*1.1*B-0.428*C+0.0543*A*A;
Am11:=1.82+0.248*A+0.177*1.1*B-0.385*C-0.0028*1.1*A*B+0.0128*A*C-0.0052*A*A;
Am22:=-3.51+0.143*A+0.101*1.1*B-0.061*C-0.0016*A*A-0.00082*B*B*1.21;
    End;

    31: Begin
T1:=108.1-4.514*A-0.126*B-0.382*C+0.0782*A*A;
Am1:=-9.41+0.513*A+0.127*B+0.176*C-0.0045*A*A;
T2:=16-0.615*A+0.0109*A*A;
Am2:=-15+0.314*A+0.209*B+0.764*C-0.0042*A*A-0.00211*B*B-0.0157*C*C;
T11:=108.1-4.514*A-0.126*1.1*B-0.382*C+0.0782*A*A;
Am11:=-9.41+0.513*A+0.127*1.1*B+0.176*C-0.0045*A*A;
Am22:=-15+0.314*A+0.209*1.1*B+0.764*C-0.0042*A*A-0.00211*B*B*1.21-0.0157*C*C;
    End;

    32: Begin
T1:=113.1-4.86*A-0.118*B-0.351*C+0.0848*A*A;
Am1:=-6.66+0.458*A+0.092*B+0.174*C-0.0055*A*A;
T2:=15.2-0.48*A+0.0088*A*A;
Am2:=-12.43+0.221*A+0.124*B+0.715*C-0.0028*A*A-0.00092*B*B-0.0141*C*C;
T11:=113.1-4.86*A-0.118*1.1*B-0.351*C+0.0848*A*A;
Am11:=-6.66+0.458*A+0.092*1.1*B+0.174*C-0.0055*A*A;
Am22:=-12.43+0.221*A+0.124*1.1*B+0.715*C-0.0028*A*A-0.00092*B*B*1.21-0.0141*C*C
;

    End;
end; {of case}
ClrScr;
writeln('для данных условий рекомендуется установить период');
writeln('T1=',T1:3:1, ' минут или T2=',T2:3:1,' минут');
writeln('ориентировочные амплитуды ', Am1:3:1,'мВ ',Am2:3:1,'мВ');
writeln('расчитать параметры уравнений? Y/N');

```



```

ch:=Readkey;
case ch of
'y','Y': begin
omegalsq:=sqr(2*3.141/(T1*60));
omega2sq:=sqr(2*3.141/(T11*60));
gamma1:=4*(omegalsq-omega2sq)/(3*(Am1*Am1*omega2sq-Am11*Am11*omegalsq));
force1:=B*omegalsq/2;
twodelta1:=force1/(sqrt(omegalsq)*Am1);
omega01sq:=omegalsq/(1+0.75*gamma1*Am1*Am1);
omega02sq:=sqr(2*3.141/(T2*60));
omega01:=sqrt(omega01sq);
omega02:=sqrt(omega02sq);
gamma2:=4*(1.1*Am2-Am22)/(3*omega02sq*(Am22*sqr(Am22)-1.1*Am2*sqr(Am2)));
twodelta2:=force1/(Am2*sqrt(omega02sq)*(1+0.75*gamma2*omega02sq*sqr(Am2)));
      writeln('параметры первого уравнения');
      writeln('омеганоль=',omega01);
      writeln('омеганольквадрат=',omega01sq);
      writeln('гамма=',gamma1);
      writeln('двадельта=',twodelta1);
      writeln('параметры второго уравнения');
      writeln('омеганоль=',omega02);
      writeln('омеганольквадрат=',omega02sq);
      writeln('гамма=',gamma2);
      writeln('двадельта=',twodelta2);
    end;
'N','n': exit;
end; {of case}
readln;
Readln;
End.

```

