

Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МАНДРА АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.37:639

ДИСЕРТАЦІЯ

**РАДІОІМПУЛЬСНА ТЕХНОЛОГІЯ І СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ
РЕПРОДУКТИВНОЇ ЗДАТНОСТІ СТЕРЛЯДІ**

05.11.17 – Біологічні та медичні прилади і системи

Подається на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.В. Мандра

Науковий керівник:

Тітова Наталія Володимирівна доктор технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Мандра А.В. Радіоімпульсна технологія і системи підвищення репродуктивної здатності стерляді. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 «Біологічні та медичні прилади і системи»(163–біомедична інженерія). Робота виконана у Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка. Захист дисертації відбудеться у Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка – Харків, 2020.

За даними «Всесвітнього фонду дикої природи» за останні 20 років чисельність осетрових тільки Каспійського басейну скоротилася в 30 разів. В зв'язі з чим все більшого поширення набуває розвиток різних форм аквакультури. Ускладнення методів вирощування риби йшло по шляху від простого до складного, але завжди в основі лежав технологічний процес культивування різних об'єктів рибництва.

У даний час для підвищення ефективності в аквакультурі використовують різноманітні технології, а саме: різні фармакологічні добавки для стимулювання зростання, зміна складу кормів, низькоінтенсивне лазерне випромінювання, щільність посадки, зміна температурного режиму, насичення киснем води та інші. Це дає можливість підвищити вихід мальків з ікри, їх здатність до виживання, харчові показники від 5 до 15 відсотків. Однак, дані методики мають певні недоліки, пов'язані з тим, що в деяких випадках негативно відображаються на якості потомства, мають пригнічуючий вплив, високу ціну, громіздкість обладнання, фармакологічне зростання риби не завжди корисне організму людини. Аналіз літературних джерел показує, що для підвищення

репродуктивної здатності осетрових риб їх ікру слід опромінювати інформаційним радіоіпульсним випромінюванням міліметрового діапазону.

Незважаючи на певний прогрес, досягнутий в дослідженнях по впливу низькоенергетичного ЕМП на біологічні об'єкти, багато первинних молекулярних механізмів цих впливів теоретично і експериментально не розкриті. Знання ж первинних, фізично обґрунтованих механізмів впливу ЕМВ на біологічні системи, а також закономірностей взаємозв'язку молекулярного і системного рівнів, дозволить пояснити фазонаправленість біоелектромагнітних ефектів і дасть можливість прогнозувати їх виникнення, що особливо важливо для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

Застосування електромагнітних випромінювань з певними біотропними параметрами дозволить підвищити стійкість ікри осетрових до інфекційних хвороб, прискорити процес їх дозрівання, збільшити кількість і якість мальків. Однак визначення оптимальних параметрів електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону для підвищення ефективності виробництва осетрових риб вимагає проведення як теоретичних, так експериментальних досліджень.

Оскільки дослідження механізму взаємодії електромагнітних полів з ікрою осетрових вимагає точну інформацію про їх розподіл всередині об'єкта, що експериментально дослідити практично неможливо, запропоновано вирішення цього завдання теоретичними методами. Розглянуто низько-енергетичні (або інформаційні) поля, які розподілені всередині ікринки таким чином, щоб їх вплив рівномірно стимулював обмінні процеси у всьому її об'ємі. Це можливо для електромагнітних полів, довжина хвилі яких значно більша розмірів самої ікринки, що відповідає випадку квазістатисти. Оскільки діаметр ікринок осетрових лежить у діапазоні 2 – 3 мм, розглянуто вплив електромагнітних полів на них з частотами порядку 9 – 11 ГГц. У цьому випадку довжина хвилі на порядок більша, ніж розміри самої ікринки.

Показано, що більш оптимальним способом опромінення ікри є використання імпульсного опромінення, що дозволяє при низькому середньому рівні його потужності у кожному імпульсі отримувати необхідні величини

амплітуд електричних і магнітних полів і з певною періодичністю максимально ефективно активізувати обмінні процеси у клітинах.

На основі системи рівнянь Максвелла розглянуто процес впливу послідовності електромагнітних імпульсів на ікру осетрових, що знаходяться у інкубаційній ємності з водою. Самі ікринки представлені як двошарові сфери з відомими електрофізичними характеристиками. Показано, що розсіяні на ікринках електромагнітні поля можуть бути описані за допомогою потенціалів Герца.

Проведені розрахунки електромагнітних полів, як над поверхнею води у ємності з ікרוю, так і всередині води з урахуванням ікри, дали можливість визначити параметри випромінювача, його потужність та розміщення над поверхнею води.

Оскільки підвищення життєздатності ікри базується на збільшенні рухомості іонів завдяки імпульсному ЕМП, слід мати на увазі, що сумарний потенціал як на мембранах внутрішніх клітин, так і на зовнішній мембрані ікринки не повинен перевищувати 100 мВ. Значне перевищення цієї величини спричинить пробій мембран і загибель ікри. За початкове значення амплітуди електричної складової в тілі ікринки було взяте таке, що відповідає потенціалу на мембранах, який дорівнює 60 мВ.

Теоретичний аналіз розробленої моделі показав, що для підвищення продуктивності ікри необхідно інкубаційну ємність опромінювати імпульсним електромагнітним полем з такими параметрами: тривалість імпульсу дорівнює $\tau = 100 \text{ } \mu\text{s}$; шпаруватість імпульсів – 100; потужність джерела випромінювання не менше 160 Вт; частота заповнення імпульсів 10 ГГц; висота антени над поверхнею води – 0,35 м; час експозиції 25 – 35 с.

З теоретичних розрахунків витікає, що для підвищення репродуктивності осетрових риб необхідні радіоімпульсні генератори з вихідною потужністю до 160 Вт. Для виконання вимог по вихідній потужності, в генераторах для підвищення репродуктивності осетрових риб була застосована розгалужена система сумування потужностей діодів в єдиній електродинамічній системі.

У зв'язку з цим були обрані корпусовані ЛПД 3A750B з параметрами: діапазон частот $9 - 11$ ГГц; імпульсна потужність 18 Вт; імпульсний струм 25 А; $\tau_i = 100$ нс, $Q = 100$; параметри корпусу: $C_k = 0,3$ нФ, $L_k = 0,4$ нГн, $C = 0,25$ нФ.

Розрахунки показали, що для створення імпульсного джерела електромагнітної енергії з параметрами: потужність 160 Вт, тривалість імпульсу 100 нс, шпаруватість 100 , частота заповнення імпульсів 10 ГГц, необхідно застосувати 2-х каскадний суматор потужності з 8 діодами типу 3A750B в кожному каскаді. Отримання 8% ККД підсумовування потужності восьми діодів і імпульсної потужності в межах 80 Вт було отримано в єдиній електродинамічній системі на основі циліндричного резонатора з параметрами: діаметр резонатора $7,2$ см, висота $1,5$ см.

Узгодження імпедансів діодів і навантаження в єдиній електродинамічній системі можливо на основі коаксіальних ліній (Т-образне зчленування) з параметрами: $D_2 = 7$ мм; $L_p = 0,7$ см; хвильовий опір $W_{ок} = 50$ Ом; опір втрат $R_p = 0,06$ Ом.

Для виконання вимоги когерентності і стабільності амплітудно-фазових параметрів в імпульсному режимі була використана зовнішня синхронізація імпульсних генераторів високостабільним безперервним сигналом. Як джерело вхідного сигналу був використаний генератор на ЛПД, із стабілізуючим високочастотним об'ємним резонатором прохідного типу з добротністю 5000 .

В результаті проведених експериментальних досліджень для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб було розроблено інформаційне радіоімпульсне електромагнітне джерело з параметрами:

частота заповнення імпульсів – $10,0 \pm 0,02$ ГГц; амплітуда напруги в імпульсі – $160,0 \pm 5$ Вт; період проходження імпульсів – $1,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,1 \cdot 10^{-5}$ с; тривалість імпульсів – $1,0 \cdot 10^{-7} \pm 0,1 \cdot 10^{-7}$ с; експозиція опромінення дози ікри – 25 ± 2 с; відносна нестабільність частоти – $1,6 \cdot 10^{-6}$.

Для ефективного підвищення репродуктивної здатності осетрових риб виникла необхідність в розробці ширококугової параболічної антени з параметрами: діаметр розкриву головного дзеркала – 190 мм; діаметр контррефлектора – 58 мм; радіус розкриву опромінювача – 15 мм; дійсна піввісь гіперболоїда – 28 мм; фокусна відстань контррефлектора – 110 мм; КСХН не більше 1,8; енергетична діаграма спрямованості – 30 см.

У процесі експерименту було створено оптимальний температурний режим для розвитку ікри стерляді в межах 20–23 °С. У віці 3–10 діб вибирали температурну зону 20–22 °С, 10–20 діб – 18,5–20,5 °С, 20–35 діб – 16–18,5 °С, 35–45 діб – 14,5–16 °С, а 45–60 діб – 12–14,5 °С. Солоність води 2–3 %. Через 15 діб солоність води встановлювалася до 6 %.

Дослідження показали, що опромінення ікри стерляді збільшує її життєздатність на 40–45 % в порівнянні з неопроміненою.

Аналіз отриманих даних показує, що в досліді початкова вага мальків стерляді була на 20 % більша, ніж в контролі. Через 30 діб маса стерляді в досліді була на 30 % більша, ніж в контролі. В процесі виробництва було встановлено, що відносна швидкість росту в досліді була на 17 % більше, ніж в контролі. Вживання мальків в досліді було на 13 % більше, ніж в контролі.

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

- вперше, на основі розробленої моделі, теоретично досліджено процес впливу радіоімпульсних електромагнітних випромінювань на ікру осетрових риб і визначені параметри радіоімпульсного електромагнітного випромінювання для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб;
- вдосконалена теорія аналізу коливальної системи радіоімпульсного багатодіодного генератора, яка відрізняється від відомих тим, що в ній обґрунтована гібридна схема побудови радіоімпульсних багатодіодних генераторів і визначено кількість діодів для отримання необхідної потужності;

- отримала подальший розвиток теорія аналізу суматора потужності на основі циліндричного резонатора, що відрізняється від відомих тим, що в ній визначені параметри резонатора і визначені місця розташування діодних модулів;
- вперше математично інтерпретовано вплив біотропних параметрів інформаційного радіоімпульсного електромагнітного випромінювання для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати формують науково-технічну базу по створенню радіоімпульсної біотехнології і багатодіодного генератора радімпульсної електромагнітної енергії у сантиметровому діапазоні довжин хвиль для підвищення репродуктивної здатності стерляді.

Дослідження проводилися в Бюджетній установи «Методично-технологічний центр з аквакультури» протягом 2018 р. та 2019 р. В результаті експерименту було встановлено, що опромінення ікри стерляді радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням підвищує життєздатність ікри на 40-45% в порівнянні з неопроміненими. Экономическая эффективность от внедрения информационной радиоимпульсной электромагнитной технологии для повышения репродуктивной способности стерляди составил 23726 грн. на 1 кг икры.

Аналіз отриманих даних у «Державном агенстве рибного господарства України» показує, що в досліді початкова вага мальків стерляді була на 20 % більше, ніж в контролі. Через 30 діб маса стерляді в досліді була на 30 % більше, ніж в контролі. В процесі виробництва було встановлено, що відносна швидкість росту в досліді була на 17 % більше ніж в контролі. Вживання мальків в досліді було на 13 % більше, ніж в контролі.

Экономическая эффективность от внедрения информационной радиоимпульсной электромагнитной технологии для повышения репродуктивной способности стерляди составила 28000 грн. на 1 кг икры.

Ключові слова: гідробіонт, інкубаційні апарати, радіоімпульсне опромінення, ікра стерляді, імпульсні генератори, електродинамічні системи.

Список публікацій здобувача

44. Mandra A., Titova N. Analysis of the biophysical action of an electromagnetic field to increase the reproductivity of sturgeon fish // The Scientific Heritage (Budapest).- 2020.- No. 45 (2020), P. 2.- Pp. 3-6.
102. Mandra A. Analysis of energy and construction parameters of the synchronizing generator on the avalanche flight diodes // Slovak International Scientific Journal.- 2020.- Vol. 1, No. 39 (2020).-Pp. 21-25.
104. Mandra A. Determination of the parameters of the electrodynamic system of a multi-diode generator to increase the reproductive ability of sturgeon fish // , Osterreichisches Multiscience Journal.-2020.- Vol. 1, No. 26 (2020).-Pp. 47-51.
81. Mandra A. Calculaton of electromagnetic pulse field in incubation capacity with sturgeon caviar/A. Mandra, E. Pirotti// The Scientific Heritage (Budapest).-2020.- No. 46 -P.1.- Pp. 20-24.
90. Mandra A. Deternation of the electromagnetic pulse field parameters influencing the sturgeon caviar in the incubation capacity/A. Mandra,Y. Pirotti//Slovak international scientific journal.- N₀40,VOL.1.- Bratislava, 2020.-P.16 -21.

ABSTRACT

A. Mandra. Pulse technology and systems to increase the reproductive capacity of sterlet. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on a scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.11.17 "Biological and medical devices and systems" (163 – biomedical engineering). The work was performed at Kharkiv Vasylenko National Technical University of Agriculture. The dissertation will be defended at Kharkiv Vasylenko National Technical University of Agriculture. – Kharkiv, 2020.

According to the World Wildlife Fund, the number of sturgeons in the Caspian Basin alone has decreased 30 times over the past 20 years. As a result, the development of various forms of aquaculture becomes more widespread. The complication of fish farming methods went from simple to complex, but always based on the technological process of cultivating various fish farms.

Currently, to increase efficiency in aquaculture there are a lot of technologies, namely: various pharmacological additives to stimulate growth, changes in feed composition, low-intensity laser radiation, planting density, changes in temperature, oxygen saturation and others. This makes it possible to increase the yield of fry from the eggs, their ability to survive, nutritional value from 5 to 15 percent. However, these techniques have certain disadvantages due to the fact that in some cases negatively affect the quality of the offspring, have a depressing effect, high cost, cumbersome equipment, and pharmacological growth of fish is not always beneficial to the human body. Analysis of the literature shows that to increase reproductive capacity of sturgeon their eggs should be irradiated with informational radio pulse radiation of the millimeter range.

Despite some progress in research on the effects of low-energy EMF on biological objects, many of the primary molecular mechanisms of these effects have not been theoretically and experimentally disclosed. Knowledge of the primary, physically sound mechanisms of EMF influence on biological systems, as well as the laws of the relationship of molecular and systemic levels, will explain the phase orientation of

bioelectromagnetic effects and predict their occurrence, which is especially important to increase the reproductive capacity of sturgeon.

The use of electromagnetic radiation with certain biotropic parameters will increase the resistance of sturgeon caviar to infectious diseases, accelerate the process of their maturation, increase the number and quality of fry. However, determining the optimal parameters of electromagnetic radiation in the millimetre range to increase the efficiency of sturgeon production requires both theoretical and experimental studies.

Since the study of the mechanism of interaction of electromagnetic fields with sturgeon caviar requires accurate information about their distribution within the object, which is almost impossible to investigate experimentally, it is proposed to solve this problem by theoretical methods. The low-energy (or information) fields, which are distributed inside the egg in such a way that their influence evenly stimulates metabolic processes in its entire volume, are considered. This is possible for electromagnetic fields, the wavelength of which is much larger than the size of the egg, which corresponds to the case of quasistatics. Since the diameter of sturgeon eggs is in the range of 2 - 3 mm, the influence of electromagnetic fields on them with frequencies 9 - 11 GHz is considered. In this case, the wavelength is more than the size of the egg.

It is shown that a more optimal way of irradiating caviar is the use of pulsed irradiation, which allows at a low average level of its power in each pulse to obtain the required values, amplitudes of electric and magnetic fields and with a certain frequency to most effectively activate metabolic processes in cells.

Based on the system of Maxwell's equations, the process of influence of a sequence of electromagnetic pulses on sturgeon eggs in an incubation tank with water is considered. The eggs themselves are presented as two-layer spheres with known electrophysical characteristics. It is shown that the electromagnetic fields scattered on the eggs can be described by the Hertz potentials.

The calculations of electromagnetic fields, both above the water surface in the caviar tank and inside the water, taking into account the caviar, made it possible to determine the parameters of the radiator, its power and location above the water surface.

Since the increase in egg viability is based on the increase of ion mobility due to pulsed EMF, it should be borne in mind that the total potential on the membranes of the

inner cells and on the outer membrane of the egg should not exceed 100 mV. Significant excess of this value will cause membrane breakdown and caviar death. The initial value of the amplitude of the electrical component in the body of the egg was taken to correspond to the potential on the membranes, which is equal to 60 mV.

Theoretical analysis of the developed model showed that to increase the productivity of eggs it is necessary to irradiate the incubation tank with a pulsed electromagnetic field with the following parameters: pulse duration is equal to $\tau_i = 100$ ns; duty cycle of pulses - 100; power of the radiation source not less than 160 W; pulse filling frequency 10 GHz; height of the antenna above the water surface - 0.35 m; exposure time 25 - 35 s.

From theoretical calculations it follows that to increase the reproductive capacity of sturgeon radio pulse generators with an output power up to 160 W is necessary. To meet the requirements for output power, generators to increase the reproductive capacity of sturgeon used an extensive system of summing the power of diodes in a single electrodynamic system.

In this regard, the enclosed LPD 3A750B with the following parameters was selected: frequency range 9 - 11 GHz; pulse power of 18 W; pulse current 25 A; $\tau_i = 100$ ns; $Q = 100$; case parameters: $C_k = 0,3$ pF, $L_k = 0,4$ nGn, $C = 0,25$ pF.

Calculations have shown that to create a pulsed source of electromagnetic energy with parameters: power 160 W, pulse duration 100 ns, duty cycle 100, pulse filling frequency 10 GHz, you must use a 2-stage power adder with 8 diodes type 3A750V in each stage. Obtaining 8% efficiency of summation of power of eight diodes and pulse power within 80 W was obtained in a single electrodynamic system based on a cylindrical resonator with the parameters: resonator diameter 7.2 cm, height 1.5 cm.

Coordination of diode impedances and load in a single electrodynamic system is possible on the basis of coaxial lines (T-joint) with the parameters: $D_2 = 7$ mm; $L_p = 0.7$ cm; wave resistance $W_{ok} = 50$ Ohms; loss resistance $R_p = 0.06$ Ohm.

To meet the requirement of coherence and stability of the amplitude-phase parameters in the pulse mode, external synchronization of pulse generators with a highly stable continuous signal was used. As the source of the input signal, a generator

on LPD was used, with a stabilizing high-quality volume resonator of the through-type with a quality factor of 5000.

As a result of the conducted experimental researches for increase of reproductive ability of sturgeon the information radio pulse electromagnetic source with parameters was developed:

pulse filling frequency - 10.0 ± 0.02 GHz; voltage amplitude in the pulse - 160.0 ± 5 W; pulse transmission period - $1.0 \cdot 10^{-5} \pm 0.1 \cdot 10^{-5}$ s; pulse duration - $1.0 \cdot 10^{-7} \pm 0.1 \cdot 10^{-7}$ s; radiation exposure of caviar dose - 25 ± 2 s; relative frequency instability - $1.6 \cdot 10^{-6}$.

To effectively increase the reproductive capacity of sturgeon, there was a need to develop a broadband parabolic antenna with the following parameters: the diameter of the opening of the main mirror - 190 mm; diameter of a counter reflector - 58 mm; radius of opening of the irradiator - 15 mm; true half-axis of the hyperboloid - 28 mm; focal length of the counter-reflector - 110 mm; KSHN no more than 1,8; energy pattern - 30 cm.

During the experiment, the optimal temperature regime for the development of sterlet caviar was created within $20 - 23$ °C. At the age of 3 – 10 days, a temperature zone of $20 - 22$ °C was chosen, 10 – 20 days - $18.5 - 20.5$ °C, 20–35 days – $16 - 18.5$ °C, 35 – 45 days - $14, 5 - 16$ °C, and $45 - 60.5$ °C for 45 – 60 days. Salinity of water is 2-3%. After 15 days, the salinity of the water was set to 6%.

Studies have shown that irradiation of sterlet caviar increases its viability by 40-45% compared to non-irradiated one.

Analysis of the obtained data shows that in the experiment the initial weight of sterlet fry was 20% greater than in the control. After 30 days, the weight of the sterlet in the experiment was 30% higher than in the control. In the production process, it was found that the relative growth rate in the experiment was 17% higher than in the control. The survival of fry in the experiment was 13% higher than in the control.

The scientific novelty of the obtained results is that in this work:

- for the first time, on the basis of the developed model, the process of influence of radio pulsed electromagnetic radiation on sturgeon caviar was theoretically

investigated and the parameters of radio pulsed electromagnetic radiation to increase the reproductive capacity of sturgeon fish were determined;

- the theory of analysis of the oscillatory system of a radio pulse multi-diode generator, which differs from the known theories that in it the hybrid scheme of construction of radio-pulse multi-diode generators is substantiated and the number of diodes to obtain the required power is determined, is improved;

- the theory of analysis of the power adder based on a cylindrical resonator, which differs from the known theories that in it the parameters of the resonator are defined and the location of diode modules is determined, is further developed;

- for the first time, the influence of biotropic parameters of information radio pulsed electromagnetic radiation for increase of reproductive ability of sturgeon is mathematically interpreted.

The practical significance of the results of the dissertation

The practical significance of the work is that the obtained results form a scientific and technical basis for the creation of radio pulse biotechnology and a multi-diode generator of radio pulse electromagnetic energy in the centimeter wavelength range to increase the reproductive capacity of sterlet.

The research was conducted at the Budget Institution "Methodological and Technological Center for Aquaculture" during 2018 and 2019. As a result of the experiment it was found that irradiation of sterlet caviar with radio pulsed electromagnetic radiation increases the viability of caviar by 40-45% compared to non-irradiated. The economic efficiency of the introduction of information radio pulse electromagnetic technology to increase the reproductive capacity of the sterlet amounted to 23726 UAH. per 1 kg of caviar.

Analysis of the data obtained by the State Agency of Fisheries of Ukraine shows that in the experiment, the initial weight of sterlet fry was 20% higher than in the control. After 30 days, the weight of the sterlet in the experiment was 30% higher than in the control. In the production process, it was found that the relative growth rate in the experiment was 17% higher than in the control. The survival of fry in the experiment was 13% higher than in the control.

Key words: aquatic organism, incubators, radiopulse irradiation, sterlet caviar, pulse generators, electrodynamic systems.

Список публікацій здобувача

44. Mandra A., Titova N. Analysis of the biophysical action of an electromagnetic field to increase the reproductivity of sturgeon fish // The Scientific Heritage (Budapest).- 2020.- No. 45 (2020), P. 2.- Pp. 3-6.

102. Mandra A. Analysis of energy and construction parameters of the synchronizing generator on the avalanche flight diodes // Slovak International Scientific Journal.- 2020.- Vol. 1, No. 39 (2020).-Pp. 21-25.

104. Mandra A. Determination of the parameters of the electrodynamic system of a multi-diode generator to increase the reproductive ability of sturgeon fish // Osterreichisches Multiscience Journal.-2020.- Vol. 1, No. 26 (2020).-Pp. 47-51.

81. Mandra A. Calculation of electromagnetic pulse field in incubation capacity with sturgeon caviar/A. Mandra, E. Pirotti// The Scientific Heritage (Budapest).-2020.- No. 46 -P.1.- Pp. 20-24.

90. Mandra A. Determination of the electromagnetic pulse field parameters influencing the sturgeon caviar in the incubation capacity/A. Mandra,Y. Pirotti//Slovak international scientific journal.- N^o40,VOL.1.- Bratislava, 2020.-P.16 -21.

ЗМІСТ

	стор
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ РЕПРОДУКТИВНОЇ ЗДАТНОСТІ ОСЕТРОВИХ РИБ	24
1.1. Роль і значення підвищення репродуктивної здатності осетрових риб	24
1.2. Особливості впливу фізичних факторів середовища на процес вирощування осетрових.....	27
1.3. Використання електромагнітних випромінювань для підвищення продуктивності біологічних об'єктів.....	30
1.4. Аналіз біофізичної дії електромагнітного поля для підвищення продуктивності ікри осетрових.....	34
1.5. Аналіз технічних пристроїв електромагнітного випромінювання в імпульсному режимі.....	38
Висновки по розділу.....	41
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМА- ГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ З ІКРОЮ ОСЕТРОВИХ, ЩО ЗНАХОДИТЬСЯ В ІНКУБАЦІЙНІЙ ЄМНОСТІ	42
2.1. Постановка нестационарної задачі розсіювання електромагнітних імпульсів на ікрі осетрових в інкубаційний період.....	42
2.2. Розв'язання задачі про проходження електромагнітного імпульсного поля в інкубаційний об'єм з водою.....	49
2.3. Взаємодія електромагнітних імпульсів з ікринками стерляді.....	56
2.4. Визначення електромагнітного поля, розсіяного на ікринці, з урахуванням її двошаровості.....	64
2.5. Розрахунок впливу імпульсного електромагнітного поля на процеси в ікринці	68

Висновки по розділу	76
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛА САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕПРОДУКТИВНОСТІ ОСЕТРОВИХ РИБ	78
3.1. Обґрунтування структурної схеми радіоімпульсного джерела.....	78
3.2. Аналіз енергетичних і конструктивних параметрів синхронізуючого генератора на лавинно-пролітних діодах.....	81
3.3. Аналіз параметрів суматора потужності багатодіодного генератора на основі циліндричного резонатора	95
Висновки по розділу	103
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ РЕПРОДУКТИВНОЇ ЗДАТНОСТІ ОСЕТРОВИХ РИБ	104
4.1. Мета і завдання експериментальних досліджень.....	104
4.2. Експериментальні дослідження енергетичних і спектральних характеристик багатодіодного генератора електромагнітного випромінювання	104
4.3. Експериментальне дослідження характеристик широкосмугової антени для обробки ікри осетрових риб.....	112
4.4. Експериментальні дослідження по впливу електромагнітного випромінювання на репродуктивну здатність осетрових риб.....	116
4.5. Алгоритмічно-програмне забезпечення технології.....	123
Висновки по розділу	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
Додаток А.....	140
Додаток Б	141
Додаток В.....	151
Додаток Д.....	152

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГЛПД – генератор на лавинно-пролітному діоді

ДП – діелектрична проникність

ЕМ – електромагнітне (ий)

ЕП – електричне поле

ЕМП – електромагнітне поле

ЕМВ – електромагнітне випромінювання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВВЧ – вкрайвисока частота

ОР – Открытий резонатор

СВЧ-сверхвисокая частота

ВСТУП

Актуальність теми. За даними «Всесвітнього фонду дикої природи» за останні 20 років чисельність осетрових тільки Каспійського басейну скоротилася в 30 разів. У зв'язку з чим все більшого поширення набуває розвиток різних форм аквакультури. Ускладнення методів вирощування риби йшло по шляху від простого до складного, але завжди в основі лежав технологічний процес культивування різних об'єктів рибництва.

У даний час для підвищення ефективності в аквакультурі використовують різноманітні технології, а саме: різні фармакологічні добавки для стимулювання зростання, зміна складу кормів, низькоінтенсивне лазерне випромінювання, щільність посадки, зміна температурного режиму, насичення киснем води та інші. Це дає можливість підвищити вихід мальків з ікри, їх здатність до виживання, харчові показники від 5 до 15 відсотків. Однак, дані методики мають певні недоліки, пов'язані з тим, що в деяких випадках негативно відображаються на якості потомства, мають пригнічуючий вплив, високу ціну, громіздкість обладнання, фармакологічне зростання риби незавжди корисне організму людини. Аналіз літературних джерел показує, що для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб їх ікру слід опромінювати інформаційним радіопульсним випромінюванням міліметрового діапазону.

Незважаючи на певний прогрес, досягнутий в дослідженнях по впливу низькоенергетичного ЕМП на біологічні об'єкти, багато первинних молекулярних механізмів цих впливів теоретично і експериментально не розкриті. Знання ж первинних, фізично обґрунтованих механізмів впливу ЕМВ на біологічні системи, а також закономірностей взаємозв'язку молекулярного і системного рівнів, дозволить пояснити фазонаправленість біоелектромагнітних ефектів і дасть можливість прогнозувати їх виникнення, що особливо важливо для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

Застосування електромагнітних випромінювань з певними біотропними параметрами дозволить підвищити стійкість ікри осетрових до інфекційних хвороб, прискорити процес їх дозрівання, збільшити кількість і якість мальків. Однак визначення оптимальних параметрів електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону для підвищення ефективності виробництва осетрових риб вимагає проведення як теоретичних, так експериментальних досліджень.

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

Тема дисертаційної роботи пов'язана із загальними Українськими науковими програмами: постановою Кабінету Міністрів України від 23.08.2016 р. № 556 «Перелік пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року»; постановою Кабінету Міністрів України від 08.09.2015 р. № 684 «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року». По планах НДР ХНТУСГ були виконані наступні роботи: номер ДР0110U002505 «Електромагнітні технології і технічні системи підвищення продуктивності біологічних об'єктів тварин та рослинництва»; номер ДР0109U003721 «Результати експериментальних досліджень з впливу ЕМП ВВЧ діапазону на біологічні об'єкти».

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є створення інформаційної, екологічно чистої і ефективної радіоімпульсної електромагнітної біотехнології і електронної системи імпульсної електромагнітної енергії для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- обґрунтувати біофізичну дію інформаційного радіоімпульсного електромагнітного випромінювання на ікру осетрових риб в технологічному процесі для підвищення їх репродуктивної здатності;
- розробити модель взаємодії інформаційного радіоімпульсного випромінювання міліметрового діапазону з ікрою осетрових;
- на основі теоретичного аналізу даної моделі визначити діапазон змін біотропних параметрів електромагнітного випромінювання (частота, тривалість і період проходження імпульсів, експозиція, амплітуда потужності в імпульсі) для впливу на ікру осетрових;
- обґрунтувати конструктивну модель радіоімпульсного генератора міліметрового діапазону на лавинно-пролітному діоді і теоретично визначити вхідні параметри діода;
- розробити та провести експериментальні дослідження імпульсного генератора на відповідність біотропним параметрам інформаційного радіоімпульсного випромінювання міліметрового діапазону для впливу на ікру осетрових риб;
- провести експериментальні дослідження щодо впливу інформаційного радіоімпульсного випромінювання на ікру осетрових риб в лабораторних і виробничих умовах.

Об'єкт дослідження. Процес впливу інформаційних радіоімпульсних електромагнітних випромінювань на ікру осетрових риб для підвищення їх репродуктивної здатності.

Предмет дослідження. Електронні системи та інформаційна імпульсна електромагнітна біотехнологія для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань були використані методи теоретичної фізики, електродинаміки, методи вирішення диференціальних і інтегральних рівнянь, методи біофізики, математичні методи планування повнофакторного експерименту.

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

- вперше, на основі розробленої моделі, теоретично досліджено процес впливу радіоімпульсних електромагнітних випромінювань на ікру осетрових риб і визначені параметри радіоімпульсного електромагнітного випромінювання для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб;
- вдосконалена теорія аналізу коливальної системи радіоімпульсного багатодіодного генератора, яка відрізняється від відомих тим, що в ній обґрунтована гібридна схема побудови радіоімпульсних багатодіодних генераторів і визначено кількість діодів для отримання необхідної потужності;
- отримала подальший розвиток теорія аналізу суматора потужності на основі циліндричного резонатора, що відрізняється від відомих тим, що в ній визначені параметри резонатора і визначені місця розташування діодних модулів;
- вперше математично інтерпретовано вплив біотропних параметрів інформаційного радіоімпульсного електромагнітного випромінювання для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати формують науково-технічну базу по створенню радіоімпульсної біотехнології і багатодіодного генератора радіоімпульсної електромагнітної енергії у сантиметровому діапазоні довжин хвиль для підвищення репродуктивної здатності стерляді.

Дослідження проводилися в Бюджетній установі «Методично-технологічний центр з аквакультури» протягом 2018 – 2019 рр. В результаті експерименту було встановлено, що опромінення ікри стерляді радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням підвищує життєздатність ікри на 40–45% в порівнянні з неопроміненою.

Аналіз отриманих даних у «Державному агентстві рибного господарства України» показує, що в досліді початкова вага мальків стерляді була на 20 % більше, ніж в контролі. Через 30 діб маса стерляді в досліді була на 30 % більше, ніж в контролі. В процесі виробництва було встановлено, що відносна швидкість росту в досліді була на 17 % більше ніж в контролі. Вживання мальків в досліді було на 13 % більше, ніж в контролі.

Економічна ефективність від впровадження інформаційної радіоімпульсної електромагнітної технології для підвищення репродуктивної здатності стерляді склала 23726 грн. на 1 кг ікри.

Особистий внесок здобувача в наукових роботах, написаних у співавторстві, полягає в наступному:

- в роботі [44] автор розкрив фізіологічні особливості ікри осетрових і проаналізував методи підвищення її репродуктивної здатності;

- в роботі [81] автором на основі теоретичних досліджень рассмотрен процесс распределения электромагнитных импульсов в инкубационной ёмкости с икрой стерляди;

- в роботі [90] автор на основі теоретичних досліджень визначив біотропні параметри радіоімпульсного випромінювання для підвищення репродуктивної здатності стерляді.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи заслуховувалися і обговорювалися на: міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології в електроенергетиці» (Харків, ХНАМГ, 2015 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я» (Харків, НТУ «ХП», 2016 р.); науково-практичній конференції

«Вплив фізичних факторів на біологічні об'єкти» (Харків. ХНУРЕ 2017 р.); міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, ХНТУСГ, 2018 р.).

Публікації.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 5 статтях в науково-технічних журналах.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ РЕПРОДУКТИВНОЇ ЗДАТНОСТІ
ОСЕТРОВИХ РИБ

1.1. Роль і значення підвищення репродуктивної здатності осетрових риб

У зв'язку зі скороченням чисельності осетрових риб особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на збереження цих видів [1].

Компенсувати зниження кількості осетрових риб можна за рахунок розвитку їх товарного виробництва, біологічні основи якого закладені в роботах [2]. Альтернативним напрямом, який дозволяє зберегти генофонд осетрових в природних водоймах, є розвиток осетрівництва, яке включає в себе відтворення запасів в природних водоймах і вирощування товарної продукції [3]. Показники вирощування молоді осетрових риб наведені в таблиці 1.1 [4, 5].

Таблиця 1.1

Показники вирощування молоді осетрових риб

Показники	Білуга	Стерлядь	Російський осетер	Севрюга
Маса початкова, г	14+ 2,3	15+3,2	4+1,2	3+0,8
Маса кінцева, г	64+8,5	27+5,7	7+2,3	5+1,2
Абсолютний приріст, г	50	12	3	2
Середньодобовий приріст, г	1,66	0,4	0,1	0,06
Середньодобова швидкість росту, %	5,19	1,97	1,88	1,77
Відносна швидкість росту, %	128,2	57,14	54,54	50
Тривалість вирощування, дні	30	30	30	30
Вживання, %	94,5	99,09	76,9	90,1

Аналізуючи всі вищевказані результати вирощування мальків осетрових риб, приходимо до висновку, що найбільш адаптованими видами в систему фізичних факторів є молодь білуги, яка показала найбільш високі результати по набору маси і виживання. Також, можна відзначити молодь стерляді, яка показала оптимальні рибоводні результати в порівнянні з молоддю російського осетра і севрюги. Два ці види є найбільш адаптивними до переходу від природних до штучних умов [4].

Стерлядь - *Acipenserruthenus* Linnaeus, 1758 - населяє річки басейнів Чорного, Каспійського та Балтійського морів. Зустрічається також в річках Північна Двіна, Об і Єнісей. Є волзькі і камські популяції стерляді. Раніше вона жила в річці Дніпро до міста Могильов і його притоках: річках Прип'ять, Десна і Тетерів, в річці Дністер і зустрічалася в річці Південний Буг і Дніпровському лимані. В даний час в річках Дніпро і Південний Буг стерлядь зустрічається дуже рідко, але можливо, збереглася в річці Дністер вище греблі Дубоссарської ГЕС [4].

Основними ознаками, що відрізняють стерлядь від більшості інших видів роду, є велика кількість бічних жучок (понад 50) і бахромчаті вусики.

Вік статевого дозрівання стерляді, також як і швидкість його формування, пов'язаний з кліматичними умовами району проживання і в південних річках становить у самців 3 - 6 (частіше 4 - 5) років, а у самок – 4 - 9 (частіше 6 - 8) років.

Початок нересту стерляді залежить від температури води (7,5 - 10,0°C), нерест триває до температури 15 - 16°C.

Абсолютна плодючість стерляді коливається в широких межах – від 4000 до 140000 ікринок. Відкладання ікри у молодих особин буває щороку, а в старшому віці – через два роки; проте міжнерестові інтервали можуть мати різну тривалість залежно від екологічних умов проживання. Ікринки стерляді – клейкі, їх діаметр становить 1,9 - 2,0 мм. Інкубаційний період триває 6 - 11 діб. Жовтковий мішок у личинок розсмоктується через 6 - 10

діб після викльову. У віці 30 діб мальки досягають довжини 3 - 4 см, а цьоголітки в вересні – 8 - 15 см[5].

Одним з показників нормального ембріонального розвитку, що характеризує якість отриманого потомства, є синхронність розвитку зародків. В ході нормального розвитку ікри стадійний розкид розвитку не повинен перевищувати більше двох стадій в пробі [1, 2, 4].

Зміна темпів і синхронності ендогенного розвитку риб може виникати внаслідок шкідливого впливу абіотичних факторів.

З підвищенням температури спостерігається десинхронізація розвитку, яка характеризується великими стадійними відмінностями, що приводять до формування різних каліцтв, значного збільшення тривалості викльову, що проходить без яскраво вираженого піку [1, 2].

Подібні явища досить часто спостерігаються при інкубації ікри на рибоводних заводах, де створення оптимальних умов зазвичай пов'язано з багатьма технічними труднощами. Управління температурним режимом інкубації ікри дозволяє уникнути негативного впливу змін температури за межами оптимального інтервалу і створити найбільш сприятливі умови для розвитку ембріонів, запобігаючи тим самим також ураження їх сапролегнією.

Оптимальна температура для розвитку ікри білуги становить 14 - 16 °С, російського осетра – 15 - 22 °С, севрюги – 17 - 24 °С, стерляді – 13 - 15 °С. Значне відхилення від оптимальних температур як у бік підвищення, так і зниження призводить до каліцтв і загибелі ембріонів. Контроль за температурним режимом здійснюють кожні 2 год. Добові коливання температури не повинні перевищувати 2 °С. Температурні показники, хід і результати інкубації реєструються в журналах.

Як при інкубації осетрових, так при роботі з білим амуром не завжди вдається забезпечити оптимальні умови для нормального перебігу фізіологічних процесів і правильного розвитку. Це погіршує рибницьку якість ікри, викликає різні порушення в будові зародків і знижує їх життєздатність. Найчастіше

причиною незадовільної якості ікри та аномалій личинок є перетримка ікри в тілі самок після овуляції.

1.2 Особливості впливу фізичних факторів середовища на процес вирощування осетрових

Основними фізичними факторами, які впливають на процес вирощування осетрових є: температура, електромагнітне випромінювання (світло), рівень солоності води [6].

Вплив температури.

Різні види осетрових мають свій оптимум температури, який з віком змінюється. Дослідним шляхом встановлено, що, наприклад, оптимальним температурним режимом для розвитку ікри осетра осіннього ходу є 20 - 23 °С. Личинки в віці 1 - 2 діб не здатні вибирати оптимум температури. Але вже у віці 3 - 10 діб вибирають температурну зону 20-22 °С, 10 - 20 діб – 18,5-20,5 °С, 20 - 35 днів – 16 - 18,5 °С, 35 - 45 діб – 14,5 - 16 °С, а 45 - 60 діб – 12 - 14,5 °С [6].

При вирощуванні личинок в таких температурних умовах зростання інтенсивності харчування і виживання були найвищими. При підвищенні температури до 27 °С загибелі осетрових не спостерігали. Оптимальними температурами для розвитку осетрових риб є діапазон 10 - 22 °С. Температурний оптимум у ранньої молоді різних видів осетрових знаходиться в наступних межах: для білуги 8 - 15 °С, севрюги 16 - 22 °С. Осетер по термостійкості ранніх стадій займає проміжне положення між білугою і севрюгою. Діапазон чутливості до зниження температури ранніх стадій у білуги 4 - 7 °С, у севрюги – 6 - 10 °С.

При виборі оптимальної температури для вирощування гідробіонтів в системах із замкнутим водопостачанням враховували вплив метаболітів на риб, швидкість розпаду зважених речовин, умови існування мікроорганізмів у спорудах біоочищення води, витрати кисню на оксигенацію.

Для осетрових риб оптимальні температурні показники знаходяться в межах від 19 до 24 °С. При цілорічному регулювання температури води в установці нами визначено оптимальний тепловий режим для осетрових риб, який знаходився в межах від 20 до 22 °С [7].

Електромагнітне випромінювання (світло).

Інтенсивність і спектральний склад проникаючого у водне середовище світла залежить від таких факторів, як відображення і заломлення світлових променів водною поверхнею, поглинання і розсіяння їх в товщі води. У природних умовах освітленість в водоймах залежить від кута падіння сонячних променів, тобто від висоти сонця над горизонтом. Краще світло проникає в воду, коли сонце в zenіті. При висоті сонця над горизонтом менше 40 - 20° інтенсивність світлового випромінювання, що проникає в воду, різко зменшується. У міру просування вглиб водної товщини сильно змінюється і спектральний склад сонячної радіації. При проходженні шару води в 1 м поглинається 25 % червоних променів і тільки 3 % фіолетових. Крім того, зважені у воді частинки лімітують проникнення світла вглиб і розсіюють його переважно в червоній частині спектра.

Ікра севрюги, що знаходиться при денному тьмяному світлі, розвивається на 18 - 26 год. швидше, ніж в темряві. Передличинки, що з неї вилупилися, мали більші розміри і масу, ніж ті, що проходять розвиток в темряві [3]. Розвиток ікри осетра і шипа краще протікає при освітленості 10 - 20 лк, севрюги – при 20 - 100 лк [8 - 10]. Кращий ріст личинок за 17 днів вирощування зафіксований при освітленні червоними і зеленими променями спектра, найгірший – при прямому сонячному освітленні.

Регулювання світлового фактора, особливо при індустріальних методах вирощування, за інтенсивністю, тривалістю і колірному спектрі привертає все більший інтерес дослідників рибоводів як перспективний метод інтенсифікації вирощування риб і підготовки виробників до нересту [11].

Реакція багатьох риб на світло змінюється в залежності від інтенсивності освітлення, фотоперіодизму і його спектрального складу.

Світло діє на центральну нервову систему через орган зору, а потім центральна нервова система впливає на функцію гіпофіза, який, в свою чергу, впливає на функцію статевих залоз. Статева періодичність риб регулюється одним із зовнішніх факторів – світлом, а також внутрішнім – дією гіпофіза, який є «трансформатором» світла.

Відомий істотний вплив освітленості на швидкість і характер формування структурно-функціональної організації центральної нервової системи і ряду внутрішніх і зовнішніх органів.

Солоність води.

Встановлено, що в процесі розвитку осетрових відбувається швидке підвищення солестійкості, але є особливості. Так, типово прохідні види (севрюга, російський осетер), досягнувши маси 2 - 4 грами, здатні витримувати солоність до 12 ‰. Білуга ж подібну солоність витримує при масі 4 - 8 грамів.

У личинок осетра при переході на активне живлення солоність 2 - 3 ‰ позитивно впливає на приріст. У молоді у віці 15 - 20 днів після початку харчування найбільш швидке зростання спостерігалось вже при солоності 6 ‰. Середньодобовий приріст склав 15 ‰, тоді як в прісній воді – 10 ‰.

У 30-денних дослідах з поступовим зростанням солоності води з 3 до 8 ‰ личинки і мальки (43 мг) російського осетра на 20 ‰ перевищили масу контрольних особин в прісній воді [7].

Для кожного виду і віку риб є свій оптимальний рівень солоності води. Так, активне зростання російського осетра і севрюги протягом перших 10 днів активного харчування поліпшувалося при збільшенні солоності води до 35 ‰. Практика і експерименти підтверджують, що для молоді осетрових, вирощуваної в слабосолоній воді, характерні підвищений апетит і більш швидке зростання [2].

Кисень.

Потужним джерелом збагачення води молекулярним киснем є фотосинтез водних рослин, інтенсивність якого залежить від температури і

освітлення. Фотосинтез відбувається головним чином в поверхневих шарах води, добре освітлених і прогрітих [6].

У осетра відзначається чітка видова специфічність як щодо мінімальної кількості кисню, розчиненого у воді, при якому може жити риба, так і по відношенню до інтенсивності споживання кисню в процесі дихання. При збільшенні температури води порогове напруження кисню зростає. Вплив кисневих умов на ембріогенез пов'язаний, в першу чергу, зі зміною швидкості розвитку і зростання. Так, зі збільшенням вмісту кисню в певному діапазоні концентрацій відбувається прискорення ембріогенезу. Подальше збільшення вмісту кисню призводить до уповільнення розвитку зародків і поглиблення аномалій, що утворюються. Від концентрації кисню у воді залежить їх життєдіяльність. При зменшенні його нижче певних меж падає інтенсивність харчування і викори-стання їжі на ріст, в результаті чого сповільнюється зростання. В умовах інтенсивного рибоводне господарство зниження швидкості росту настає при зменшенні вмісту кисню від 40 до 65 % [6].

При недостатньому вмісті кисню у воді знижується стійкість до несприятливих факторів зовнішнього середовища, в тому числі до промислових і побутових забруднень. Низький вміст кисню обумовлює несприятливі зоогігієнічні умови в водоймі, в результаті чого створюються передумови до накопичення органічних речовин і розмноження сапрофітної мікрофлори, яка може негативно впливати на осетра. Тривале перебування у воді з недостатнім вмістом кисню знижує активність, різко знижує стійкість до збудників хвороб.

1.3. Використання електромагнітних випромінювань для підвищення продуктивності біологічних об'єктів

Еспериментальні дослідження останніх років показують, що для підвищення продуктивності живих організмів слід використовувати інформаційні електромагнітні випромінювання [13 - 17].

Доведено, що інформаційні сигнали ЕМП, виробляються і використовуються в певних цілях самим організмом, а зовнішнє опромінення лише імітує їх. Проникаючи в біологічні об'єкт, ці випромінювання на резонансних частотах трансформуються в інформаційні сигнали, що підвищують життєдіяльність біооб'єктів [17 - 20].

Основне застосування інформаційні ЕМП знаходять для лікування і підвищення продуктивності тварин.

Застосування ЕМП для опромінення телят і кроликів дозволило збільшити живу масу телят на 7 ... 8 %, а від кроликів отримати молодняку на 10 ... 12% більше, ніж від контролю. Кролики і телята відрізнялися інтенсивністю росту і високою життєздатністю [21].

З аналізу експериментальних досліджень по впливу ЕМП на біологічні об'єкти різної природи випливає, що зазначені дії надають стимулюючу дію на функції кровотворення і склад крові тварин [22 - 25].

При певних біотропних параметрах ЕМП, які використовуються для опромінення тварин, були встановлені зміни в змісті білка і білкових фракцій, в збільшенні в крові міді, гістаміну, холестерину [22, 24, 25].

При опроміненні свиноматок електромагнітним випромінюванням з довжиною хвиль $4 \cdot 10^{-6}$ см спостерігався кращий розвиток плода в ембріональний період. Отримане потомство мало підвищену стійкість до захворювань, відрізнялося кращим ростом і розвитком. В ході експерименту також було встановлено, що опромінення свиноматок електромагнітним випромінюванням сприяло підвищенню плодючості і молочності маток, поросята народжувалися з більшою вагою по відношенню до контролю [26].

Також в результаті проведеного аналізу встановлено, що ЕМП з відповідними параметрами (частота, щільність потоку потужності, експозиція, модуляція) можуть стимулювати обмінні процеси в мікрооб'єктах (сперма, ембріони) і сприяти підвищенню продуктивності тварин [27 - 30].

Використання інформаційного радіоімпульсного електромагнітного випромінювання для опромінення сперміїв великої рогатої худоби сприяло

отриманню потомства вагою 29 ... 30 кг, виживанню 100 % і використанню життєздатних спермійів у спермодозі 5 ... 6 млн. шт. [31].

Застосування електромагнітного випромінювання для опромінення яєць шовковичного шовкопряда показало, що дані випромінювання, які діють на організм тутового шовкопряда, є рефлекторним фактором, що визначає його продуктивність [32].

Виявлено, що опромінення гени на ранніх стадіях розвитку сприяє дружності розвитку, підвищує відсоток поживлення і життєздатності гусениць. У досвідчених партіях вихід при поживленні склав 82,1 - 94,0 % при 75 - 81,7% в контролі.

Опромінення гусениць електромагнітним випромінюванням два рази на добу (вранці і ввечері) протягом усього п'ятого віку призвело до того, що гусениці завили кокон на добу раніше, а їх маса виявилася на 10 % більше.

Дослідження показали, що гусениці тутового шовкопряда чутливі до постійного магнітного поля. Вчені Ташкентського СХІ встановили позитивні впливи магнітного поля на інкубовану грену шовкопряда. Грена краще оживає, гусениці гени закінчують свій розвиток на 2 ... 3 дні раніше контрольних і коконів дають більше на 10^5 з коробки [32, 33].

При впливі електромагнітного випромінювання на мікроорганізми були з'ясовані специфічні ефекти [30, 31]:

- ефект впливу сильно залежить від частоти ЕМВ;
- ефект впливу слабо залежить від рівня щільності потоку потужності;
- спостерігається значна залежність ефектів від часу опромінення.

Також, в результаті проведеного аналізу встановлено, що ЕМП з відповідними біотропними параметрами (частота, щільність потоку потужності, експозиція, модуляція) можуть стимулювати обмінні процеси в біологічних об'єктах [30, 31].

Дія електромагнітних випромінювань має стимулюючий вплив на імунні тіла і імунні лімфоцити, які визначають захисний потенціал організму, стійкість до дії інфекційних мікроорганізмів [34 - 37].

Мікрохвильова обробка комбікормів з метою підвищення їх санітарної якості та поліпшення поживних властивостей описана в роботі [38]. Ця технологія дозволяє при годуванні тварин знизити шлунково-кишкові захворювання і падіж тварин в 2 ... 3 рази; підвищити приріст маси тварин на 13 ... 25 %, зменшити необхідну кількість кормів тваринного походження до 50 %; знизити витрату комбікормів на 12 ... 15 %. В результаті обробки в 2 - 5 разів підвищується засвоюваність природного крохмалю, енергетична цінність комбікорму зростає до 3450 ккал/кг.

Проведений аналіз щодо застосування інформаційних електро-магнітних випромінювань в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва показує, що електромагнітна енергія – це ефективне джерело, яке в ряді застосувань має безсумнівні переваги перед хімічними препаратами. Електромагнітне джерело не вносить будь-яких забруднень при впливі на біологічні об'єкти, відрізняється гнучкістю в застосуваннях і практично безінерційне в управлінні. Дія електро-магнітного випромінювання міліметрового діапазону на різні біологічні системи дозволило встановити, що біологічний вплив цього виду випромінювання ґрунтується на резонансному характері впливу і вибірковою для різної структурної організації біологічних об'єктів [39, 40, 41].

Дані численних досліджень дозволили припустити, що вибором біотропних параметрів (частота проходження імпульсів, тривалість і амплітуда імпульсів), можна домогтися сприятливого впливу на хід відтворення осетрових риб.

Ефективність підвищення репродуктивної здатності осетрових залежить від безлічі факторів, багато з яких неможливо врахувати. Однак, можна виділити основні фактори, які можуть фіксуватися в процесі відтворення осетрових. Це імпульсний характер ЕМВ, період проходження імпульсів – десятки мс, тривалість імпульсів – одиниці мкс, амплітуди імпульсів становлять до 100 В.

Що стосується експозиції при виробництві осетрових, то вона становить десятки хв., а іноді і кілька годин. Це пов'язано з тим, що для цих

цілей застосовувалися імпульсні генератори з відносною нестабільністю частоти проходження імпульсів в межах $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Через низьку стабільність частоти проходження імпульсів фактичний час взаємодії електромагнітного випромінювання з біологічним об'єктом зменшувався на 5 ... 6 порядків [42, 43].

Таким чином, для підвищення відтворення осетрових слід використовувати генератори з відносною нестабільністю частоти проходження імпульсів $10^{-6} \dots 10^{-7}$, що дозволить забезпечити повну ($\approx 95\%$) передачу енергії опромінення ікри осетрових риб та істотно зменшити час впливу до 10 с.

На основі проведеного аналізу можна припустити, що для підвищення репродуктивної здатності осетрових необхідно застосовувати електромагнітне випромінювання міліметрового діапазону. Застосування електромагнітних випромінювань з певними біотропними параметрами дасть можливість підвищити стійкість ікри осетрових до інфекційних хвороб, прискорити процес їх дозрівання, збільшити кількість і якість мальків. Однак визначення оптимальних параметрів електромагнітного випромінювання міліметрового діапазону для підвищення ефективності виробництва осетрових риб вимагає проведення як теоретичних, так експериментальних досліджень.

1.4. Аналіз біофізичної дії електромагнітного поля для підвищення продуктивності ікри осетрових

Аналіз досліджень з впливу інформаційних ЕМП на біологічні об'єкти, що проводяться: в ІРЕ РАН під керівництвом Н.Д. Девяткова; в ТулГУ під керівництвом Нефьодова Є.Н.; в Челябінському ТУСГ під керівництвом Ізакова Ф.Я.; в Харківському НТУСГ під керівництвом А.Д. Черенкова, Косуліної Н.Г., Ю.Є. Мегеля, Н.Л. Лісиченко; в Національному технічному університеті ХПІ під керівництвом Піротті Є.Л.; у Новосибірську під керівництвом Казначеева А.П. показують, що найбільший вплив ЕМП на фізико-хімічні процеси в біологічних об'єктах слід очікувати в мм діапазоні довжин хвиль [44 - 50].

Взаємодію ЕМП з біологічними об'єктами слід розглядати в рамках розвитку теорії інформаційного поля ноосфери. На самому мікроенергетичному рівні взаємодії ЕМП з біологічними об'єктами знаходиться інформаційний тип взаємодії на рівні 10^{-12} Вт. ЕМП є лише енергетичним носієм інформації в рамках ноосфери, тому необхідно розглядати саме несучу частину цих полів при взаємодії з ікрою осетрових риб [38 - 51].

В процесі еволюції живого електромагнітні, електричні і магнітні поля з неминучих супутників і свідків біохімічних процесів в результаті природного відбору перетворилися в найважливішу інформаційну систему і обов'язковий атрибут життя [51 - 54].

Слабкі електромагнітні поля землі, космічних об'єктів є одним з найважливіших видів інформації, одержуваної біоб'єктами і системами зовнішнього середовища, і відповідно до одержуваної інформацією реалізуються ті чи інші процеси життєдіяльності біологічних об'єктів. При цьому в високоорганізованих біосистемах цей вплив носить інформаційний характер і відпрацьовується кібернетичними системами організму. У біологічних системах більш низького ієрархічного рівня (клітини, молекули) електромагнітні поля можуть змінювати орієнтаційні зв'язки – електростатичне

взаємодія між диполями, іонні зв'язки та іонно-дипольні взаємодії в тій чи іншій мірі впливають на індукційні і дисперсійні зв'язки. Вважається встановленим, що електромагнітне випромінювання міліметрового діапазону може орієнтувати атомні групи і молекули, змінювати процеси дифузії, зокрема, через клітинну мембрану, індукувати додаткові комбінаційні переходи між електронними станами з різною спіновою мультиплетністю, змінювати ймовірність цих процесів і таким чином впливати на ймовірність реакцій, і в кінцевому підсумку виявляються у вигляді макроефекту на клітинному або організмовому рівні [55 - 60].

У ряді фундаментальних робіт [61 - 63] обговорено механізми впливу ЕМП на біологічні об'єкти. В [61] запропоновано механізм впливу інформаційного електромагнітного випромінювання на живі організми, заснований на припущенні

про електромеханічні автоколивання клітинних субструктур, як природному стані живих клітин.

Як впливає з [64], між ядром клітини і клітинної оболонкою, заряджених різнополярно, знаходяться мікроскопічні магнітики - вібратори, які здатні до резонансного прийому і до індукції електромагнітного поля. Електромагнітні поля окремих молекул можуть складатися і утворити загальне електромагнітне поле даного виду молекул також під впливом зовнішнього електромагнітного поля, частота якого буде збігатися з частотою вібратора, що визначає вид гена. Ці резонансні частоти, як показують розрахунки, лежать в міліметровому діапазоні довжин хвиль [58, 64].

Безліч ефектів від дії інформаційних ЕМП на біологічні системи пов'язані з водою, яка в конденсованій фазі являє собою суміш гексагональних фрагментів. Гексагональні фрагменти в залежності від умов можуть об'єднуватися в кластери різного розміру. Співвідношення концентрації і розміри кластерів визначають структурний стан водного матриксу. Кластерні структури знаходяться в коливальному стані і утворюють систему осциляторів. Синфазні коливання осциляторів здатні викликати конформаційні підстроювання клітинних структур, впливати на проникність мембран і служити інфо-рмаційним сигналом для регуляторних систем всього біологічного об'єкта [66 - 68]. Молекули води, що містяться в біологічних системах, завжди відчують вплив присутніх у цих системах молекул речовин. Типи міжмолекулярних взаємодій визначають характер поглинання ММ-випромінювання, в тому числі впливають на глибину проникнення випромінювання. При цьому незалежно від того, чи є водна система молекулярним розчином або колоїдним, характер поглинання визначається хімічною природою присутніх речовин та загальним вмістом води в системі [69].

Слід зазначити, що при переході від низькомолекулярних речовин до високомолекулярних з'являється специфіка міжмолекулярних взаємодій, обумовлена структурою молекул цих сполук, що проявляються в характері поглинання ММ-випромінювання такими системами.

Там же показано, що синхронізація випромінювання веде до появи внутрішніх інформаційних сигналів, що впливають на регуляторні системи організму. При

синхронізації зовнішнє ЕМП міняє спектральні характеристики цих осциляторів. Синхронізація може супроводжуватися фазировкою коливань всіх автогенераторів, при яких фази коливань автогенераторів збігаються з фазою зовнішнього поля в даному об'ємі біологічного об'єкта. Як впливає з робіт [64, 65] синфазні коливання здатні викликати конформаційні перебудови клітинних структур, впливати на проникність мембран і служити інформаційним сигналом для регуляторних систем всього біооб'єкту. Це пов'язано з тим, що через вплив ЕМП молекулярні взаємодії не можуть бути абсолютно надійними. Протягом дії ЕМП відбуваються навіть енергетично не вигідні реакції. Аналогічним чином специфічність ферменту щодо субстрата не може бути абсолютною, так як здатність відрізнити одну молекулу від іншої порушується. Ці помилки грають важливу роль при синтезі ДНК, так як в послідовності основ ДНК укладена генетична інформація живої клітини. Здатність азотистих основ молекул різних нуклеїнових кислот «діднаватися» один одного шляхом нековалентної взаємодії лежить в основі механізмів спадковості і мутації [57], у ряді робіт вказано на резонансний характер впливу електромагнітного поля [62]. Тобто біологічний ефект спостерігається у вузьких частотних інтервалах, причому вплив ЕМП на живі організми носить не енергетичний, а інформаційний характер [61, 63, 65], при цьому первинний вплив ЕМП реалізується на клітинному рівні і пов'язаний з біоструктурами, загальними для різних організмів. Новітні дослідження підтверджують концепцію хвильової передачі генної інформації [51 - 65]. Вихідна посилка полягає в ототожненні живої клітини з фотонною обчислювальною моделлю об'ємного типу [58]. Механізм перемикавання генної активності в процесі життєдіяльності біологічних об'єктів є найважливішим при вирішенні проблем патогенезу, управління розвитком зародків в ембріоні.

Аналіз цих процесів переконливо свідчить про механізм цієї передачі, який має хвильову природу, заснований на сигналах електромагнітних випромінювань, керуючих генною активністю.

Величина щільності потоку потужності ЕМП для реальних мікрооб'єктів осетрових залежить від конкретних механізмів впливу зовнішнього поля на

клітинні осцилятори, біотропних параметрів електромагнітного випромінювання, рівня шумів в біологічних об'єктах і повинна перевищувати рівень слабких нековалентних зв'язків в біоб'єкті: іонних взаємодій, водневих зв'язків і вандерваальсових взаємодій. За допомогою цих зв'язків реалізується інформація, укладена в послідовності макромолекулярних ланцюгів [57, 60, 64].

Практичні рівні енергії для впливу на ікру осетрових повинні складати десятки мкВт/см².

Незважаючи на певний прогрес, досягнутий в дослідженнях по впливу низькоенергетичного ЕМП на біологічні об'єкти, багато первинних молекулярних механізмів цих впливів теоретично і експериментально не розкриті. Знання ж первинних, фізично обґрунтованих механізмів впливу ЕМВ на біологічні системи, а також закономірностей взаємозв'язку молекулярного і системного рівнів, дозволить пояснити фазонаправленість біоелектромагнітних ефектів і дасть можливість прогнозувати їх виникнення, що особливо важливо для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб.

1.5. Аналіз технічних пристроїв електромагнітного випромінювання в імпульсному режимі

Попередній аналіз показав, що біологічна дія ЕМІ пов'язано з використанням високостабільних по частоті генераторів, що працюють в імпульсному режимі. Застосовувані в даний час в медицині і промисловості джерела електромагнітного випромінювання працюють в діапазоні частот 20 ... 80 ГГц, але характеризуються високою відносною нестабільністю вихідної частоти

$10^{-3} \dots 10^{-4}$, високою похибкою установки несучої частоти 30 ... 900 МГц, низькою монохроматичністю сигналу, малою вихідною потужністю 2 ... 5 мВт і тому не можуть бути використані для впливу на мікробіологічні об'єкти тваринництва [70 - 72].

Імпульсні генератори в діапазоні частот 10 ... 100 ГГц знаходять широке застосування в сучасних радіоелектронних системах різного призначення: в системах радіолокації, навігації, управління, в апаратурі наукового призначення.

Ці генератори характеризуються великими рівнями імпульсної потужності (десятки кВт), високою швидкістю, спеціальною формою вихідних сигналів [73 - 76].

В даний час розроблені і випускаються промисловістю електровакуумні й напівпровідникові імпульсні прилади.

Основними критеріями при виборі того чи іншого джерела потужності імпульсних коливань мм діапазону є: енергоспоживання, габаритно-масові характеристики, області застосування, а також їх вартість, яка може становити для електровакуумних приладів десятки тисяч доларів США.

Для дослідження впливу інформаційних імпульсних коливань на ікру осетрових риб потрібні малогабаритні, з малим споживанням енергії, радіоімпульсні джерела потужності. Такі джерела можуть бути створені на основі напівпровідникових приладів.

Характеристики імпульсних напівпровідникових приладів наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Напівпровідникові імпульсні діоди

Тип діода	Частота, ГГц	Потужність вихідна, Вт
3 А 750 А, Б, В, Г (ЛПД)	8...12	10...25
2 А 752 А, Б, В, Г (ЛПД)	70...80	3...6
3 А 760 А-4, Б-4 (ЛПД)	35...37	15...20
2 А765 А-4 (ЛПД)	50...58	10
2 А766 А-4 (ЛПД)	96...100	2...3
2 А766 Н-4 (ЛПД)	96...100	≥ 10
3А727 А, Б, В, Г (ДГ)	35...55	0,5 – 0,8
3А740 А (ДГ)	80...100	0,05 – 0,15

Як видно з табл. 1.2, найбільш потужними напівпровідниковими приладами є крем'яні ЛПД. Експлуатаційні характеристики генератора на ЛПД (вихідна потужність, частота, ККД, діапазон перебудови, якість спектра, надійність, рівень шумів), а також режим роботи залежать не тільки від параметрів ЛПД, але значною мірою від типу резонансної системи.

Через неоднорідність напівпровідникового матеріалу ЛПД, що випускаються і розробляються, мають великий розкид основних параметрів, а отже, і комплексного опору. У зв'язку з чим безпосередні вимірювання комплексного опору діода набувають важливого значення.

У міліметровому діапазоні хвиль найбільшого поширення набули хвилеводні резонансні системи, тому що в цьому діапазоні їх добротність вище, ніж у коаксіальних і полоскових систем. Крім того, в хвилеводних резонансних системах простіше здійснювати механічну перебудову частоти і тепловідвід.

Для розрахунку електродинамічних систем радіоімпульсних генераторів слід використовувати метод еквівалентних схем за методикою, викладеною в [77]. Методи еквівалентних схем мають ряд переваг в порівнянні зі строгими електродинамічними методами, зокрема, можливістю якісно судити про характер частотних характеристик, отримати більш прості вирази для інженерних розрахунків резонансних систем.

Важливою особливістю імпульсного режиму генераторів на ЛПД, яку необхідно враховувати при розробці, є зміна частоти, що генерується в межах радіоімпульса, що призводить до частотної модуляції вихідного сигналу.

Для генераторів на ЛПД в імпульсному режимі доцільний режим коротких імпульсів струму живлення, тому що ЛПД характеризуються малою величиною теплової часової постійної і швидко розігріваються. Такий режим дозволяє забезпечити тепловий режим діода і підвищити значення щільності струму в кілька разів у порівнянні з роботою в безперервному режимі. Строге рішення нестационарних теплових задач є математично досить складним. Для ряду спрощених моделей в літературі отримано аналітичні залежності температури активної ділянки ЛПД від часу [78, 79].

Однак, ці залежності для строго кількісних оцінок непридатні, тому що в них не враховано такий істотний фактор, як зміна теплопровідності матеріалів зі зміною температури в робочому інтервалі 300 ... 500 К, яка досить значна. Короткочасний розігрів діода до температури 300 ... 500 К призводить до різкої температурної залежності імпедансу діода і викликає зсув частоти імпульсного генератора, що генерується, до 5 % і зміна його вихідної потужності до 2 дБ. Тому, розрахунок теплового режиму радіоімпульсного генератора на ЛПД необхідний для оцінки його граничних можливостей по потужності, частоті і спектру вихідного сигналу. При розробці генераторів на ЛПД в радіоімпульсному режимі також слід враховувати фазові пошуки спектра, що виникають при тривалостях імпульсу великих або порівняних з часом теплової релаксації діода.

Висновки по розділу

1. На основі аналізу фактичного матеріалу вітчизняних і зарубіжних публікацій встановлено, що для підвищення репродуктивної здатності ікри осетрових риб її слід обробляти радіоімпульсним випромінюванням з певними біотропними параметрами.
2. Для визначення параметрів радіоімпульсного електромагнітного випромінювання, яке при опроміненні ікри осетрових підвищує їх продуктивність, необхідні теоретичні дослідження процесу взаємодії електромагнітного поля з ікрою осетрових риб з урахуванням їх будови і біофізичних характеристик.
3. Для розробки ЕМ технології, пов'язаної з впливом радіоімпульсного інформаційного ЕМП на ікру осетрових, необхідні дослідження зі створення радіоімпульсних генераторів на напівпровідникових приладах.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ З ІКРОЮ ОСЕТРОВИХ, ЩО ЗНАХОДИТЬСЯ В ІНКУБАЦІЙНІЙ ЄМНОСТІ

2.1 Постановка нестационарної задачі розсіювання електромагнітних імпульсів на ікрі осетрових в інкубаційний період

Як було показано вище, підвищення продуктивності риборозвідницької галузі України є актуальним завданням і має досить велику кількість шляхів вирішення. Одним з них є використання низькоенергетичних полів НВЧ діапазону. Це пов'язано з тим, що наявність наведеного ззовні електромагнітного поля всередині ікринки стимулює оптимальне проходження в ній обмінних процесів і більш активний розвиток зародка. Однак розробка методики розрахунку розподілу електромагнітних полів в ікринках осетрових є досить складним завданням, оскільки вона пов'язана з подоланням значних труднощів теоретичного та методичного характеру.

Вплив електромагнітних полів НВЧ діапазону на біологічні об'єкти, як тваринного, так і рослинного типу, досить непогано досліджений експериментально, але при цьому, найчастіше, практично повністю відсутнє уявлення про механізми цього впливу, як на організменному, так і на клітинному рівнях. У свою чергу, дослідження механізму взаємодії електромагнітних полів з різними біологічними об'єктами неможливе без точної інформації про розподіл цих полів всередині об'єкта, бо цей механізм безпосередньо пов'язаний як з величиною, так і за орієнтацією електричної і магнітної складових поля. Таким чином, визначення електромагнітних полів в ікрі осетрових по заданому полю опромінення є одним із важливих завдань електромагнітної біології. Оскільки експериментальне дослідження розподілу внутрішніх полів провести практично неможливо, постає питання про вирішення цього завдання теоретичними методами.

Суттєвим є те, що відомі строгі і наближені методи призводять дуже часто до громіздким обчислень, пов'язаних з вельми серйозними труднощами математичного характеру і з використанням потужної обчислювальної техніки. У той же час прикладна сторона електромагнітного впливу на біологічні об'єкти, пов'язана з конкретними технічними розробками спеціальних приладів і систем, вимагає як простих підходів, так і простих рішень поставлених завдань, якими б могли користуватися особи, що не мають спеціальної підготовки в області електродинаміки і математики.

Використовувані для активізації процесу розвитку ікри осетрових електромагнітні випромінювання не можуть бути, з одного боку, теплового рівня потужності, оскільки це призведе до руйнування структури ікринки і загибелі зародків, а з іншого боку, низькоенергетичні (або інформаційні) поля повинні бути розподілені всередині ікринки таким чином, щоб їх вплив рівномірно стимулював обмінні процеси у всьому її об'ємі.

Такий вплив на ікру осетрових може відбуватися тільки в тому випадку, коли поле всередині ікринки майже однорідне. Це можливо для електромагнітних полів, довжина хвилі яких значно більша розмірів самої ікринки, що відповідає випадку квазістатистики. Оскільки діаметр ікринок осетрових лежить у діапазоні 2 – 3 мм, потрібно розглядати вплив електромагнітних полів на них з частотами порядку 9 ... 11 ГГц. У цьому випадку довжина хвилі на порядок більша, ніж розміри самої ікринки.

Крім того, більш оптимальним способом опромінення ікри є використання імпульсного опромінення, що дозволяє при низькому середньому рівні його потужності у кожному імпульсі отримувати необхідні величини амплітуд електричних і магнітних полів і з певною періодичністю максимально ефективно активізувати обмінні процеси у клітинах.

Як відомо, існують аналітичні методи вирішення поставленого завдання. Перевагою цих методів є те, що вони дозволяють описувати реальні процеси, що відбуваються в досліджуваних об'єктах, структурах і дають можливість розглянути фізичні процеси, що відбуваються в біологічних об'єктах. Дані

методи не пов'язані з подоланням математичних труднощів і великим обсягом обчислень, які притаманні чисельному і блочного методам.

З огляду на вищесказане, в роботі покладено в основу методичний план вирішення завдання визначення електромагнітного поля всередині ікринок методами поступового наближення до реальної ситуації за допомогою переходу від питань, що вирішуються за допомогою відомих прийомів, до підходів, що призводять до нових результатів.

Таким чином в даному розділі розв'язується крайова задача для системи диференціальних рівнянь Максвелла, що моделює процес впливу послідовності електромагнітних імпульсів на ікринки осетрових (або, взагалі кажучи, на ікру будь-якої риби), що знаходяться в інкубаційній ємності. За допомогою перетворення Лапласа вихідна нестационарна задача зводиться до задачі дифракції електромагнітних хвиль на області, що містить ікру, яка моделюється ізотропним однорідним середовищем з комплексною діелектричною проникністю. Задача дифракції розв'язується методом об'ємних інтегральних рівнянь. В результаті отримано вираз для напруженості електричного поля, усередненого по ємності з досліджуваною ікрою.

Будемо розглядати задачу для системи рівнянь Максвелла, яка моделює процес впливу послідовності електромагнітних імпульсів на ікру осетрових, що знаходяться у інкубаційній ємності з водою. Самі ікринки будемо розглядати як однорідні малі сфери У роботах [80, 81] запропоновано метод розв'язання цієї задачі, який дозволяє отримати досить прості вирази для внутрішніх і зовнішніх полів ікринок. Однак реальні ікринки, що задовольняють запропонованим вимогам, мають складну внутрішню структуру, яка призводить до багат шаровості (в першому наближенні – двошаровості).

В якості моделі інкубаційного об'єму розглядається ємність заповнена водою з відносною діелектричною проникністю на частоті 9 – 11 Гц, описуваною формулою [82, 83]

$$\varepsilon_{\hat{a}} = \varepsilon'_{\hat{a}} + i\varepsilon''_{\hat{a}} = 65,3 + 22,3i \quad (2.1)$$

де $\varepsilon'_{\hat{a}}$ – дійсна частина відносної комплексної діелектричної проникності води;

$\varepsilon''_{\hat{a}}$ – уявна частина відносної комплексної діелектричної проникності води.

Розв'язок нашої задачі пов'язаний з двома напівпросторами: у верхній частині знаходиться повітря з розташованою у ньому антеною для опромінення ікри; у нижній – інкубаційна ємність, заповнена водою з ікрою осетрових. У зв'язку з цим введемо декартову систему координат таким чином, щоб межа розділу повітря – вода збігалася з площиною XOY , повітря відповідають значення $z > 0$, а напівпростору, заповненому водою з ікрою – $z \leq 0$, (рис. 2.1).

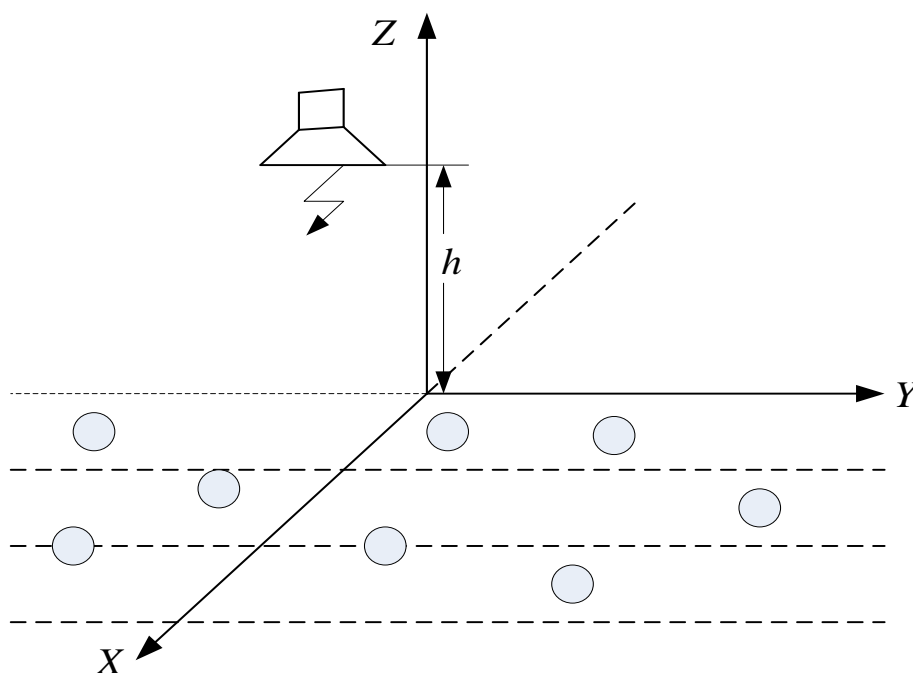


Рис. 2. 1. Геометрія моделі з антеною

Припустимо, що плоский розкрив випромінюючої антени паралельний площині XOY і розташований на висоті h від поверхні води. Строгий розв'язок задачі про випромінювання антени може бути замінений наближенням [84]. Цей наближений розв'язок має відомі межі застосування і полягає в заміні задачі про випромінювання антени на задачу про випромінювання еквівалентних струмів,

розподілених на розкриві антени. Таким чином, будемо вважати, що на плоскому розкриві антени заданий струм з густиною, що залежить від часу:

$$\vec{j}(t) = F(t) \vec{e}. \quad (2.2)$$

У виразі (2.2) $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орти декартової системи координат, а функція $F(t)$ дорівнює нулю при $t < 0$, а при $t \geq 0$ являє собою періодичні прямокутні радіоімпульси

$$F(t) = I \left[\sigma_0(t) - \sigma_0(t - \tau) + \sigma_0(t - T) - \sigma_0(t - (\tau + T)) + \sigma_0(t - 2T) - \sigma_0(t - (\tau + 2T)) + \dots \right] \cos^2 \omega t, \quad (2.3)$$

де $\sigma_0(t)$ – функція Хевісайда;

$$\sigma_0(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0; \end{cases}$$

I – амплітуда імпульсу струму;

τ – тривалість імпульсу;

T – період повторення імпульсів;

ω – кругова частота заповнення імпульсу.

Запропонований розподіл густини струму породжує електромагнітне поле з вектором напруженості електричного поля паралельним поверхні води (площині). В цьому випадку електромагнітне поле проходить у воду з меншим відбиттям, ніж в разі, коли вектор напруженості електричного поля перпендикулярний поверхні води.

Збуджене джерелом (2.2), (2.3) електромагнітне поле має задовольняти системі нестационарних рівнянь Максвелла. При $z > 0$ –

$$\begin{cases} \mathbf{rot} \vec{\mathbf{E}}_{\dot{\imath}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}_{\dot{\imath}}}{\partial t}, \\ \mathbf{rot} \vec{\mathbf{H}}_{\dot{\imath}} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}_{\dot{\imath}}}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}, \end{cases} \quad (2.4)$$

де $\vec{\mathbf{E}}_{\dot{\imath}}$ і $\vec{\mathbf{H}}_{\dot{\imath}}$ – вектори електричного і магнітного поля у повітрі, відповідно.

При $z < 0$ –

$$\begin{cases} \mathbf{rot} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}}{\partial t}, \\ \mathbf{rot} \vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}} = \varepsilon_{\hat{a}} \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}}{\partial t} + \sigma_{\hat{a}} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}$ і $\vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}$ – вектори електричного і магнітного поля у воді.

Тут ε_0 , μ_0 – діелектрична і магнітна проникності вакууму (передбачається, що відносна діелектрична проникність повітря дорівнює одиниці), $\varepsilon_{\hat{a}}$ і $\sigma_{\hat{a}}$ – відповідно, відносна діелектрична проникність і питома провідність води з ікрою осетрових.

Позначимо D об'єм, який займають ікринки у воді. Тоді електромагнітне поле в цій області має задовольняти рівнянням Максвелла

$$\begin{cases} \mathbf{rot} \vec{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t}, \\ \mathbf{rot} \vec{\mathbf{H}} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t} + \sigma \vec{\mathbf{E}}, \end{cases} \quad (2.6)$$

де $\vec{\mathbf{E}}$ і $\vec{\mathbf{H}}$ – вектори електричного і магнітного поля всередині ікринок;

ε і σ – відносна діелектрична проникність і питома провідність області D .

Величини ε і σ виражаються через відносну діелектричну проникність $\varepsilon_{\hat{a}}$ і питому провідність води $\sigma_{\hat{a}}$, і усереднені значення відносної діелектричної проникності $\bar{\varepsilon}$ і питомої провідності ікринки $\bar{\sigma}$ за такими виразами

$$\begin{aligned}\varepsilon &= (1-b)\varepsilon_{\hat{a}} + b\bar{\varepsilon}, \\ \sigma &= (1-b)\sigma_{\hat{a}} + b\bar{\sigma}.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Тут параметр $b = V_1/V$, V – об'єм води у інкубаційній ємності, V_1 – об'єм області D , займаної біологічними об'єктами. На межах розділу середовищ (поверхня води – $z = 0$ і Γ_D – поверхня області D) шукане електромагнітне поле повинно задовольняти умові сполучення (безперервність тангенціальних компонент електричного і магнітного полів). Крім того, це поле повинно задовольняти початковим умовам, які при обраній залежності густини струму від часу мають вигляд

$$\begin{aligned}\vec{E}_{\hat{i}}|_{t=0} &= \vec{H}_{\hat{i}}|_{t=0} = 0, \\ \vec{E}_{\hat{a}}|_{t=0} &= \vec{H}_{\hat{a}}|_{t=0} = 0, \\ \vec{E}|_{t=0} &= \vec{H}|_{t=0} = 0.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Таким чином, потрібно визначити електромагнітне поле, яке породжене джерелом (2.2), (2.3) і задовольняє умовам (2.4) - (2.5), (2.8).

Розв'язок цього завдання будемо проводити в два етапи. На першому етапі вирішується завдання про проходження електромагнітного поля, що збуджується щільністю струму (2.2), (2.3) в інкубаційну ємність з водою. Далі, вирішується завдання про взаємодію поля у воді з областю, в якій знаходяться ікринки стерляді. Для розв'язання цих завдань використовується операційний метод (перетворення Лапласа за часовою змінною) і метод об'ємних

інтегральних рівнянь. В результаті знаходиться вираз для електромагнітного поля, що усереднено по області, займаної біологічними об'єктами.

2.2 Розв'язання задачі про проходження електромагнітного імпульсного поля в інкубаційний об'єм з водою

У цьому підрозділі досліджується допоміжна задача про проходження електромагнітного імпульсного сигналу в інкубаційну ємність з водою. На початку розглянемо задачу про електромагнітне поле, яке порушується джерелом (2.2), (2.3) у вільному просторі (об'єм з водою відсутній). Оскільки, передбачається, що розподіл щільності поверхневого струму (2.2) не залежить від просторових змінних x, y , то природно припустити, що шукане електромагнітне поле так само не залежить від цих змінних. У цьому випадку, як впливає з системи рівнянь (2.4), вектора напруженості електричного і магнітного полів матимуть наступні компоненти

$$\vec{E}_i = E_{xi} \vec{e}_x, \quad \vec{H}_i = H_{yi} \vec{e}_y, \quad (2.9)$$

де \vec{e}_x, \vec{e}_y – орты декартової системи координат.

З огляду на це, запишемо систему рівнянь Максвелла в декартовій системі координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{xi}}{\partial z} &= -\mu_0 \frac{\partial H_{yi}}{\partial t}, \\ -\frac{\partial H_{yi}}{\partial t} &= \varepsilon_0 \frac{\partial E_{xi}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Компоненти електромагнітного поля $E_{x\ddot{i}}$, $H_{y\ddot{i}}$ повинні відповідати таким вимогам

$$E_{x\ddot{i}} \Big|_{t=0} = H_{y\ddot{i}} \Big|_{t=0} = 0, \quad (2.11)$$

а при $z = h$

$$H_{y\ddot{i}} \Big|_{z=h} = F(t), \quad (2.12)$$

де функція $F(t)$ задається формулою (2.3).

Умова (2.12) моделює збудження електромагнітного поля поверхневим струмом, розподіленим на площині розкриву антени, що збігається з площиною $z = h$

Розв'язок задачі (2.10) - (2.12) може бути отримано за допомогою операційного методу (перетворення Лапласа по часовій змінній) [85]. Нехай $\bar{E}_{x\ddot{i}}(z, p)$ і $\bar{H}_{y\ddot{i}}(z, p)$ позначають перетворення Лапласа функцій $E_{x\ddot{i}}(z, t)$ і $H_{y\ddot{i}}(z, t)$, а саме

$$\begin{aligned} \bar{E}_{x\ddot{i}}(z, p) &= \int_0^{\infty} E_{x\ddot{i}}(z, t) e^{-pt} dt, \\ \bar{H}_{y\ddot{i}}(z, p) &= \int_0^{\infty} H_{y\ddot{i}}(z, t) e^{-pt} dt. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Тоді, застосовуючи перетворення Лапласа до рівнянь (2.10), будемо мати

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{E}_{x\ddot{i}}}{\partial z} &= -\mu_0 p \bar{H}_{y\ddot{i}}, \\ -\frac{\partial \bar{H}_{y\ddot{i}}}{\partial z} &= \varepsilon_0 p \bar{E}_{x\ddot{i}}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Граничну умову (2.12) можна представити в наступному вигляді

$$\bar{H}_{y\ddot{i}}(h, p) = \bar{F}(p). \quad (2.15)$$

Тут функція $\bar{F}(p)$ є перетворенням Лапласа функції $F(t)$ (2.3) та має вигляд:

$$\bar{F}(p) = I \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{2p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)}, \quad (2.16)$$

де I – амплітуда імпульсу струму;

τ – тривалість імпульсу;

T – період повторення імпульсів.

Розв'язок задачі (2.14) – (2.16) можна отримати в аналітичній формі.

Виключаючи з рівнянь (2.14) функцію $\bar{H}_{y\ddot{i}}$, отримуємо

$$\frac{\partial^2 \bar{E}_{x\ddot{i}}}{\partial z^2} - p^2 \varepsilon_0 \mu_0 \bar{E}_{x\ddot{i}} = 0. \quad (2.17)$$

Загальний розв'язок рівняння (2.17) має вигляд:

$$\bar{E}_{x\ddot{i}} = A e^{k_{\ddot{i}} z} + B e^{-k_{\ddot{i}} z}, \quad (2.18)$$

де $k_{\ddot{i}} = p \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$;

A і B – довільні константи, що не залежать від змінної z .

Оскільки функція $E_{x\dot{i}}$ повинна задовольняти умові (2.11), тому в (2.18) слід покласти $B = 0$. Тоді, використовуючи (2.14) і підставляючи (2.18) в граничну умову (2.15), отримуємо

$$-\frac{k_{\dot{i}}}{\mu_0 p} A e^{k_{\dot{i}} h} = \bar{F}(p). \quad (2.19)$$

З (2.19) маємо

$$A = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} e^{-k_{\dot{i}} h} \bar{F}(p). \quad (2.20)$$

Одержаний коефіцієнт A дає можливість представити перетворення Лапласа для компонентів електромагнітного поля, що збуджені струмом (2.2), (2.3), в наступному вигляді

$$\bar{E}_{x\dot{i}} = -I \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{2p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)} e^{k_{\dot{i}}(z-h)}. \quad (2.21)$$

Якщо тепер скористатися зворотним перетворенням Лапласа [85], то легко отримати вираз для напруженості електричного поля, що породжується поверхневим струмом (2.2)

$$E_{x\dot{i}} = -\frac{I}{4\pi i} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)} e^{k_{\dot{i}}(z-h)} e^{pt} dp, \quad (2.22)$$

де $a > 0$ – довільне постійне число.

Інтеграл в (2.22) можна обчислити за допомогою методу лишків [85]. Легко бачити, що підінтегральна функція в (2.22) має особливості по змінній p в комплексній площині типу простого полюса в точках

$$p_n = i \frac{2\pi}{T} n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.23)$$

Тоді використовуючи метод лишків [85], після ряду елементарних перетворень остаточно отримуємо

$$E_{xi} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I \left[Q^{-1} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n Q^{-1})}{n} \cos \left[\frac{2\pi n}{T} \left(t - t_0 - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right], \quad (2.24)$$

де $t_0 = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} (h - z)$,

$Q = T/\tau$ – шпаруватість імпульсу.

Формула (2.24) справедлива для моментів часу $t > t_0$, тобто коли перший імпульс приходить в точку спостереження з координатою z (h – відстань від початку координат до джерела).

Розглянемо тепер задачу про проходження електромагнітного поля (2.24) в інкубаційну ємність з водою. Нехай поверхня води збігається з площиною XU (див. підрозділ 2.1). У напівпросторі $z > 0$ поверхневою щільністю струму (2.2), яка задана на площині $z = h$, збуджується поле (2.24). При зроблених вище припущеннях, задача полягає у визначенні поля, що пройшло через границю повітря - вода ($z = 0$).

Запишемо рівняння Максвелла в декартовій системі координат і застосуємо перетворення Лапласа за часовою змінною t . Тоді у напівпросторі $z > 0$ поле можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{E}_{x\dot{i}} &= \bar{E}_{x\dot{i}}^i + R e^{-k_{\dot{i}} z}, \\ \bar{H}_{y\dot{i}} &= -\frac{1}{\mu_0 p} \left(\frac{\partial \bar{E}_{x\dot{i}}^i}{\partial z} + \frac{\partial (R e^{-k_{\dot{i}} z})}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2.25)$$

де $\bar{E}_{x\dot{i}}^i$ – перетворення Лапласа для поля, яке збуджується поверхневим струмом за умови відсутності напівпростору з водою(2.21);

$$\bar{E}_{x\dot{i}}^i = \bar{F}(p) e^{k_{\dot{i}} z};$$

$$\bar{F}(p) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{2p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)} e^{-k_{\dot{i}} h};$$

R – амплітуда відбитої хвилі.

Поле, що пройшло у воду (напівпростір $z < 0$), повинно відповідати наступним рівнянням

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{E}_{x\hat{a}}}{\partial z} &= -p \mu_0 \bar{H}_{y\hat{a}}; \\ -\frac{\partial \bar{H}_{y\hat{a}}}{\partial z} &= (\varepsilon_{\hat{a}} \varepsilon_0 p + \sigma_{\hat{a}}) \bar{E}_{x\hat{a}}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

де $\varepsilon_{\hat{a}}$ – відносна діелектрична проникність води (2.1);

$\sigma_{\hat{a}}$ – питома провідність води.

На межі розділу середовищ ($z = 0$) тангенціальні компоненти поля повинні бути безперервними

$$\begin{aligned}\bar{E}_{x\hat{i}} \Big|_{z=0} &= \bar{E}_{x\hat{a}} \Big|_{z=0}, \\ \bar{H}_{y\hat{i}} \Big|_{z=0} &= \bar{H}_{y\hat{a}} \Big|_{z=0}.\end{aligned}\tag{2.27}$$

Виконуючи з (2.26) дії, аналогічні тим, що були зроблені з (2.14), маємо

$$\begin{aligned}\bar{E}_{x\hat{a}} &= \bar{T} e^{k_{\hat{a}} z}, \\ \bar{H}_{y\hat{a}} &= -\frac{k_{\hat{a}}}{\mu_0 p} \bar{T} e^{k_{\hat{a}} z},\end{aligned}\tag{2.28}$$

$$\text{де } k_{\hat{a}} = \sqrt{p^2 \varepsilon_{\hat{a}} \varepsilon_0 \mu_0 + p \sigma_{\hat{a}} \mu_0},$$

\bar{T} – амплітуда хвилі, що пройшла у воду.

У (2.29) враховано, що при $z \rightarrow -\infty$ поле повинно спадати, оскільки питома провідність $\sigma \neq 0$. \bar{T}

Підставляючи (2.25) і (2.28) в умови сполучення (2.27) визначаємо невідому амплітуду хвилі, що пройшла у воду. Після ряду перетворень отримуємо такі вирази для цього поля

$$\bar{E}_{x\hat{a}} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2) e^{k_{\hat{a}} z - k_{\hat{i}} h}}{\sqrt{p}(1 - e^{-p\tau})(p^2 + 16\pi^2 f^2) \left(\sqrt{p} + \sqrt{\varepsilon p + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}} \right)},\tag{2.29}$$

$$\bar{H}_{y\hat{a}} = \frac{\gamma_2 I (1 - e^{-p\tau}) (2p^2 + 16\pi^2 f^2) e^{k_{\hat{a}}z - k_{\hat{i}}h}}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} p^{3/2} (1 - e^{-pT}) (p^2 + 16\pi^2 f^2) \left(\sqrt{p} + \sqrt{\varepsilon p + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}} \right)}. \quad (2.30)$$

Якщо тепер застосувати до (2.29) зворотнє перетворення Лапласа, то отримаємо такий вираз для напруженості електричного поля у воді:

$$E_{x\hat{a}}(z, t) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{I}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{(1 - e^{-p\tau}) (2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{\sqrt{p} (1 - e^{-pT}) (p^2 + 16\pi^2 f^2)} \frac{e^{k_{\hat{a}}z - k_{\hat{i}}h}}{\left(\sqrt{p} + \sqrt{\varepsilon p + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}} \right)} dp. \quad (2.31)$$

де $a > 0$.

Отриманий вираз (2.29) для поля, що пройшло у воду, буде використано при розв'язанні задачі про взаємодію електромагнітних імпульсів з ікринками стерляді, що знаходяться у воді.

2.3. Взаємодія електромагнітних імпульсів з ікринками стерляді

Будемо шукати розв'язок для ікринок, розміри яких малі в порівнянні з довжиною падаючої хвилі. В цьому випадку поля всередині і поза них можна розкласти по малому параметру $\frac{l}{\lambda}$, де l – лінійні розміри тіла (її діаметр), λ – довжина розсіяної хвилі, і побудувати співвідношення для різних наближень внутрішніх полів.

У роботах [80, 81] запропонований метод вирішення для однорідних малих тіл, який дозволяє отримати досить прості вирази для внутрішніх і зовнішніх полів. Однак реальні біологічні об'єкти, що задовольняють вимозі $\frac{l}{\lambda} \ll 1$, зокрема, ікра стерляді, мають складну внутрішню структуру, яка

призводить до багатосаровості (в першому наближенні – двошаровості) (рис. 2.2). Отже знайдемо внутрішні поля в розсіювачах подібного типу.

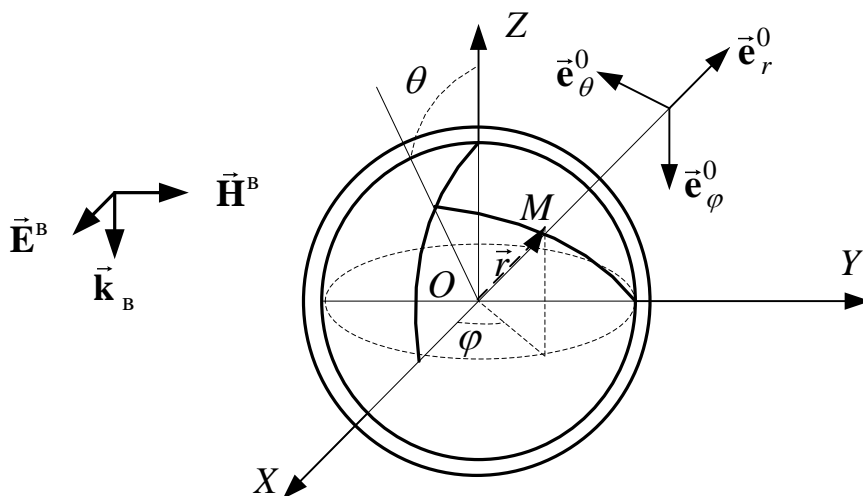


Рис. 2.2. Схема падіння електромагнітної хвилі на сферичну ікринку

Проведемо моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на малих двошарових тілах за допомогою рівнянь Максвелла в інтегральній формі, які автоматично враховують граничні умови на границі шарів і самого тіла з навколишнім середовищем, тобто водою [80, 81].

Позначаючи діелектричну і магнітну проникність води, у якій знаходяться ікринки, $\varepsilon_{\hat{a}}$ і $\mu_{\hat{a}} = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\tilde{A}l}{i}$, відповідно, використовуємо рівняння Максвелла для опису \vec{E} і \vec{H} складових ЕМП в усіх точках цього простору з урахуванням перерозсіяння цих полів на самих ікринках. При цьому будемо мати на увазі гармонійну залежність зазначених векторів від часу, пов'язану з появою множника $e^{i\omega t}$ [84]:

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{E}_{\hat{a}} + i\omega\mu_0\vec{H}_{\hat{a}} = 0; \\ \text{rot}\vec{H}_{\hat{a}} - i\omega\varepsilon_{\hat{a}}\vec{E}_{\hat{a}} = 0, \end{cases} \quad (2.32)$$

де i – уявна одиниця;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота випромінювання.

При визначенні полів, що діють на кожну ікринку, будемо їх розглядати у вигляді сфери, зовнішнім шаром якої є мембрана, а внутрішнім – саме тіло ікринки. Якщо перший зовнішній шар характеризується проникностями ε_1 і μ_0 , а другий – ε_2 і μ_0 , то у внутрішніх точках ікринки діелектрична проникність розглядається як функція координат і змінюється стрибкоподібно при переході від шару до шару. В принципі, вважаючи, що при переході від ікринки до оточуючої її води діелектрична проникність стрибкоподібно змінюється від ε_1 до $\varepsilon_{\hat{a}}$, рівняння (2.32) можна розглядати як такі, що описують не тільки всю інкубаційну ємність з водою, але і сам розсіюючий об'єкт. При цьому всередині ікринки електромагнітне поле буде задовольняти рівнянням [84]

$$\begin{cases} \mathbf{rot}\vec{\mathbf{E}} + i\omega\mu_0\vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{0}}; \\ \mathbf{rot}\vec{\mathbf{H}} - i\omega\varepsilon_{\hat{a}}\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{g}}, \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\text{де } \vec{\mathbf{g}} = i\omega(\varepsilon - \varepsilon_{\hat{a}})\vec{\mathbf{E}}.$$

За допомогою найпростіших перетворень рівняння системи (2.33) можна записати у вигляді диференціальних рівнянь другого порядку, що залежать тільки від однієї змінної $\vec{\mathbf{E}}$ або $\vec{\mathbf{H}}$ [84]:

$$\begin{cases} \mathbf{graddiv}\vec{\mathbf{E}} - \Delta\vec{\mathbf{E}} - k_{\hat{a}}^2\vec{\mathbf{E}} = -i\omega\mu_0\vec{\mathbf{g}}; \\ \mathbf{graddiv}\vec{\mathbf{H}} - \Delta\vec{\mathbf{H}} - k_{\hat{a}}^2\vec{\mathbf{H}} = \mathbf{rot}\vec{\mathbf{g}}, \end{cases} \quad (2.34)$$

де $k_{\hat{a}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\hat{a}}}$ – хвильове число у воді навколо ікринки.

Введемо електричний потенціал Герца [84]:

$$\vec{\mathbf{I}}^{\hat{a}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}}) f(|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|) d\vec{\mathbf{r}}, \quad (2.35)$$

$$\text{де } f(|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|) = \frac{e^{-ik_{\hat{a}}|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|}}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|},$$

$\vec{\mathbf{r}}$ и $\vec{\mathbf{r}}'$ – радіус-вектори зовнішніх і внутрішніх точок ікринки, відповідно.

У цьому разі вирази для розсіяних на ікринці полів можна представити таким чином [84]:

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}(\vec{\mathbf{r}}) + (\mathbf{graddiv} + k_{\hat{a}}^2) \vec{\mathbf{I}}^{\hat{y}}; \\ \vec{\mathbf{H}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}(\vec{\mathbf{r}}) + i\omega\varepsilon_{\hat{a}} \mathbf{rot} \vec{\mathbf{I}}^{\hat{y}}, \end{cases} \quad (2.36)$$

Інтегралі, що визначають $\vec{\mathbf{I}}^{\hat{a}}$ в (2.35) і (2.36), поширюються на весь об'єм V , який займає ікринка.

Сенс полів, що стоять зліва в виразах (2.36), залежить від положення точки $\vec{\mathbf{r}}$. Якщо ця точка знаходиться всередині об'єму ікринки V , то поля, що стоять зліва, являють собою поля в її тілі, тобто це ті ж поля, що і входять до виразу для потенціалу Герца (2.35). У цьому випадку (2.36) являє собою не що інше, як лінійні неоднорідні інтегральні рівняння, що визначають електромагнітне поле всередині розсіювача з діелектричною та магнітною проникності ε і μ_0 . Якщо ж точка $\vec{\mathbf{r}}$ лежить поза області V , то (2.36) є рівностями, що визначають повне поле поза ікринкою через незбуджене поле $\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}(\vec{\mathbf{r}})$, $\vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}(\vec{\mathbf{r}})$ (перший доданок) і розсіяне поле (другий доданок).

Як вже було сказано вище, моделювання електромагнітних полів всередині ікринки буде проведено з урахуванням її малості в порівнянні з довжиною падаючого електромагнітного випромінювання. Отже, розкладаючи вирази для складових електричного $\vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}})$ і магнітного поля $\vec{\mathbf{H}}(\vec{\mathbf{r}})$, а також функції $e^{-ik_{\hat{a}}|\vec{\mathbf{r}}-\vec{\mathbf{r}}'|}$ в степеневий ряд по параметру малості $\frac{l}{\lambda}$, систему (2.36) можна записати в такий спосіб [81]

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{E}}^{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{E}}^{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + \\ + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots + \frac{1}{4\pi}(\mathbf{grad div} + k_{\hat{a}}^2) \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \left[\vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + \right. \\ \left. + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{E}}^{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{E}}^{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots \right] \left[\frac{1}{|\vec{\mathbf{r}}-\vec{\mathbf{r}}'|} - ik_{\hat{a}} - \frac{k_{\hat{a}}^2}{2}|\vec{\mathbf{r}}-\vec{\mathbf{r}}'| + \dots \right] d\vec{\mathbf{r}}'; \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{H}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{H}}^{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{H}}^{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots = \vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}^{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + \\ + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}^{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots + \frac{i\omega\varepsilon_{\hat{a}}}{4\pi} \mathbf{rot} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \left[\vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + \right. \\ \left. + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{E}}^{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{E}}^{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots \right] \left[\frac{1}{|\vec{\mathbf{r}}-\vec{\mathbf{r}}'|} - ik_{\hat{a}} - \frac{k_{\hat{a}}^2}{2}|\vec{\mathbf{r}}-\vec{\mathbf{r}}'| + \dots \right] d\vec{\mathbf{r}}'. \end{aligned} \quad (2.38)$$

У виразах (2.37), (2.38) верхні індекси у складових електричного і магнітного поля вказують на ступінь наближення, з якими ці складові знаходяться.

Очевидно, що дані рівності будуть виконуватися в тому випадку, коли коефіцієнти при рівних ступенях $(ik_{\hat{a}})$ будуть рівні між собою. Оскільки в нашому випадку розміри ікринки значно менші довжини падаючої на неї електромагнітної хвилі, можна обмежитися нульовим наближенням:

$$\begin{aligned}\vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) &= \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + \frac{1}{4\pi} \mathbf{grad} \operatorname{div} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{\mathbf{a}}}} - 1 \right) \vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}') \frac{1}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|} d\vec{\mathbf{r}}'; \\ \vec{\mathbf{H}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) &= \vec{\mathbf{H}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}).\end{aligned}\quad (2.39)$$

Ґрунтуючись на відомих співвідношеннях з теорії поля [86, 87], а також на тому, що для диференціальних операторів координата $\vec{\mathbf{r}}'$ і вирази, що містять її, являються константами, рівності (2.39) можна перетворити в такий спосіб:

$$\begin{aligned}\vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) &= \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{\mathbf{a}}}} - 1 \right) \vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}') \cdot \mathbf{grad} \right) \mathbf{grad} \frac{1}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|} d\vec{\mathbf{r}}'; \\ \vec{\mathbf{H}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) &= \vec{\mathbf{H}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}).\end{aligned}\quad (2.40)$$

Беручи до уваги, що падаюча хвиля може бути представлена у вигляді:

$$\vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}} e^{-ik_{\hat{\mathbf{a}}}|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|}, \quad (2.41)$$

розкладемо експонентний множник в степеневий ряд по параметру малості $\frac{l}{\lambda}$ [88]. Оскільки прийняте нами нульове наближення визначається першою складовою цього розкладання, яке дорівнює одиниці, отримуємо, що

$$\vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}. \quad (2.42)$$

Провівши аналогічні міркування для $\vec{\mathbf{H}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}})$, отримаємо, що нульове наближення для внутрішнього магнітного поля також константа, тобто

$$\vec{\mathbf{H}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{H}}_{\hat{\mathbf{a}}}, \quad (2.43)$$

але воно, на відміну від електричної складової, більше ні від чого не залежить і ніяк не пов'язане ні з розмірами тіла, ні з його електромагнітними характеристиками. Таким чином, слід розглядати лише розв'язання першого рівняння з (2.40) для електричної складової електромагнітного поля. При цьому слід відзначити, що у якості $\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}$ і $\vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}$ слід брати вирази, отримані у розрахунках попереднього п. 2.2.

Після нескладних перетворень [89] це рівняння набуває вигляду:

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) - \frac{1}{4\pi} \left(\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) \cdot \mathbf{grad} \right) \mathbf{grad} \int_V \frac{-d\vec{\mathbf{r}}}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|} = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}). \quad (2.44)$$

Оскільки рівняння (2.44) є векторним, то воно розпадається на три скалярних рівняння для кожної координати:

$$\begin{cases} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \right] E_x^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_y^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_z^{(0)} = E_{x\hat{a}}^{(0)}; \\ \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_x^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \right] E_y^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_z^{(0)} = E_{y\hat{a}}^{(0)}; \\ \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_x^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_y^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \right] E_z^{(0)} = E_{z\hat{a}}^{(0)}. \end{cases} \quad (2.45)$$

Як показано у попередньому підрозділі, вважається, що електромагнітне поле у повітрі і у воді має лише дві компоненти – $E_{x\hat{i}}$, $H_{y\hat{i}}$ та $E_{x\hat{a}}$, $H_{y\hat{a}}$. Тому остаточно система (2.45) записується наступним чином:

$$\begin{cases}
\left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right)\right] E_x^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_y^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_z^{(0)} = E_{x\hat{a}}^{(0)}; \\
\frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_x^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right)\right] E_y^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_z^{(0)} = 0; \\
\frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_x^{(0)} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} E_y^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right)\right] E_z^{(0)} = 0.
\end{cases} \quad (2.46)$$

Оскільки визначник даної системи (2.46) не дорівнює нулю, то система не вироджена і має єдине рішення. Використовуючи метод Крамера [89] дане рішення можна отримати у вигляді:

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)} = \frac{A}{\Delta} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(0)}; \quad \vec{\mathbf{H}}^{(0)} = \vec{\mathbf{H}}_{\hat{a}}^{(0)}, \quad (2.47)$$

де A – матриця, що дорівнює:

$$\left\| \begin{array}{ccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{array} \right\|; \quad (2.48)$$

Δ – визначник системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2.45):

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) & \frac{\varepsilon}{3\varepsilon_{\hat{a}}} & \frac{\varepsilon}{3\varepsilon_{\hat{a}}} \\ \frac{\varepsilon}{3\varepsilon_{\hat{a}}} & 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) & \frac{\varepsilon}{3\varepsilon_{\hat{a}}} \\ \frac{\varepsilon}{3\varepsilon_{\hat{a}}} & \frac{\varepsilon}{3\varepsilon_{\hat{a}}} & 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \end{vmatrix} \quad (2.49)$$

Елементи матриці A визначаються виразами:

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = \frac{4}{9} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} + 1 \right); \quad (2.50)$$

$$a_{12} = a_{13} = a_{21} = a_{23} = a_{31} = a_{32} = -\frac{2\varepsilon}{9\varepsilon_{\hat{a}}}$$

Вирази (2.47) - (2.50) дозволяють знайти внутрішні електромагнітні поля всередині ікринки в тому випадку, якщо вважати її однорідною. Однак наявність мембрани, що оточує ікринки, викликає необхідність розгляду, принаймні, двошарової моделі. Оскільки в першому шарі буде присутнє не тільки ЕМП, що проникло ззовні і яке можна визначити за допомогою зазначених вище виразів, але і розсіяне другим внутрішнім шаром, то необхідно знайти величину цього розсіяного поля.

2.4 Визначення електромагнітного поля, розсіяного на ікринці, з урахуванням її двошаровості

У п. 2.3 показано, що розсіяні на ікринках електромагнітні поля можуть бути описані за допомогою потенціалів Герца (2.35). При цьому слід мати на увазі, що аналогічно задачі про знаходження внутрішніх полів, цю задачу також слід вирішувати з урахуванням співвідношення $\frac{l}{\lambda} \ll 1$.

Розкладаючи потенціал Герца в степеневий ряд по параметру малості $\frac{l}{\lambda}$

$$\vec{\mathbf{I}}^{\hat{a}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{I}}^{\hat{a}}_{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})\vec{\mathbf{I}}^{\hat{a}}_{(1)}(\vec{\mathbf{r}}) + (ik_{\hat{a}})^2\vec{\mathbf{I}}^{\hat{a}}_{(2)}(\vec{\mathbf{r}}) + \dots \quad (2.51)$$

та використовуючи аналогічне розкладання для амплітуди електричної складової ЕМП, з (2.35) отримуємо з урахуванням (2.47) наступне співвідношення [90]:

$$\vec{\mathbf{I}}_{(0)}^{\hat{a}}(\vec{\mathbf{r}}) = \frac{A}{2\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(0)} \left(R^2 - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{3} \right). \quad (2.52)$$

де R – радіус ікринки;

x, y, z – координати тіла ікринки відносно її центра.

Щоб отримати нульове наближення для відбитого від внутрішньої частини ікринки ЕМП підставимо (2.52) в (2.36). Таким чином, електрична складова електромагнітного поля буде мати вигляд:

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(0)} + \frac{A}{2\pi\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) P \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}}^{(0)} \left(\frac{2}{R} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R^3} \right), \quad (2.53)$$

Де

$$P = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_{\hat{a}}^2 & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_{\hat{a}}^2 & \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_{\hat{a}}^2 \end{vmatrix}. \quad (2.54)$$

Вираз (2.53) визначає ту частину електричної складової поля всередині мембрани ікринки, яка відбивається від його внутрішньої частини. Отже, в мембрані (шар 1) поле буде містити два доданки: те поле, що прийшло зовні з води $\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}\hat{a}}^{(0)1}$ і відбите від внутрішньої частини ікринки $\vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}\hat{a}}^{(0)1}$, тобто

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)1} = \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}\hat{a}}^{(0)1} + \vec{\mathbf{E}}_{\hat{a}\hat{a}}^{(0)1}. \quad (2.55)$$

У тілі ікринки (шар 2) електрична складова буде визначатися полем, яке пройшли крізь мембрану (шар 1):

$$\vec{E}^{(0)2} = \vec{E}_{i\hat{a}\hat{a}}^{(0)2}. \quad (2.56)$$

Зазначений підхід у визначенні електромагнітних полів всередині ікринки веде до системи з двох рівнянь, невідомими величинами в яких будуть напруженості електричного поля в кожному з шарів.

Щоб знайти величини $\vec{E}_{i\hat{a}\hat{a}}^{(0)1}$ і $\vec{E}_{i\hat{a}\hat{a}}^{(0)2}$ скористаємося виразом (2.47).

Отримуємо:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{i\hat{a}\hat{a}}^{(0)1} &= \frac{A_1}{\Delta_1} \vec{E}_{\hat{a}}^{(0)}, \\ \vec{E}_{i\hat{a}\hat{a}}^{(0)2} &= \frac{A_2}{\Delta_2} \vec{E}^{(0)1}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Для визначення в даних рівностях A_1 , необхідно в (2.48) і (2.50) в якості R взяти радіус ікринки з урахуванням її мембрани, тобто R_1 ; \mathcal{E} поміняти на ε_1 . Для A_2 замість \mathcal{E} необхідно підставити ε_2 , а замість R – радіус тіла ікринки R_2 без урахування її мембрани. Аналогічні заміни виконуються в (2.49) для отримання Δ_1 і Δ_2 .

Щоб знайти $\vec{E}_{\hat{a}\hat{z}\hat{a}}^{(0)1}$ скористаємося виразом (2.53). Тоді:

$$\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{E}_{\hat{a}}^{(0)} + \frac{A}{2\pi\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\hat{a}}} - 1 \right) P \vec{E}_{\hat{a}}^{(0)} \left(\frac{2}{R_2} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R_2^3} \right), \quad (2.58)$$

Підстановка (2.56) - (2.57) у (2.54) - (2.55) приводить до лінійної системи з двох алгебраїчних рівнянь з двома невідомими $\vec{E}^{(0)1}$, $\vec{E}^{(0)2}$:

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{E}}^{(0)1} = \frac{A_1}{\Delta_1} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)} + \frac{A_2}{2\pi\Delta_2} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1 \right) P \vec{\mathbf{E}}^{(0)1} \left(\frac{2}{R_2} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R_2^3} \right); \\ \vec{\mathbf{E}}^{(0)2} = \frac{A_2}{\Delta_2} \vec{\mathbf{E}}^{(0)1}. \end{cases} \quad (2.59)$$

Розв'язок системи (2.59) легко знайти, якщо значення $\vec{\mathbf{E}}^{(0)1}$ з першого рівняння підставити у друге.

Позначимо для стислості матрицю:

$$\hat{\mathbf{E}} - \frac{A_2}{2\pi\Delta_2} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1 \right) P \left(\frac{1}{R_2} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R_2^3} \right) = B_1 \quad (2.60)$$

де $\hat{\mathbf{E}}$ – одинична матриця того ж порядку, що і A_2 .

Тоді з першого рівняння системи (2.59)

$$B_1 \vec{\mathbf{E}}^{(0)1} = \frac{A_1}{\Delta_1} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}$$

випливає, що

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)1} = B_1^{-1} \frac{A_1}{\Delta_1} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}. \quad (2.61)$$

З другого рівняння

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)2} = \frac{A_2}{\Delta_2} \vec{\mathbf{E}}^{(0)1}$$

маємо:

$$\vec{\mathbf{E}}^{(0)2} = \frac{A_2}{\Delta_2} B_1^{-1} \frac{A_1}{\Delta_1} \vec{\mathbf{E}}_{\hat{\mathbf{a}}}^{(0)}. \quad (2.62)$$

Тут B_1^{-1} – матриця, зворотна матриці B_1 . Результати отримані з використанням методу розв'язання матричних рівнянь [89].

Отримані вирази (2.29), (2.30) дозволяють обчислити наведені на ікринці стерляді електромагнітні поля і оцінити їх вплив на її стан. На закінчення слід відзначити, що обчислення виразів (2.61) та (2.62) виконується з урахуванням того, що

$$\vec{E}_{\hat{a}}^{(0)} = \{E_{x\hat{a}}^{(0)}, 0, 0\},$$

а $E_{x\hat{a}}^{(0)}$ визначається з (2.31).

2.5 Розрахунок впливу імпульсного електромагнітного поля на процеси в ікринці

Отримані в попередніх підрозділах даного розділу аналітичні вирази про розподіл електромагнітних полів, як всередині інкубаційної ємності з водою, так і всередині самої ікринки, дозволяють проаналізувати результати їх впливу на розвиток зародків риби.

З'ясуємо, перш за все, до чого призводить поява зовнішнього електромагнітного поля, що падає на ікринки стерляді. З цією метою були використані співвідношення (2.61) і (2.62), щоб знайти напруженості наведених на ікринку електромагнітних полів з урахуванням її двошаровості. Для оцінки таких параметрів електромагнітного опромінення, як шпаруватість і частота заповнення спочатку припускалось, що амплітуда поля опромінення $|\vec{E}_0|$ дорівнює одиниці. При розрахунках радіус зовнішнього розміру ікринки брався рівним $R_1 = 1 \text{ } \mu\text{m}$, внутрішнього розміру – $R_2 = 0,9 \text{ } \mu\text{m}$ [2, 91]. Товщина мембрани бралася рівною $0,1 \text{ мм}$.

Враховуючи те, що інкубаційна ємність опромінюється електромагнітними імпульсами, надалі замість величини $\vec{E}^{(0)2}$ (2.62), саме від якої залежать процеси,

що відбуваються у тілі ікринки під дією електромагнітного поля, була введена усереднена характеристика напруженості електричного поля, а саме

$$\left| \vec{\mathbf{E}}_{\text{н\ddot{a}o}}^{(0)2} \right| = \frac{1}{\tau V} \int_{t_0}^{t_0+\tau} dt \int_D \left| \vec{\mathbf{E}}^{(0)2} \right| dV, \quad (2.63)$$

де $t_0 = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} h + \sqrt{\varepsilon_{\hat{a}} \varepsilon_0 \mu_0} h_{\hat{a}}$ – час, за який імпульс доходить до області D , що відповідає об'єму ікринки; τ – тривалість імпульсу; V – об'єм області D ;

$h_{\hat{a}}$ – глиби-на положення ікринки у воді.

З допомогою (2.63) були проведені чисельні розрахунки по визначенню оптимальних параметрів електромагнітного імпульсного сигналу, при яких середнє значення напруженості електричного поля усередині ікринки досягає максимального значення.

З'ясуємо, якою повинна бути довжина імпульсу. Як відомо [91, 92], вона визначається із співвідношення

$$\tau = \frac{\dot{I}}{f_{\zeta}} \quad (2.64)$$

Величина M для існуючих імпульсних генераторів лежить в межах $500 \leq M \leq 1500$ [92]. Підставляючи M в (2.64), отримаємо, що тривалість імпульсу може змінюватися в межах $0,5 \cdot 10^{-7} \text{ c} \leq \tau \leq 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ c}$.

Була досліджена залежність $\left| \vec{\mathbf{E}}_{\text{н\ddot{a}o}}^{(0)2} \right|$ від шпаруватості імпульсу $Q = \frac{T}{\tau}$.

Тривалість імпульсу бралась рівною $\tau = 100 \text{ } \dot{I} \tilde{n}$. Величина $\left| \vec{\mathbf{E}}_{\text{н\ddot{a}o}}^{(0)2} \right|$ нормувалась на величину $\left| \vec{\mathbf{E}}^{(0)2} \right|$.

Під час розрахунків значення відносної діелектричної проникності брались з урахуванням структури ікринки [2]. Тіло ікринки, яке лежить у діапазоні [0–0,9 мм], характеризується відносною проникністю $17,6+29i$, мембрані, яка оточує ікринку, відповідає відносна проникність $3,1+1,1i$ [82, 83]. Відносна магнітна проникність усіх верств дорівнює 1. Відносна комплексна діелектрична проникність ґрунту бралась відповідно до виразу (2.1). Крім того, передбачалося, що відстань від антени, що випромінює імпульсне електромагнітне поле (площина розкриву), до поверхні води h змінювалась у межах $h=0,3 \div 0,4$ м, а глибина, на якій розміщувались ікринки – $h_a=0,015 \text{ м} \div 0,02 \text{ м}$.

На рис. 2.3 представлені результати проведених розрахунків амплітуди електричного поля всередині тіла ікринки в залежності від шпаруватості імпульсів. Розрахунки проводились для різних відстаней площини розкриву антени до поверхні води в інкубаційній ємності.

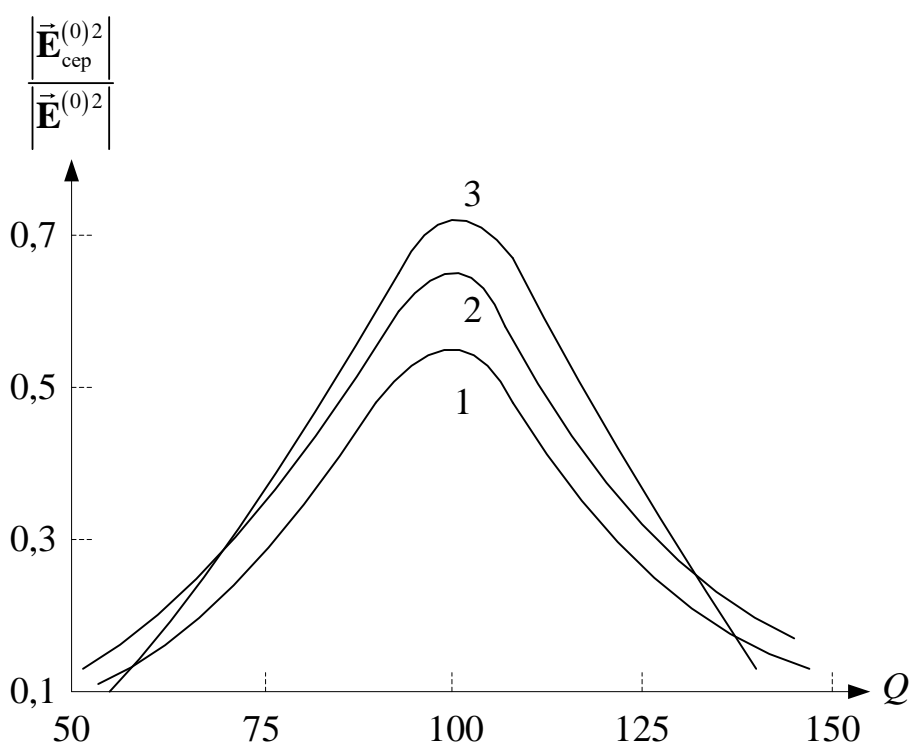


Рис. 2.3. Залежності середнього значення напруженості електричного поля в тілі ікринки від шпаруватості імпульсу для різних відстаней площини антени до поверхні води: 1 – $h=0,3$ м ; 2 – $h=0,4$ м ; 3 – $h=0,35$ м

Як впливає з аналізу результатів розрахунків, оптимальне значення шпаруватості електромагнітного імпульсу $Q = \frac{T}{\tau}$ відповідає значенню $Q = 100$. При цьому значенні шпаруватості реалізується максимум середнього значення напруженості електричного поля всередині ікринки. Крім того, найбільш оптимальною відстанню від антени до води є $h = 0,35 \lambda$.

Отже, оскільки шпаруватість імпульсу повинна бути ≈ 100 , то легко отримати, що період повторення імпульсів повинен змінюватися в межах:

$$0,5 \cdot 10^{-5} \leq T \leq 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (2.65)$$

Дослідимо тепер залежність середнього значення напруженості електричного поля (2.62) від частоти f_c заповнення радіоімпульсів (2.64)). Будемо припускати, що область D , по якій проводиться усереднення електричного поля, збігається з областю, заповненою однією ікринкою. Відносна комплексна діелектрична проникність води визначається виразом (2.1), а сама ікринка знаходиться на глибині $h = 0,15 \lambda$. Шпаруватість електромагнітного імпульсу $Q = 100$, а його тривалість – $\tau = 100$ нс. Частота заповнення імпульсу змінювалася в межах $f = 9 \dots 11 \text{ ГГц}$. Висота розташування випромінюючої антени така ж як при розрахунках електричного поля при зміні шпаруватості. Результати розрахунків представлені на рис. 2.4.

Як видно з рис. 2.4 для тіла ікринки оптимальне значення частоти заповнення радіоімпульсу становить $f = 10 \text{ ГГц}$. При цій величині частоти середнє значення напруженості електричного поля приймає максимальне значення всередині ікринки.

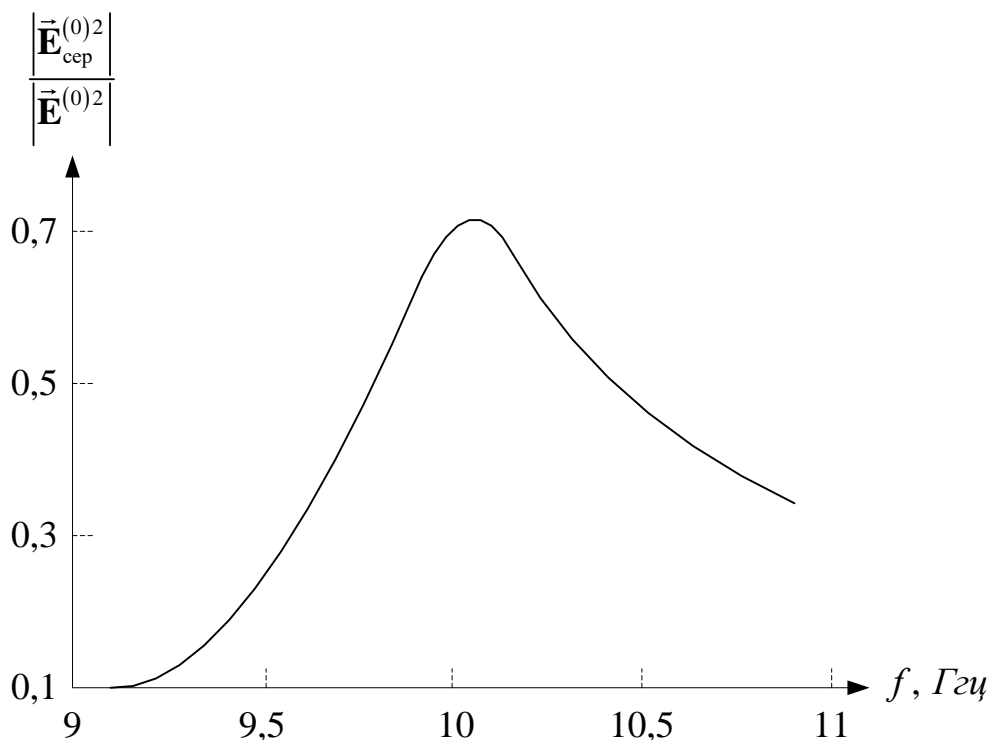


Рис. 2.4. Залежність середнього значення напруженості електричного поля в тілі іскринки від частоти заповнення імпульсу

Проведені розрахунки показують, що в залежності від шпаруватості імпульсів електромагнітного опромінення інкубаційної ємності з ікровою стерляді, частоти заповнення цих імпульсів, а також від розміщення опромінюючої антени над поверхнею води значення відношення $\left| \frac{\vec{E}_{\text{наб}}^{(0)2}}{\vec{E}_0} \right|$ можна довести до величини 0,6...0,7.

При цьому шпаруватість повинна бути порядку $Q \approx 100$, а частота заповнення імпульсів f_{ζ} лежати поблизу 10 ГГц.

Після визначення Q і f_{ζ} було проведено розрахунок оптимальної амплітуди електричної складової випроміненого антеною поля, яке буде надавати позитивний інформаційний вплив на розвиток ікри.

Як відомо [93, 94], підвищення життєздатності ікри базується на збільшенні рухомості іонів завдяки імпульсному ЕМП. При цьому слід мати на увазі, що сумарний потенціал як на мембранах внутрішніх клітин, так і на зовнішній

мембрані ікринки не повинен перевищувати 100 мВ [82]. Значне перевищення цієї величини спричинить пробій мембран і загибель ікри.

Оскільки величина потенціалу на мембранах клітин всередині ікринки, а також на її зовнішній оболонці буде зростати від початку опромінення, за початкове значення амплітуди електричної складової в тілі ікринки було взяте таке, що відповідає потенціалу на мембранах, який дорівнює 60 мВ [82]. Проведені розрахунки на основі виразів (2.31), (2.61), (2.62), (2.63) з урахуванням розмірів ікринки, а також її електрофізичних параметрів дали результат для напруженості електричної складової опромінення $|\vec{E}_0|$, що дорівнює 49 В/м. Із рис. 2.3, 2.4 витікає, що $|\vec{E}_0|$ має бути рівним 70 В/м, а величина потужності імпульсів становить 160 Вт.

Напруженість електричного поля джерела електромагнітного випромінювання може бути визначена із співвідношення [95]

$$|\vec{E}_0| = K \frac{I \tau}{16 \pi f_s T}, \quad (2.64)$$

де $\hat{E} = 4,4 \cdot 10^{13} \frac{\hat{I} \cdot \tau}{\tilde{n}}$; I – амплітуда імпульсу струму (2.2), (2.3); τ – довжина імпульсу (2.63); T – період повторення імпульсів; f_s – частота заповнення імпульсів.

Вираз (2.63) дає можливість по відомій величині $|\vec{E}_0|$ знайти амплітуду імпульсу струму, а отже і розрахувати параметри самої антени для опромінення інкубаційної ємності з ікрою стерляді. Обчислення дали значення $I = 80 \frac{a}{i^2}$. Проведені розрахунки показали, що для оптимальної відстані антени від поверхні води вона може опромінювати площу у 900 см², яку займає ікра стерляді у інкубаційній ємності.

Маючи параметри поля опромінення інкубаційної ємності, такі, як амплітуда, відстань від поверхні води, шпаруватість, частота заповнення імпульсу, необхідно було провести обчислення величина експозиції для впливу електромагнітного випромінювання на ікру стерляді. Це пов'язано з тим, що сумарний потенціал на мембрані біологічних клітин і самої ікринки з часом буде збільшуватись, але не повинен перевищувати величину в 100 мВ.

Для знаходження величини експозиції впливу електромагнітного випромінювання на ікру стерляді скористаємось виразом [94]:

$$\varphi_1^2 = \varphi_0^2 + Pt \frac{C_0 V_0 q^2 C_s}{(4\pi \varepsilon_m \varepsilon_0 d)^2} e^{-\frac{F \varphi_0}{RT}} + P \frac{q C_s}{4\pi \varepsilon_m \varepsilon_0 \omega} \left| \vec{E}_{\text{н\`а\`д}}^{(0)2} \right| \sin(\omega t + \psi) \quad (2.65)$$

де φ_1 – наведений потенціал за час t ;

φ_0 – потенціал на мембрані в початковий момент часу;

P – проникність мембрани;

t – час впливу ЕМП на ікру;

C_0, C_s – концентрація іонів всередині і поза внутрішніх клітин;

V_0 – об'єм клітини в початковий момент часу;

q – заряд іона;

ε_0 – електрична постійна;

ε_m – відносна діелектрична постійна мембрани;

d – товщина мембрани;

F – число Фарадея;

R – газова постійна;

$\left| \vec{E}_{\text{н\`а\`д}}^{(0)2} \right|$ – середнє значення амплітуди напруженості електричного поля всередині клітини;

ω – кутова частота заповнення імпульсів;

ψ – запізнювання НВЧ імпульсу щодо імпульсу струму живлення.

де φ_i – наведений потенціал за час t ;

φ_0 – потенціал на мембрані в початковий момент часу;

P – проникність мембрани;

t – час впливу ЕМП на ікру;

C_0, C_s – концентрація іонів всередині і поза внутрішніх клітин;

V_0 – об'єм клітини в початковий момент часу;

q – заряд іона;

ε_0 – електрична постійна;

ε_m – відносна діелектрична постійна мембрани;

d – товщина мембрани;

F – число Фарадея;

R – газова постійна;

$|\vec{E}_{\text{нао}}^{(0)2}|$ – середнє значення амплітуди напруженості електричного поля

всередині клітини;

ω – кутова частота заповнення імпульсів;

ψ – запізнювання НВЧ імпульсу щодо імпульсу струму живлення.

Співвідношення (2.65) дозволяє визначити експозицію опромінення ікри, при якій мембранний потенціал не перевищуватиме 100 мВ. З цією метою було побудовано графік залежності φ_i від t (рис. 2.5). Для розрахунків були використані дані, взяті з літературних джерел [82, 91, 93]:

$$\varepsilon_m = 3,1; d = 10^{-8} \text{ м}; f = 10,0 \text{ ГГц}; C_s = 6,4 \frac{\hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{e} \hat{i}}{\hat{i}^3}; q = 4 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}; P = 0,8 \cdot 10^{-3} \frac{\hat{i}^3}{\hat{n}};$$

$$V_0 = 0,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3; F = 96484,56 \frac{\hat{E} \hat{e}}{\hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{e} \hat{i}}; C_0 = 4,0 \frac{\hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{e} \hat{i} \hat{e} \hat{i}}{\hat{i}^3}; R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}; T = 300^0 \text{ К};$$

$$\varphi_0 = 60 \hat{i} \hat{A}.$$

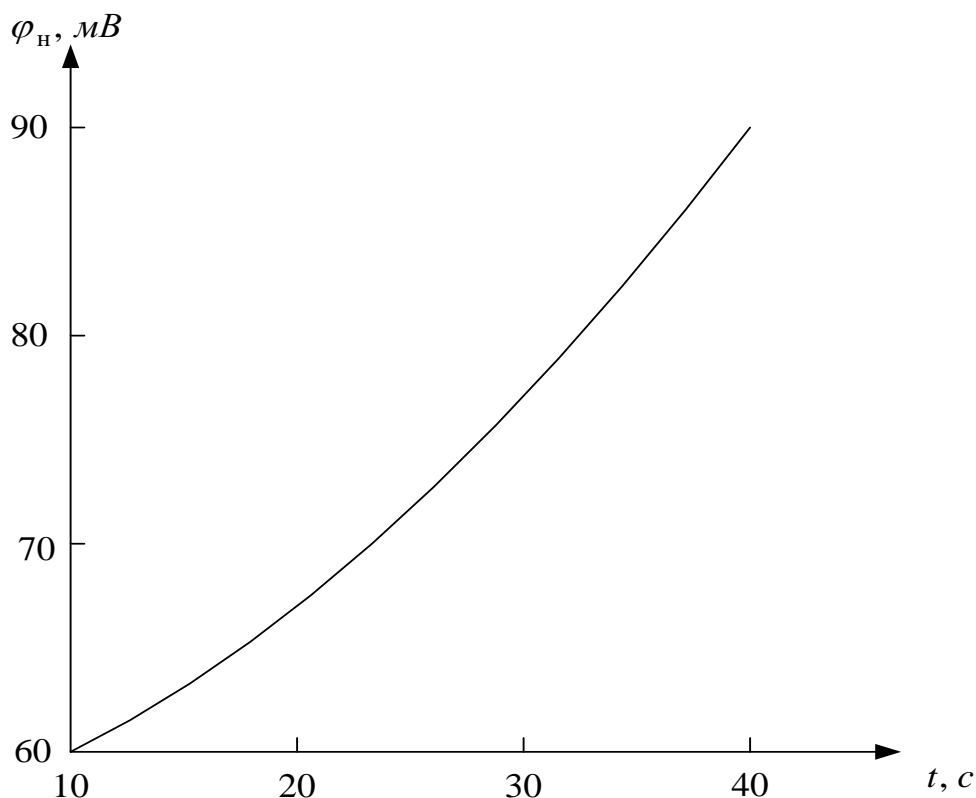


Рис. 2.5. Залежність наведеного на мембрані потенціалу від експозиції

В результаті розрахунків було встановлено (рис. 2.5), що для сумарного потенціалу величиною 90 мВ експозиція впливу імпульсного випромінювання на ікру стерляді становить 30 с. Таким чином, для досягнення максимально

Висновки по розділу

1. Показано, що представлена в розділі модель розсіяння електромагнітного імпульсного випромінювання, яка використовує наближення квазістатички, на ікринках стерляді в інкубаційній ємності дає можливість визначити всі параметри цього випромінювання для знаходження оптимального позитивного впливу на розвиток ікри.

2. Теоретичний аналіз розробленої моделі показав, що для підвищення продуктивності ікри необхідно інкубаційну ємність опромінювати імпульсним електромагнітним полем з такими параметрами: тривалість імпульсу дорівнює

$\tau = 100 \text{ í } \tilde{n}$; шпаруватість імпульсів – 100; потужність джерела випромінювання не менше 160 *Bm*; частота заповнення імпульсів 10 *ГГц*; висота антени над поверхнею води – 0,35 *м*; час експозиції 25...35 *с*.

РАЗДЕЛ 3

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛА САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕПРОДУКТИВНОСТІ ОСЕТРОВИХ РИБ

3.1 Обґрунтування структурної схеми радіоімпульсного джерела

Проведений теоретичний аналіз показав, що для підвищення репродуктивності осетрових риб необхідні радіоімпульсні генератори з вихідною потужністю до 160 Вт.

Як показано в п. 1.5, для виконання вимог щодо вихідної потужності в генераторах для підвищення репродуктивності осетрових риб слід застосовувати розгалужену систему підсумовування потужностей (рис. 3.1) [96].

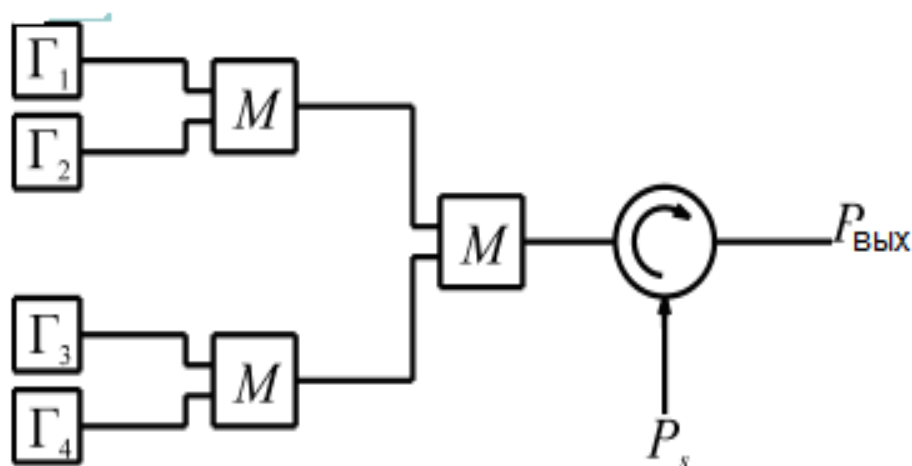


Рис. 3.1. Розгалужена схема каскадного підсумовування потужностей генераторів у $E - H$ мостах (M) в режимі синхронізації зовнішнім сигналом

Основними параметрами, що визначають ефективність каскадного підсумовування потужності діодів ϵ : тип і кількість діодів; ККД підсумовування потужностей; число каскадів розгалуженого суматора.

Коефіцієнт корисної дії суматора визначимо з виразу

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\text{АЕ}\ddot{\text{O}}}}{N \cdot P_i}, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{АЕ}\ddot{\text{O}}}$ – необхідна імпульсна потужність на виході суматора;

N – число діодів; P_i – номінальна імпульсна потужність діода.

Число каскадів розгалуженого суматора потужності знаходимо з рівняння

$$P_{\text{АЕ}\ddot{\text{O}}} = P_i \cdot 2^k \cdot L^k, \quad (3.2)$$

де k – число каскадів розгалуженого суматора;

L – втрати на одному суматорі.

Число діодів в одному каскаді буде визначатися виразом

$$n = \frac{N}{k}. \quad (3.3)$$

Експериментальні розробки розгалужених суматорів потужності виявили їх основні особливості [97, 98]:

- найефективніше дані суматори використовуються в режимі зовнішньої синхронізації; ККД підсумовування зменшується при збільшенні числа каскадів, що сумуються.

У зв'язку з цим для досягнення високих рівнів потужності і ККД джерел НВЧ-випромінювань великий сенс набуває поєднання методів каскадного підсумовування діодів в єдиній електродинамічній системі з методами підсумовування в розгалужених системах. Такі суматори ефективні в режимі зовнішньої синхронізації при максимальній щільності монтажу діодів, мінімальних габаритах, допустимому тепловому режимі [99].

Можливості створення потужних джерел імпульсного випромінювання залежать від наявності відповідних напівпровідникових приладів і схеми підсумовування

[100]. Вибираємо корпусовані ЛПД з параметрами: діапазон частот 9 – 11 ГГц; імпульсна потужність 18 Вт; імпульсний струм 25 А; імпульсна потужність 160 Вт; $\tau_i = 100$ нс, $Q=100$; параметри корпусу: $C_k = 0,3$ нФ, $L_k = 0,4$ нГн, $C = 0,25$ нФ.

Кількість діодів, необхідних для отримання на виході суматора потужності 160 Вт, знаходимо з виразу (3.1), приймаючи $\eta_\Sigma = 0,55$:

$$N \geq P_{\text{в\`ид}} / \eta_\Sigma P_{\text{в\`ид}} = 160 / 0,55 \times 18 \approx 16. \quad (3.4)$$

Обираємо діод типу 3A750B.

Число каскадів, отримане з виразу (3.2), дорівнює 2, для величини втрат $L=0,2$ дБ. У кожному каскаді використовується по 8 діодів, включених в загальну електродинамічну систему, циліндричний резонатор.

Для виконання вимоги когерентності і стабільності амплітудно-фазових параметрів в імпульсному режимі використовуємо зовнішню синхронізацію імпульсних генераторів високостабільним безперервним сигналом. Як джерело вхідного сигналу використовуємо генератор на ЛПД, із стабілізуючим високодобротним об'ємним резонатором 1 прохідного типу (рис. 3.2).

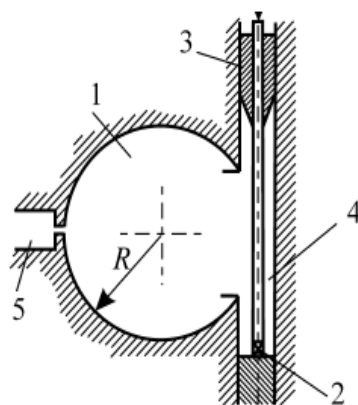


Рис. 3.2. Конструкція частотно-стабілізованого ГЛПД із стабілізуючим об'ємним резонатором прохідного типу

Діод 2 встановлений в коаксіальній лінії 4; резонатор пов'язаний з хвилеводом виведення потужності 5 щілиною зв'язку. Стабільність частоти

генератора забезпечена стабілізуючим резонатором циліндричної форми с добротністю 10^4 [101].

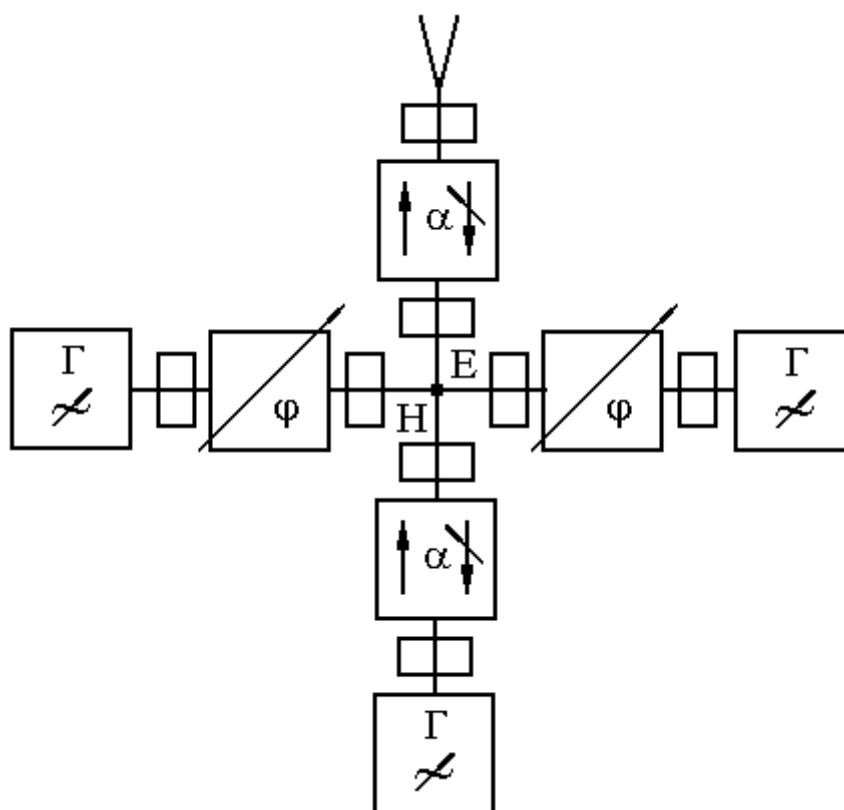


Рис. 3.3. Структурна розгалужена система підсумовування потужностей каскадних суматорів ГЛПД в режимі синхронізації зовнішнім сигналом

При розробці суматора потужностей використовуються стандартні хвилеводні елементи: феритові вентиля, циркулятори, атенюатори, фазо-обертачі, Е-Н трійники. Рівень необхідної розв'язки між каскадами повинен бути не менше 40 дБ, а величина потужності 80 Вт.

3.2 Аналіз енергетичних і конструктивних параметрів синхронізуючого генератора на лавинно-пролітних діодах

Для виконання вимоги когерентності і стабільності амплітудно-фазових параметрів в імпульсному режимі використовуємо зовнішню синхронізацію імпульсних генераторів високостабільним безперервним сигналом. Як джерело

вхідного сигналу використовуємо генератор на ЛПД, із стабілізуючим високодобротним об'ємним резонатором прохідного типу [101] (рис. 3.4).

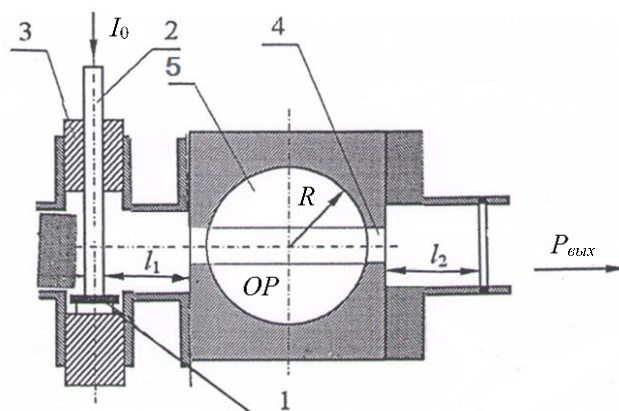


Рис. 3.4. Ескіз конструкції генератора із стабілізуючим об'ємним резонатором

Генератор, що стабілізується, виконаний у вигляді хвилеводно-штирьової конструкції перетином $11 \times 4 \text{ мм}^2$. Діод ЛПД кріпиться в хвилеводі з використанням металевого круглого стержня 2, вісь якого паралельна вектору електричного поля (в прямокутному хвилеводі поширюється хвиля H_{10}). Для запобігання можливих паразитних коливань в межах дії перебудови в ланцюг живлення діода включене поглинаюче навантаження 3. В якості зовнішнього стабілізуючого резонатора використовується циліндричний резонатор 5, що працює на TE_{011} типі коливань и включений по схемі «на прохід». Зв'язок резонатора з хвилеводною конструкцією здійснюється через отвори зв'язку 4.

Перебудова частоти резонатора здійснюється безконтактним поршнем. На рис. 3.5 приведена еквівалентна схема синхронізуючого ГЛПД.

В еквівалентній схемі (рис. 3.5) металевий стрижень для кріплення діода замінений T -образною еквівалентною схемою. Еквівалентні параметри стрижня представлені реактивностями jX_a , $-jX_c$, які визначаються розмірами стрижня і розмірами хвилеводу. ЛПД генератор представлений елементами R_{p-n} та X_{p-n} , величина яких визначається розрахунковим шляхом. Зовнішній стабілізуючий

резонатор 1 характеризується елементами L_p , C_p , G_p . Відстань від осі струмопроводячого штиря до площини отвору зв'язку враховано відрізком довгої лінії l_1 . Перебудова частоти стабілізуючого резонатора здійснюється безконтактним поршнем.

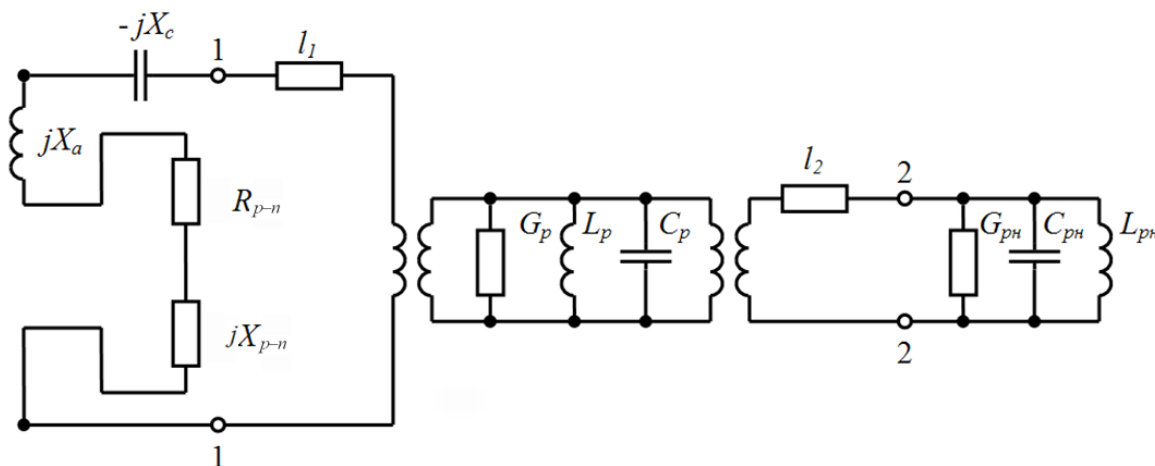


Рис. 3.5. Еквівалентна схема генератора з зовнішнім стабілізуючим резонатором

Навантаженням генератора є резонансна багатодіодна електродинамічна система, яка характеризує елементами L_{rn} , C_{rn} , G_{rn} . У випадку, коли всі діоди включені в пучність електричного поля підсумовуючого резонатора, коефіцієнт трансформації можна вважати рівним одиниці. Відстань від отвору зв'язку резонатора до площини навантаження враховано відрізком довгої лінії l_2 . Еквівалентні параметри стержня були визначені з виразів [101]:

$$\frac{X_a}{Z_0} - \frac{X_c}{2Z_0} = \frac{a}{2\lambda_g} \left[S_0 - \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^2 - \frac{5}{8} \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 - 2 \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 \left(S_2 - 2S_0 \frac{\lambda^2}{\lambda_g^2} \right)^2 \right]; \quad (3.5)$$

$$\frac{X_c}{Z_0} \approx \frac{a}{\lambda_g} \frac{\left(\frac{\pi d}{a}\right)^2}{1 + \frac{11}{24} \left(\frac{\pi d}{a}\right)^2}; \quad (3.6)$$

$$S_0 = \ln \frac{4a}{\pi d} - 2 + 2 \sum_{n=3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{n^2 - \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2}} - \frac{1}{n} \right]; \quad (3.7)$$

$$S_2 = \ln \frac{4a}{\pi d} - \frac{5}{2} + \frac{11}{3} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 - \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 \sum_{n=3,5,\dots}^{\infty} \left[\sqrt{n^2 - \left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2} - n + \frac{2}{n} \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 \right]; \quad (3.8)$$

$$Z_0 = \frac{b}{a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} - \text{характеристичний опір хвилеводу};$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} - \text{длина волни в волноводе};$$

$$\lambda = \frac{c}{f} - \text{довжина хвилі у вільному просторі};$$

$\lambda_{кр} = 2a$; $a = 11$ мм; $b = 4$ мм; $d = 0,5$ мм; $\lambda = 15$ мм; $Z_0 = 185$ Ом; $\lambda_g = 20,4$ мм; $X_a = 68,4$ Ом; $X_c = 1,85$ Ом.

Для визначення параметрів діода синхронізуючого генератора скористаємося методикою наведеної в роботах [102, 103] для режиму слабого сигналу.

Спрощена еквівалентна схема ЛПД з урахуванням втрат в базі транзистора наведена на рис. 3.6.

Елементи в еквівалентній схемі (рис. 3.6) мають наступне призначення: C_{p-n} – ємність р-п переходу; R_s – опір втрату бази контурах діода.

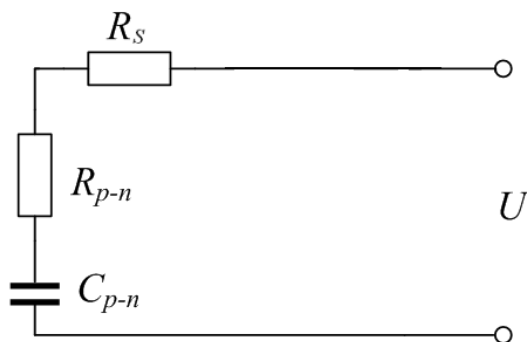


Рис. 3.6. Еквівалентна схема діода

У режимі слабкого сигналу активна $R_{p-n}(\omega)$ і реактивна $X_{p-n}(\omega)$ складові опору p - n переходу діода визначаються виразами [104, 105].

$$R_{p-n}(\omega) = -\frac{1}{\omega \cdot C_{p-n}} \cdot \left(1 - \frac{l_\delta}{l_w}\right) \cdot \frac{\beta_n^2}{1 - \beta_n^2 + \delta^2} \cdot [(1 - \beta_n^2) \cdot \xi(\theta) - \delta \cdot \lambda(\theta)]; \quad (3.9)$$

$$X_{p-n}(\omega) = -\frac{1}{\omega \cdot C_{p-n}} \cdot \left\{1 + \frac{\beta_n^2}{(1 - \beta_n^2) \cdot \delta} \cdot \left(1 - \frac{l_\delta}{l_w}\right) \cdot [\delta \cdot \xi(\theta) + (1 - \beta_n^2) \cdot \lambda(\theta)]\right\}, \quad (3.10)$$

где: $\beta_n^2 = \frac{\omega^2 \tau_n}{\omega^2}$; $\delta = \omega \cdot \tau_\delta$; $\tau_\delta = \frac{l_\delta}{v}$ – час прольоту носіями шару множення;

v – швидкість дрейфу носіїв; $\xi(\theta) = \frac{1 - \cos \cdot \theta}{\theta}$; $\lambda(\theta) = \frac{\sin \cdot \theta}{\theta} + \frac{l_\delta}{l_w - l_\delta}$;

$\omega_n^2 = \frac{6 I_0}{C_{p-n} \cdot \tau_\delta \cdot E_{np}}$; $E_{np} = Ne \cdot l_w / \varepsilon \cdot \varepsilon_0$; $\theta = \omega \cdot \tau$ – кут прольоту носіїв заряду;

$\tau = 2 \cdot 10^{-13} \cdot U^{1,22}$ – час прольоту носіїв заряду дрейфової області.

Розрахункові залежності опорів діода 3A750B наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахункові залежності параметрів ЛПД 3A750B для різних робочих струмів і частоти 10 ГГц

$I_0, \text{мА}$	160	170	180
β_n^2	0,63	0,67	0,71
$R_{p-n}, \text{Ом}$	-2,94	-2,56	-2,0
$X_{p-n}, \text{Ом}$	-70,4	-76,16	-83,2

Розрахунок імпедансу проводили для ЛПД типу 3A750B з параметрами [88,89]: ємність $p-n$ переходу $C_{p-n} = 0,23 \text{ пФ}$; $\nu = 10^7 \frac{\text{см}}{\text{с}}$; $\theta = 180^\circ$; $l_w = 1,2 \text{ мкм}$; $l_\delta = 0,3 \text{ мкм}$; $\delta = 0,4$; $\tau_\delta = 0,3 \cdot 10^{-11} \text{ с}$; $\varepsilon = 12$; $N = 7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; $\theta = 180^\circ$; $l_w = 1,2 \text{ мкм}$; $l_\delta = 0,3 \text{ мкм}$; $\delta = 0,4$; $\tau = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ с}$; $\varepsilon = 12$; $N = 7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

Параметри, що характеризують якість об'ємного резонатора, були визначені заміною об'ємного резонатора еквівалентним контуром із зосередженими параметрами [106, 107]:

$$Q_p = \frac{1}{\chi} \frac{R}{\left(1 + \frac{R}{h}\right)}, \quad (3.11)$$

де Q_p – добротність резонатора;

R – радіус циліндричного резонатора;

$\chi = \sqrt{\frac{2}{\omega_0 \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}$; $\sigma = 15,8 \cdot 10^6 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$ – питома провідність латуні;

h – висота резонатора.

$$C_p = \varepsilon_0 \frac{R^2}{(\mu_{ni})^2 h}, \quad (3.12)$$

де $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}$ Ф/см;

$\mu_{ni} = 3,832$ – корінь функції Бесселя для хвилі H_{011} ;

$$L_p = \frac{\mu_0 h}{4\pi}, \quad (3.13)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/см;

$$G = \frac{\omega_0 \cdot C_p}{Q_p}, \quad (3.14)$$

де G – зосереджена активна провідність резонатора [108].

Проведені розрахунки показали, що для резонатора з розмірами $R = 32$ мм, $h = 7,5$ мм, величина параметрів резонатора дорівнює: $C_p = 0,0845$ пФ, $L_p = 7,5$ нГн, $Q_p = 5400$, $G = 0,235 \cdot 10^{-5}$ См.

Оскільки резонатор призначений для стабілізації частоти генератора, то в даному випадку зв'язок між резонатором і хвилеводною лінією здійснюється щілиною діаметром δ (рис. 3.3) унескінчено тонкій стінці. Елемент зв'язку являє собою шунтуючу індуктивність для хвилеводної системи генератора, відносна провідність якої визначається виразом [109]:

$$\frac{B_u}{Y'_0} = \frac{\lambda}{\pi R} \cdot \frac{(4\pi \cdot R)^2}{\delta^2}, \quad (3.15)$$

$$\text{де } Y'_0 = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda} \cdot \frac{a}{4\pi R};$$

a – ширина хвилеводної системи;

δ – діаметр елемента зв'язку.

Величину активної провідності резонатора G' на кінціхвилеводної лінії l_1 визначимо з рівняння [108]:

$$G' = G \cdot \frac{Q_p}{Q_{\text{вн}}}, \quad (3.16)$$

де $Q_{\text{вн}}$ – зовнішня добротність резонатора.

Чисельний аналіз визначив, що для $\frac{Q_{\text{вн}}}{Q_p} = 0,5$ і $\delta = 2 \text{ мм}^2$, $B_u = 1,24 \text{ См}$,

$G' = 0,47 \cdot 10^{-5} \text{ См}$, а опір навантаження на кінці лінії l_1 будедорівнювати:

$$\frac{1}{G' - jB_u} = a_1 + jb_1 = (0,3 \cdot 10^{-5} + j0,81) \text{ Ом}. \quad (3.17)$$

Для визначення опору навантаження хвилеводу зліва і праворуч від прохідного резонатора скористаємося наступним виразом [107]:

$$Z_{\text{ex1}} = \frac{a_1(1 + \text{tg}\beta l_1) + j[b_1 + (Z_0 - \frac{b_1^2}{Z_0} - \frac{a_1^2}{Z_0})\text{tg}\beta l_1 - b_1 \text{tg}^2 \beta l_1]}{1 - (2b_1 / Z_0)\text{tg}\beta l_1 + (1 / Z_0^2)(b_1 + a_1)\text{tg}^2 \beta l_1}, \quad (3.18)$$

$$\text{де } \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}.$$

На підставі еквівалентної схеми (рис. 3.4) опір в площині діода буде визначатися з рівняння:

$$Z_d = R_{p-n} + j(-X_{p-n} + X_a - X_c) . \quad (3.19)$$

Справа з боку резонатора навантаження хвилеводу визначається виразом:

$$Z_{\text{вх}2} = Z_0 \frac{\frac{Z_0}{Z_2} + j\left(\frac{Z_0^2}{Z_2} - 1\right) \cos \beta l_2 \cdot \sin \beta l_2}{\frac{Z_0^2}{Z_2^2} \cos^2 \beta l_2 + \sin^2 \beta l_2} , \quad (3.20)$$

$$\text{де } \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} .$$

Оскільки навантаженням хвилеводної лінії праворуч від резонатора є електродинамічна система з шістьма діодами, то навантаження, створювана системою, буде визначатися виразом:

$$Z_2 = -R'_d / 6 , \quad (3.21)$$

де R'_d – активний опір корпусного діода 3A750B.

Прирівнюючи дійсні та уявні частини (3.18) – (3.21), отримуємо систему двох рівнянь щодо невідомих l_1 та l_2 :

$$\frac{a_1(1 + \operatorname{tg} \beta l_1)}{1 - (2b_1 / Z_0) \operatorname{tg} \beta l_1 + 1 / Z_0^2 (b_1 + a_1) \operatorname{tg}^2 \beta l_1} = -R_{p-n} ; \quad (3.22)$$

$$\frac{b_1 + (Z_0 - \frac{b_1^2}{Z_0} - \frac{a_1^2}{Z_0}) \operatorname{tg} \beta l_1 - b_1 \operatorname{tg}^2 \beta l_1}{1 - (2b_1 / Z_0) \operatorname{tg} \beta l_1 + 1 / Z_0^2 (b_1 + a_1) \operatorname{tg}^2 \beta l_1} = (-X_{p-n} + X_a - X_c) ; \quad (3.23)$$

$$Z_0 \frac{\frac{Z_0}{Z_2}}{\frac{Z_0^2}{Z_2^2} \cos^2 \beta l_2 + \sin \beta l_2} = a_1; \quad (3.24)$$

$$Z_0 \frac{\left(\frac{Z_0^2}{Z_2} - 1\right) \cos \beta l_2 \cdot \sin \beta l_2}{\frac{Z_0^2}{Z_2^2} \cos^2 \beta l_2 + \sin \beta l_2} = b_1. \quad (3.25)$$

В результаті рішень системи рівнянь (3.22) – (3.25) були отримані величини довжин хвильових відрізків (рис. 3.13) $l_1 = 0,4$ см і $l_2 = 13$ мм.

Відносна нестабільність частоти генератора визначалася із співвідношення [110]:

$$\frac{\omega_p - \omega_2}{\omega_2} = \frac{\Delta \omega}{\omega_2}, \quad (3.26)$$

де ω_2 – частота генерації; ω_p – частота резонатора.

Чисельний аналіз визначив, що відносна нестабільність частоти генератора склала $1,6 \cdot 10^{-6}$. Частота і електронна НВЧ потужність генерації ЛПД, визначається в основному технологічними параметрами: напругою пробою U_{np} , площею $p-n$ переходу S , густиною робочого струму J_0 , опором втрат діода R_s , опором втрат резонатора R_p і ємністю діода C [101]. Електронна потужність однодіодного ГЛПД визначається співвідношенням [99]

$$P_{Г1} = 0,25 \frac{J_0^2}{\omega \tau_s} \frac{C}{1 + \frac{R_p}{\tau_s} C} \left(\frac{1 - \cos \omega \tau}{\omega \tau} \right)^2 Y_s(z), \quad (3.27)$$

де $J_0 = \frac{I_0}{C}$ – густина робочого струму на одиницю ємності, $\frac{A}{\Phi}$;

$\tau_s = R_s C$ – постійна втрат ЛПД при пробивній напрузі;

$\omega\tau$ – кут прольоту (оптимальне значення кута ($\square 2,2 = 0,7\pi$))

R_p – опір омичних втрат резонатора;

$J_{ns} = \frac{I_0}{C}$ – густина пускового струму на одиницю ємності.

Так як величини $J_0, \tau_s, \omega\tau$ від ємності залежать слабо, то потужність P_Γ приблизно пропорційна ємності:

$$P_\Gamma \approx p_0 C, \quad (3.28)$$

$$\text{де } p_0 = 0,25 \frac{J_0^2}{\omega^2 \tau_s} \left(\frac{1 - \cos \omega\tau}{\omega\tau} \right)^2 Y_s(z).$$

Функція $Y_s(z)$ чисельно визначена в [100] і приблизно дорівнює:

$$Y_s \approx 1 - z. \quad (3.29)$$

Параметр z дорівнює відношенню:

$$z \approx \frac{I_{ns}}{I_0} \left(1 + \frac{R_p}{\tau_s} C \right), \quad (3.30)$$

де I_{ns} – пусковий струм ГЛПД при опорі втрат резонатора $R_p = 0$.

На рис.3.7 приведена спрощена електрична схема многодіодного ГЛПД. Додаючий резонатор L_p, C_p, R_p пов'язаний через трансформуючі елементи з коефіцієнтом трансформації p^2 і паралельно включеними діодами з імпедансами Z_d , число яких N .

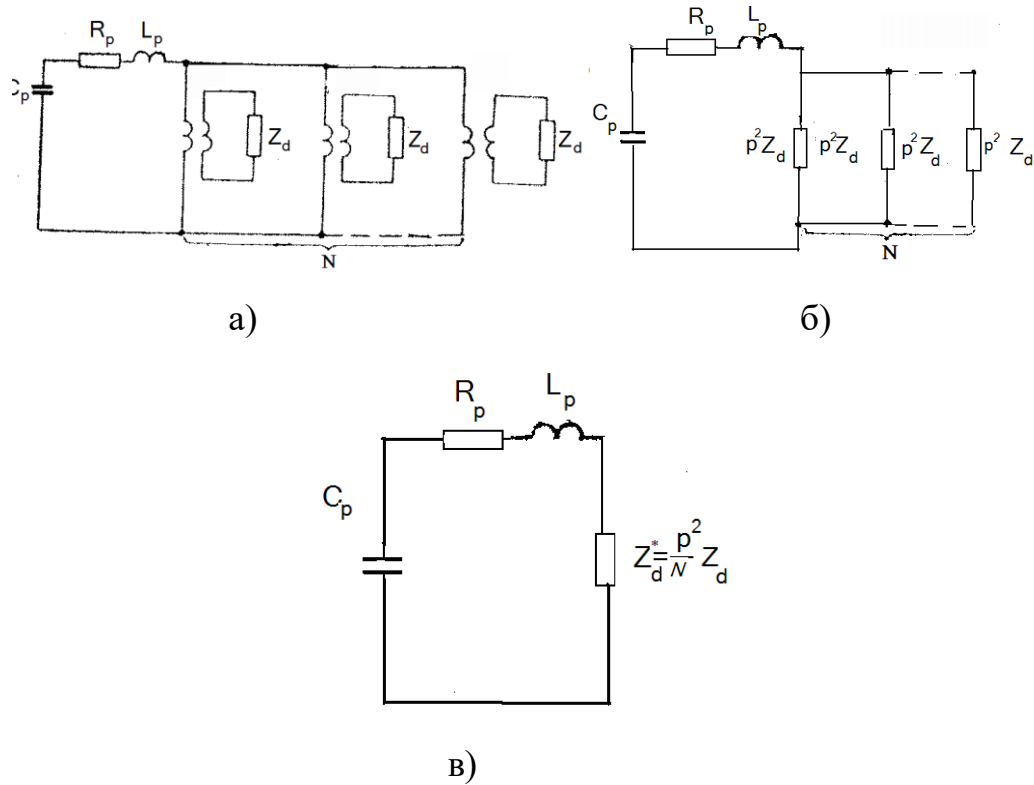


Рис.3.7. Спрощена еквівалентна схема ГЛПД із загальним додаючим резонатором (а) і перетворені схеми (б, в)

Схема рис.3.7 перетворюється в схему рис.3.7, б і потім при ідентичності ЛПД в схему рис.3.7, в. В результаті многодіодний ГЛПД еквівалентний одному діоду з опором

$$Z_d^* = \frac{p^2}{N} Z_d. \quad (3.31)$$

У цьому випадку основні параметри:

$$C^* = \frac{N}{p^2} C,$$

$$R_s^* = \frac{p^2}{N} R_s, \quad (3.32)$$

$$R^* = \frac{p^2}{N} |R_d|.$$

У найпростішому випадку, коли всі діоди включені в пучність електричного поля підсумовуючого резонатора зосереджено (майже в одній точці), коефіцієнт $p^2 = 1$, а при розподіленому включенні цей коефіцієнт суттєво відрізняється від одиниці.

Підставляючи в (3.27) замість ємності \tilde{N} ємність C^* відповідно до (3.32), отримаємо сумарну вихідну потужність діодів в багатодіодном ГЛПД:

$$P_{\Gamma\Sigma} = 0,25 \frac{J_0^2}{\omega^2 \tau_s} \frac{(N/p^2)C}{1 + (R_p/\tau_s)(N/p^2)C} \left(\frac{1 - \cos \omega\tau}{\omega\tau} \right)^2 Y_s(z_\Sigma), \quad (3.33)$$

$$\text{де } z_\Sigma = \frac{\Sigma I_{ns}}{\Sigma I_0} \approx \frac{I_{ns}}{I_0} \left(1 + \frac{R_p}{\tau_s} \frac{N}{p^2} C \right).$$

У більшості випадків опір втрат резонатора R_p значно менше опору втрат ЛПД R_s і відповідно

$$\frac{R_p}{\tau_s} C = \frac{R_p}{R_s} \ll 1. \quad (3.34)$$

В цьому випадку при малому числі діодів N , коли величина $\frac{R_p}{\tau_s} \frac{N}{p^2} C \ll 1$, вихідна потужність зростає пропорційно числу діодів. При подальшому збільшенні N відношення $\frac{R_p}{\tau_s} \frac{N}{p^2} C$ стає приблизно рівним одиниці і пропорційність потужності числу діодів N порушується. Пояснення цьому витікає з [102] – із збільшенням N зменшується модуль результуючого негативного опору R^* , що веде до втрати потужності. Оцінити ці втрати можна, перетворюючи (3.6) до вигляду

$$\begin{aligned}
 P_{\Gamma\Sigma} &= NP_{\Gamma 1} \frac{1 + (R_p / \tau_s) C(1/p^2) Y_s(z_\Sigma)}{1 + (R_p / \tau_s) C(N/p^2) Y_s(z)} \approx \\
 &\approx NP_{\Gamma 1} \frac{1 + (R_p / \tau_s) C(1/p^2) \frac{1 - I_{ns} / I_0 [1 + (R_p / \tau_s) (N/p^2) C]}{1 + (R_p / \tau_s) C(N/p^2) \frac{1 - I_{ns} / I_0 [1 + (R_p / \tau_s) (1/p^2) C]}}{1 + (R_p / \tau_s) C(N/p^2) \frac{1 - I_{ns} / I_0 [1 + (R_p / \tau_s) (1/p^2) C]}}. \quad (3.35)
 \end{aligned}$$

Таким чином, відносні втрати потужності при додаванні потужностей ЛПД складуть:

$$L = 10 \lg \frac{P_{\Gamma\Sigma}}{NP_{\Gamma 1}} = 10 \lg \frac{1 + (R_p / \tau_s) C(1/p^2) Y_s(z_\Sigma)}{1 + (R_p / \tau_s) C(N/p^2) Y_s(z)} \text{ дБ}. \quad (3.36)$$

ККД при додаванні потужностей декількох ідентичних діодів можна визначити, використовуючи

$$\eta_\Sigma = \frac{P_{\Gamma\Sigma}}{NP_{\Gamma 1}} 100\%. \quad (3.37)$$

На рис.3.8 показані залежності сумарної потужності $P_{\Gamma\Sigma}$ і ККД складання η_Σ від числа діодів N .

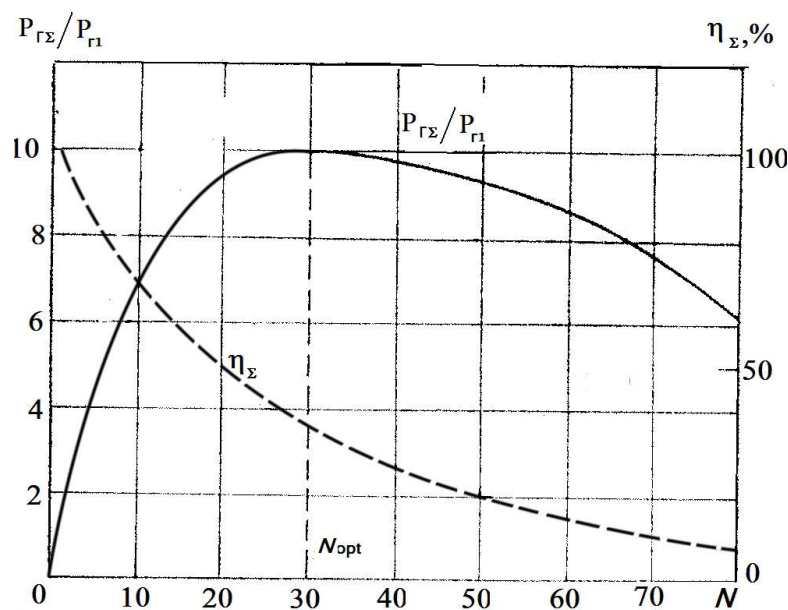


Рис. 3.8. Залежність сумарної вихідної потужності $P_{\Gamma\Sigma}$ і ККД складання η_Σ від числа діодів N .

Наведені на рис. 3.8 залежності дозволяють визначити ККД генератора і величину нормованого значення вихідної потужності від числа діодів. Для кількості діодів $N=16$ ККД становить 50,0%, а величина нормованої потужності 8,2 одиниць. Розрахунки показують, що вихідна потужність для діодів 3A750 у всьому діапазоні довжин хвиль складе 160 Вт.

Наведені на рис. 3.8 залежності показують, що при додаванні потужностей ЛПД існує оптимальне число діодів ($N=N_{opt}$), при якому сумарна потужність досягає максимуму

$$N_{opt} \approx p^2 \frac{\tau_s}{R_p C} \left(\sqrt{\frac{I_0}{I_{ns}}} - 1 \right), \quad (3.38)$$

де N_{opt} збільшується зі зменшенням опору втрат резонатора R_p .

Сумарна ємність діодів при $N = 16$ складає

$$C_{\Sigma} = N C \approx p^2 \frac{\tau_s}{R_p} \left(\sqrt{\frac{I_0}{I_{ns}}} - 1 \right). \quad (3.39)$$

В даному суматорі $N \approx 16$, а $C \approx 16 \cdot 0,25 \text{ нФ} = 3,0 \text{ нФ}$.

У розрахунку використані такі паспортні параметри ЛПД: $R_s = 0,5 \text{ Ом}$, $R_p =$

$$0,06 \text{ Ом}, C = 0,25 \text{ нФ}, p^2 = 1, \frac{I_0}{I_{ns}} = 4.$$

3.3 Аналіз параметрів суматора потужності багатодіодного генератора на основі циліндричного резонатора

Для виконання вимог по величині імпульсної потужності 160 Вт в мм діапазоні довжин хвиль, необхідно використовувати суматори потужності на основі циліндричного резонатора.

. Розглянемо хвилеводний резонатор, утворений відрізком циліндричного круглого хвилеводу, діаметром $D=2R$ і висотою h (рис. 3.6). Коливання в циліндричних резонаторах діляться на коливання магнітного і електричного типу. У нашому випадку становить інтерес коливання електричного типу E_{mnp} .

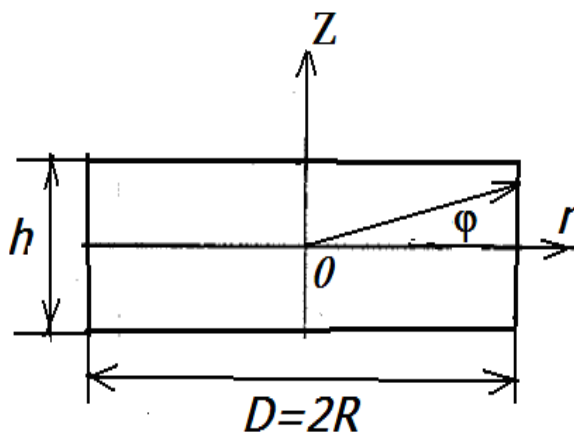


Рис.3.9. Ескіз конструкції циліндричного резонатора

Компоненти електромагнітного поля коливань електричного типу можна виразити через скалярну функцію [111]. Для цього використовуємо циліндричну систему координат r, φ, z з віссю z , що збігається з віссю симетрії резонатора. Тоді компоненти напруженості електричного і магнітного полів коливань E_{mnp} виражаються через скалярну функцію $U(r, \varphi, z)$ наступним чином

$$E_z = \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \omega^2 \varepsilon \mu U, \quad E_r = \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial r}, \quad E_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial \varphi},$$

$$H_z = 0, \quad H_r = \frac{i \varepsilon \omega}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi}, \quad H_\varphi = -i \varepsilon \omega \frac{\partial U}{\partial r}, \quad (3.40)$$

де ε, μ – діелектрична і магнітна проникності середовища, що заповнює резонатор; ω – кругова частота.

Залежність частоти від часу прийнята у вигляді $\exp(i\omega t)$. Скалярна функція U повинна задовольняти однорідному рівнянню Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + k^2 U = 0, \quad (3.41)$$

де $k > \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$.

У припущенні ідеальної поверхні резонатора функція повинна задовольняти граничним умовам (рівність нулю тангенціальних компонент електричного поля на поверхні резонатора)

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + k^2 U \right) \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \varphi} \Big|_{r=R} = 0, \quad 0 \leq z \leq h, \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0,h} = 0, \quad 0 \leq r \leq R. \quad (3.43)$$

Граничні умови (3.42), (3.43) впливають з (3.40). Таким чином, потрібно визначити значення частоти при яких існують нетривіальні рішення рівняння (3.41), що задовольняють умовам (3.42), (3.43).

Розв'язок цієї задачі може бути отриманий за допомогою методу поділу змінних в циліндричних координатах [101, 102]. Використовуючи цей метод отримуємо такі вирази для компонент електромагнітного поля коливань E_{mnp} :

$$\begin{aligned} E_z &= A \frac{\mu_{mn}^2}{R^2} J_n \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right)_{\sin}^{\cos} n \varphi \cos \frac{p\pi z}{h}, \\ E_r &= -A \frac{p\pi \mu_{mn}}{hR} J'_n \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right)_{\sin}^{\cos} n \varphi \sin \frac{p\pi z}{h}, \\ E_\varphi &= -A \frac{mp\pi}{hr} J_n \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right)_{\cos}^{-\sin} n \varphi \sin \frac{p\pi z}{h}, \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$H_z = 0,$$

$$H_r = -A \frac{ink}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_n \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right)_{-\cos}^{\sin} n\varphi \cos \frac{p\pi z}{h}, \quad (3.45)$$

$$H_\varphi = -A \frac{i\mu_{mn}k}{R} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_n' \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right)_{\sin}^{\cos} n\varphi \cos \frac{p\pi z}{h}.$$

Тут $J_n \left(\frac{\mu_{mn}}{R} r \right)$ – функція Бесселя першого роду n -го порядку,

μ_{mn} – m -й корінь функції Бесселя $J_n(\mu_{mn}) = 0$, n та p – цілі числа.

Константа визначається типом і амплітудою збуджуючого поля. Власна частота, що відповідає коливанням (3.44,3.45) буде дорівнювати

$$\omega_{mnp} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{\mu_{mn}}{R} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h} \right)^2}, \quad (3.46)$$

де індекси m, n, p характеризують розподіл поля по координатах r, φ, z відповідно.

На підставі отриманих виразів (3.44,3.45) і (3.46), розглянемо коливання, у якого відсутня залежність від координати z (уздовж осі резонатора) і є тільки один екстремум уздовж координати r . Як видно з (3.44,3.45), щоб отримати це коливання слід покласти в (3.44,3.45) такі значення індексів m, n, p : $m=1, p=0$.

Тоді будемо мати

$$E_z = A \frac{\mu_{1n}^2}{R^2} J_n \left(\frac{\mu_{1n} r}{R} \right)_{\sin}^{\cos} n\varphi,$$

$$E_r = E_\varphi = 0, H_z = 0, \quad (3.47)$$

$$H_r = -A \frac{ink}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_n \left(\frac{\mu_{1n} r}{R} \right)_{-\cos}^{\sin} n\varphi,$$

$$H_\varphi = -A \frac{i\mu_{1n}k}{R} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_n' \left(\frac{\mu_{1n} r}{R} \right)_{\sin}^{\cos} n\varphi.$$

$$\text{З(3.46) отримуємо } \omega_{1n0} = \frac{\mu_{1n}}{R\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (3.48)$$

Далі будемо припускати, що навколишнє середовище, що заповнює резонатор, є вакуумом. В цьому випадку в (3.47) і (3.48) слід покласти $\varepsilon = \varepsilon_0$

и $\mu = \mu_0$ (ε_0, μ_0 – діелектрична і магнітна проникності вакууму, $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ –

швидкість світла). Задаючи резонансну довжину хвилі або частоту з (3.48) можна визначити радіус циліндричного резонатора

$$R = \frac{\mu_{1n} \lambda_{1n}}{2\pi} = \frac{\mu_{1n}}{\omega_{1n0} \sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}, \quad (3.49)$$

де μ_{1n} – перший корінь функції Бесселя $J_n(\mu_{1n}) = 0$ n -го порядку. Індекс n – відповідає за кількість осциляцій поля коливання уздовж координати φ .

Нас цікавить випадок, коли вздовж координати φ циліндричного резонатора розташовується вісім пучностей електричного поля. Як впливає з (3.46), це реалізується при значенні індексу $n = 4$. У цьому випадку перший корінь функції Бесселя дорівнює $\mu_{14} \approx 7,588$.

Для резонансної частоти, радіус резонатора повинен мати $R = 3,62$ см. Для заданої резонансної частоти і розмірів циліндричного резонатора на рис. 3.10

наведені результати розрахунку розподілу інтенсивності електричного поля типу E_{140} .

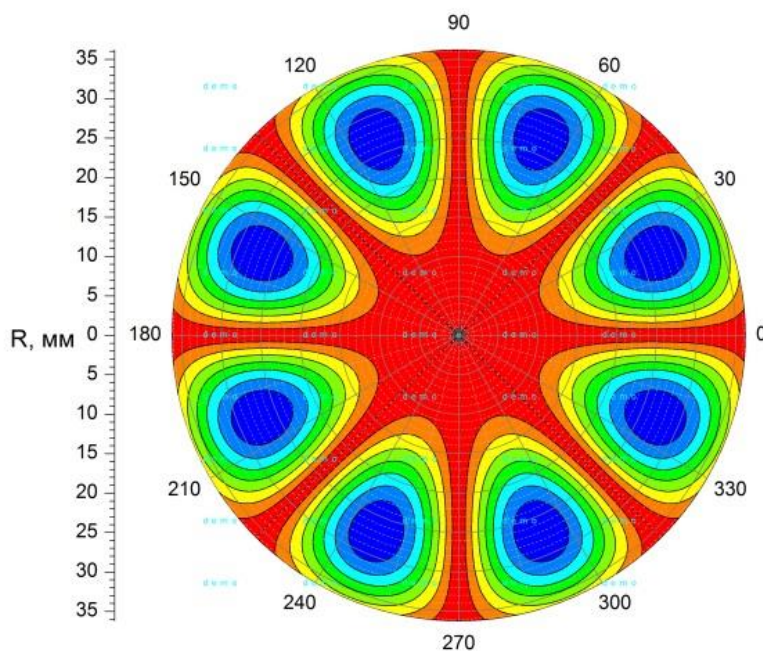


Рис. 3.10. Розподіл інтенсивності коливань в циліндричному резонаторі

Для задоволення вимог за рівнем вихідної потужності розроблена конструкцію каскадного підсумовування потужностей $N = 8$ генераторів в циліндричному резонаторі (рис. 3.10)

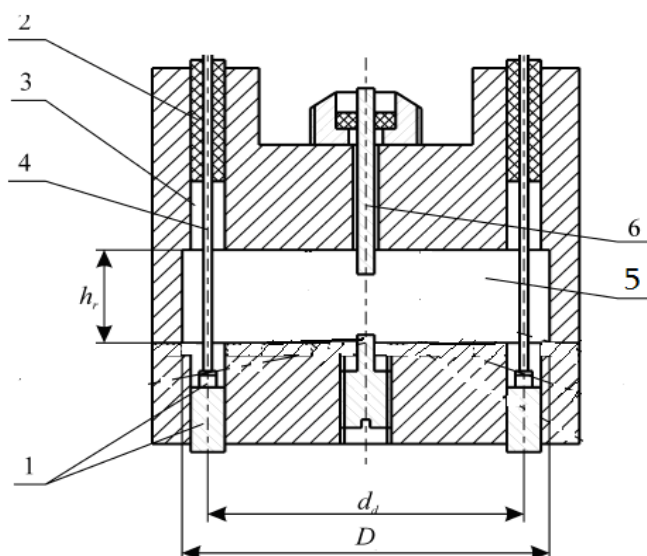


Рис. 3.11. Ескіз суматора потужностей ($N = 8$) на лавинно-пролітних діодах 3A750 В, виконаний в циліндричному резонаторі з хвилею E_{140}

Діоди 1 на тепловідвідних підставах, спільно з антипаразитними навантаженнями 2 встановлені в коаксіальних лініях 3; внутрішні лінії провідників цих ліній 4 забезпечують підведення електричного живлення до діодів. Механічне підстроювання частоти виконується штирем 6. Коаксіальні діодні лінії 3 розташовані на бічній поверхні резонатора 5 в пучностях електричного поля (рис.3.7). Осі діодних ліній паралельні осі резонатора 5 і розташовані на однаковій відстані $\lambda_0/2$ один від одного вздовж окружності з діаметром $d_d \leq D$. Зв'язок з навантаженням здійснюється прямокутним хвилеводом 7.

У забезпеченні оптимальних коефіцієнтів трансформації діодів при їх включенні в ланцюзі НВЧ полягає основна трудність побудови ефективних суматорів потужності з мінімальними енергетичними втратами. Один з ефективних шляхів вирішення завдання узгодження імпедансів діодів і навантаження в діапазоні НВЧ зводиться до застосування коаксіальних діодних ліній (T – образні зчленування) [106] (рис. 3.12).

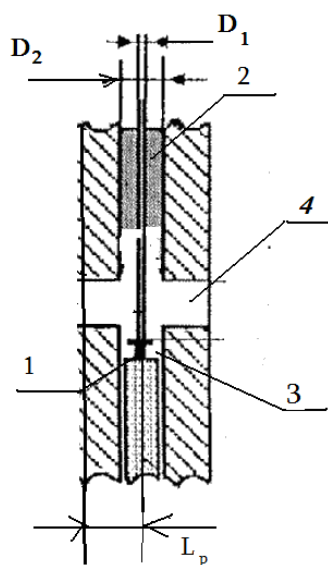


Рис. 3.12. Конструктивна схема коаксіально-діодної лінії

Коаксіальна лінія з діаметром зовнішнього і внутрішнього провідника D_2 і D_1 з діодом 1 навантажена на антипаразитний опір 2. Узгодження сумарної провідності діодів з навантаженням визначається експериментально шляхом підбору геометричних параметрів коаксіальної лінії. Зсув осі діода щодо бічної стінки резонатора змінює коефіцієнт трансформації між коаксіальною лінією і резонатором.

Аналіз [98] показує, що вимоги до ідентичності параметрів діодів не є жорсткими в даній конструкції. У разі виходу з ладу окремих діодів рівень вихідної потужності зменшується пропорційно.

Хвильовий опір циліндричного резонатора визначимо, використовуючи формулу [103]:

$$W_r = \frac{185,2}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[J_4\left(\frac{\mu_{14}}{D}\right) \right]^2 \frac{h_r}{D} [\text{Ом}], \quad (3.50)$$

де $h_r \approx \frac{1}{2} \lambda \approx 1,5$ см – висота резонатора;

$D = 7,24$ см – діаметр резонатора;

$\mu_{14} \approx 7,6$.

З урахуванням геометричних параметрів циліндричного резонатора і діод-коаксіальної лінії оптимальне число діодів, встановлених на рівних відстанях $\lambda_0/2$ уздовж окружності в пучностях електричного поля, становить $N=8$.

Опір втрат коаксіальної лінії, наведений до пучностей струму, визначається формулою [104]:

$$R_p \approx k \times 5,72 \cdot 10^{-4} \frac{2\pi}{\sqrt{\lambda}} \left[\frac{W_r}{15} + n \frac{\lambda}{D_1} \left(1 + e^{-\frac{W_{0k}}{60}} \right) \right], \quad (3.51)$$

де $W_{0k} = 60 \ln \frac{D_2}{D_1}$ – хвильовий опір коаксіальної лінії;

λ – довжина хвилі;

n – число півхвиль в лінії;

$k = 1,92$ – для латуні.

Чисельні розрахунки дозволили визначити параметри волноводно- коаксіальної лінії багатодіодного генератора для частоти 10 ГГц: $D_2 = 7 \text{ мм}$, $D_1 = 3 \text{ мм}$, $n = 2$, $L_p = 0,25 \lambda$, $W_{0k} \approx 50 \text{ Ом}$, $R_p = 0,06 \text{ Ом}$.

Висновки по розділу

1. Для створення імпульсного джерела електромагнітної енергії з параметрами: потужність 160 Вт, тривалість імпульсу 100 нс, шпаруватість 100, частота заповнення імпульсів 10 ГГц, необхідно застосовувати 2-х каскадний суматор потужності з 8 діодами типу 3A750В в кожному каскаді.
2. Отримання 8 % ККД підсумовування потужності восьми діодів і імпульсної потужності в межах 80 Вт можливо в єдиній електродинамічній системі на основі циліндричного резонатора з параметрами: діаметр резонатора 7,2 см, висота 1,5 см.
3. Узгодження імпедансів діодів і навантаження в єдиній електродинамічній системі можливо на основі коаксіальних ліній (Г-образне зчленування) з параметрами: $D_2 = 7 \text{ мм}$; $L_p = 0,7 \text{ см}$; хвильовий опір $W_{0k} = 50 \text{ Ом}$; опір втрат $R_p = 0,06 \text{ Ом}$.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ РЕПРОДУКТИВНОЇ ЗДАТНОСТІ ОСЕТРОВИХ РИБ

4.1. Мета і завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень було перевірка достовірності теоретичних підходів і моделей, що описують процес підвищення репродуктивної здатності осетрових риб з допомогою радіоімпульсного електромагнітного випромінювання. Відповідно до мети експериментальних досліджень були визначені завдання експерименту та шляхи їх вирішення:

- розробка, макетування та налагодження електронних систем 16-и діодного генератора;
- проведення багатофакторного експерименту для визначення біотропних параметрів радіоімпульсного електромагнітного випромінювання для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб;
- проведення виробничих випробувань з ікрою осетрових риб з опромінюванням її радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням.

4.2 Експериментальні дослідження енергетичних і спектральних характеристик багатодіодного генератора електромагнітного випромінювання

На підставі теоретичних досліджень був виготовлений дослідний зразок генератора на ЛПД стабілізованого за частотою зовнішнім резонатором. В якості зовнішнього резонатора був використаний циліндричний резонатор, включений за схемою на «прохід» (рис. 3.4).

Циліндричний резонатор виготовлений з латуні і має наступні геометричні розміри: радіус $R = 32$ мм; довжина дорівнює 20 мм. Резонатор збуджується за

допомогою отвору зв'язку діаметром 2 мм. Перебудова частоти резонатора здійснюється безконтактним підлаштування поршнем.

Стабілізуемий генератор виконаний у вигляді волноводно-штирьової конструкції перетином 11x4 мм². Діод ЛПД кріпиться в волноводі з використанням металевого круглого стержня, вісь якого паралельна вектору ЕП (в прямокутному хвилеводі поширюється хвиля H_{10}).

Загальний вигляд синхронізуючого генератора наведено на рис. 4.1.

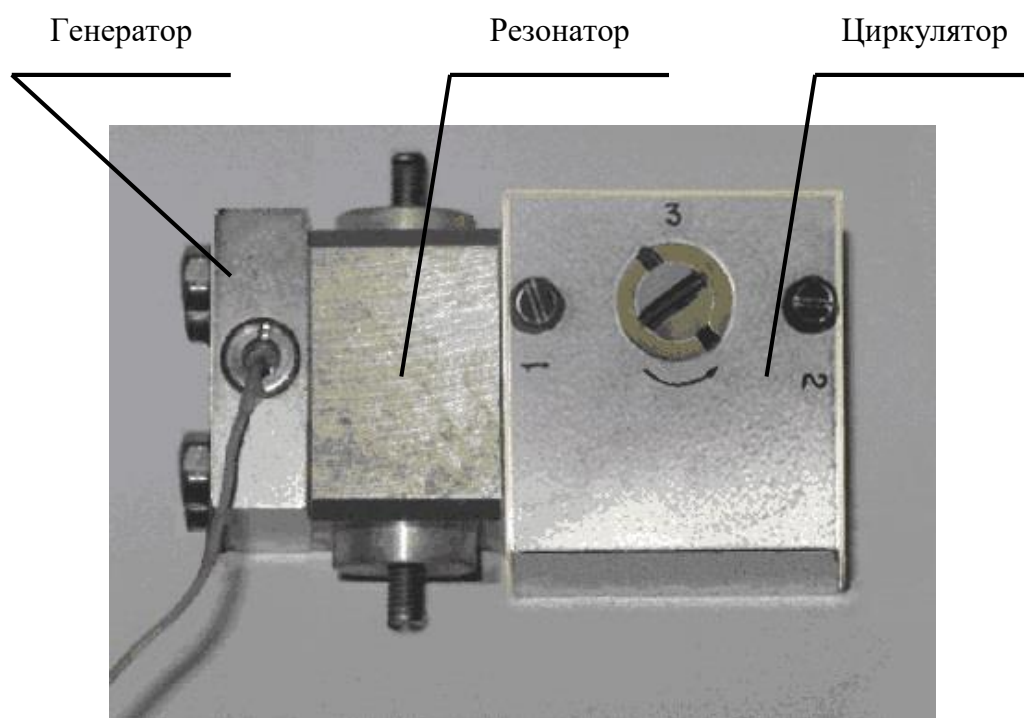


Рис. 4.1. Зовнішній вигляд конструкції генератора із стабілізуючим об'ємним резонатором на хвилі TE_{011}

На рис. 4.2 приведена функціональна схема експериментальної установки для визначення добротності резонансної системи синхронізуючого генератора і коефіцієнта зв'язку зі стабілізуючим резонатором (СР), смуги частотної перебудови і якості спектра.

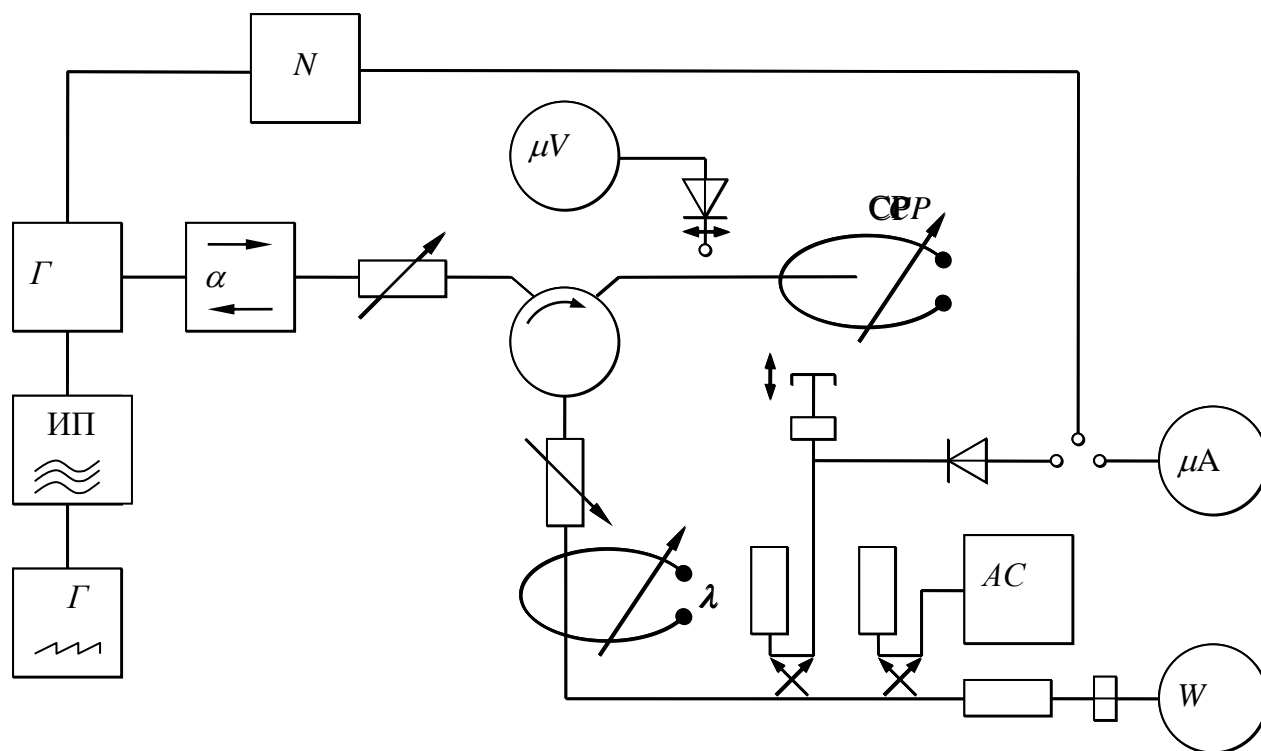


Рис. 4.2. Функціональна схема установки для визначення добротності і коефіцієнта зв'язку зі стабілізуючим резонатором

Джерелом коливань служить клістронний генератор К43-А, узгоджений з НВЧ трактом за допомогою вентилів і атенюатора. Сигнал з генератора пилоподібної напруги одночасно надходить на відбивач клістрона і електронний осцилограф С1-54. Цим досягається синхронність запуску клістрона і розгортки осцилографа. Модульовані по частоті радіоімпульси через ферритові вентиля, атенюатор, циркулятор, вимірювальну лінію надходять в НГ. Відбитий від СР сигнал через вимірювальну лінію, циркулятор проходить в схему, що складається з аналізатора спектра С4-27, детектора, термістора і вимірювального моста. Якщо СР налаштований в резонанс, то на екрані осцилографа виникає сплеск, що повторює форму резонансної кривої НГ. Одночасно на аналізаторі спектра видно резонансна крива НГ. Визначаючи частоту сигналу за допомогою хвилеміра і ширину резонансної кривої на аналізаторі спектра на рівні половинної потужності, обчислюємо величину

добротності SR як відношення $f/\Delta f$. Виміряна добротність стабілізуючого резонатора склала величину $Q = 5450$ для циліндричного резонатора з параметрами: $R = 32$ мм. $h = 7,5$ мм. Абсолютна похибка вимірювання добротності не перевищує 10 %. Коефіцієнт зв'язку визначається за виміряною величиною КСХ і з вигляду резонансної кривої на осцилографі.

На рис. 4.3 приведена залежність діапазону стійкого зтягування частоти від коефіцієнта зв'язку між резонаторами.

Із залежності (рис. 4.3) видно, що зі збільшенням коефіцієнта зв'язку між резонаторами розширюється діапазон зтягування. В даному експерименті при зтягуванні частоти генератора стабілізуючим резонатором коефіцієнт стабілізації частоти склав більше 100 одиниць.

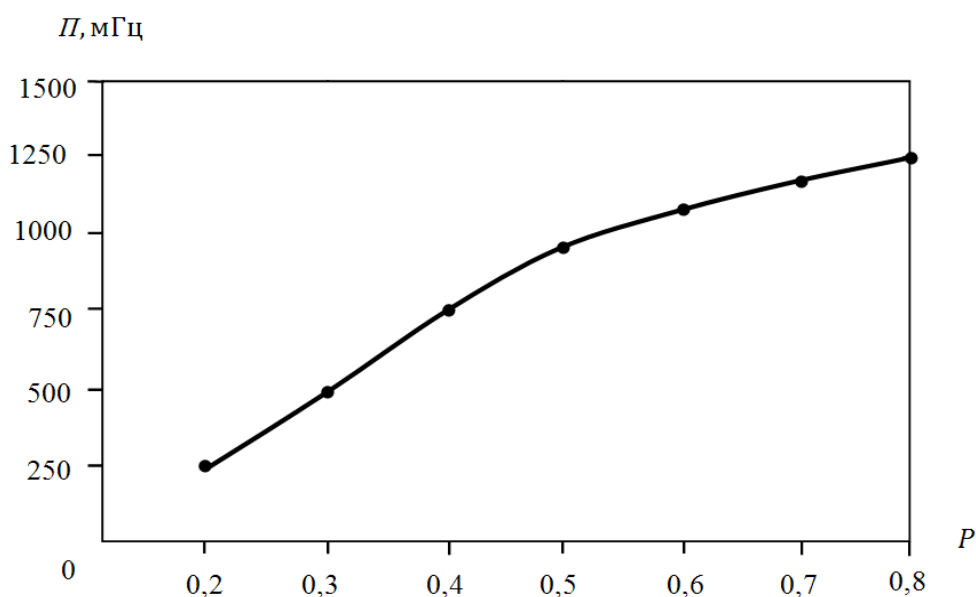


Рис. 4.3. Залежність смуги зтягування частоти від коефіцієнта зв'язку між резонаторами

Виміряна відносна нестабільність частоти синхронізуючого генератора склала $0,8 \cdot 10^{-6}$ одиниць для коефіцієнта зв'язку 0,6.

Проведені теоретичні дослідження зі створення імпульсного джерела електромагнітного випромінювання для опромінення ікри осетрових риб

показали, що для промислового використання необхідні радіоімпульсні джерела електромагнітної енергії з параметрами: потужність 160 Вт ; тривалість імпульсу 100 нс ; шпаруватість 100; частотазаповнення імпульсів $10,0 \text{ ГГц}$. Отримання такої потужності можливо на основі 2-х каскадного суматора потужності з 8 діодами типу 3A750B в кожному каскаді і вихідною потужністю в імпульсі 80 Вт . На рис. 4.4 приведена конструкція восьмідіодного генератора на ЛПД в циліндричному резонаторі, а загальний вигляд на рис. 4.5.

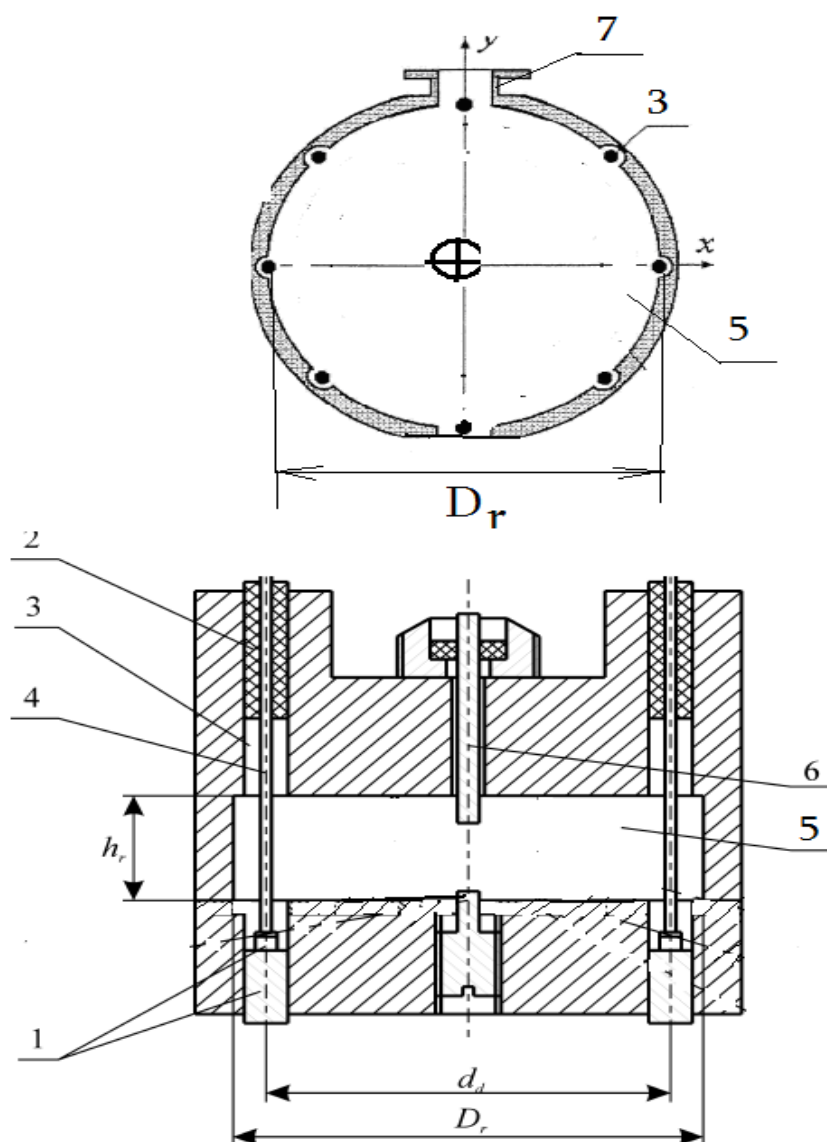


Рис. 4.4. Ескіз конструкції восьмідіодного генератора сантиметрового діапазону довжин хвиль

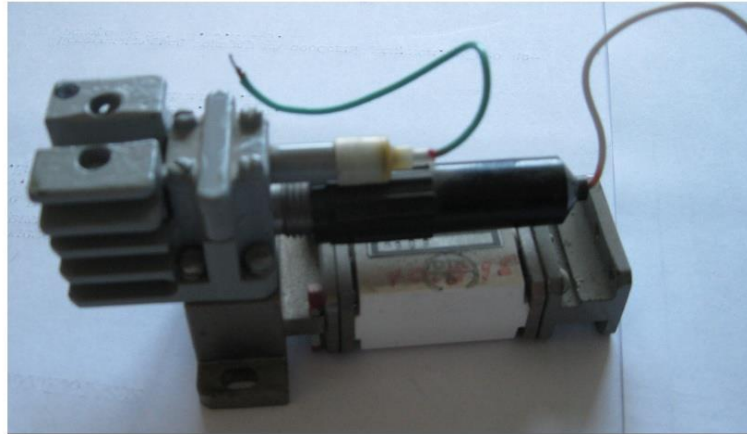


Рис. 4.5. Загальний вигляд восьмидіодного генератора

Циліндричний резонатор 5 (рис. 4.5) виготовлений з латуні з параметрами: висота резонатора 17 мм, діаметр 43 мм.

Діоди 1 (3A750B) на тепловідвідних мідних підставах, спільно з антипаразитними навантаженнями 2 встановлені в коаксіальних лініях 3.

Коаксиальна лінія 3 із зовнішнім діаметром 7,2 мм, діаметром внутрішнього провідника 3 мм і діодом 1 навантажена на антипаразитний опір 2 з ферропексида величиною 0,5 Ом. Внутрішні провідники 4 забезпечують підведення напруги джерела живлення до діодів. Зв'язок з навантаженням здійснюється хвилеводом 7 перетином 23x10 мм. Механічне підстроювання частоти генератора проводиться металевим штирем 6. При розробці суматора потужностей використані стандартні хвилеводні елементи перетином 23x10 мм: ферритові вентиля ФВВН2-4, циркулятори Зцв-100В, атенюатори ДЗ-33, фазообертачі ФВВ-3Н, трійники.

Схема установки на якій проводилися вимірювання спектральних і енергетичних характеристик імпульсних ГЛПД приведена на рис. 4.6, а її зовнішній вигляд на рис. 4.7.

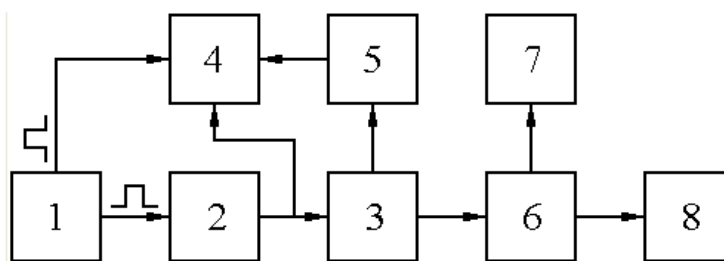


Рис. 4.6. Схема вимірювальної установки

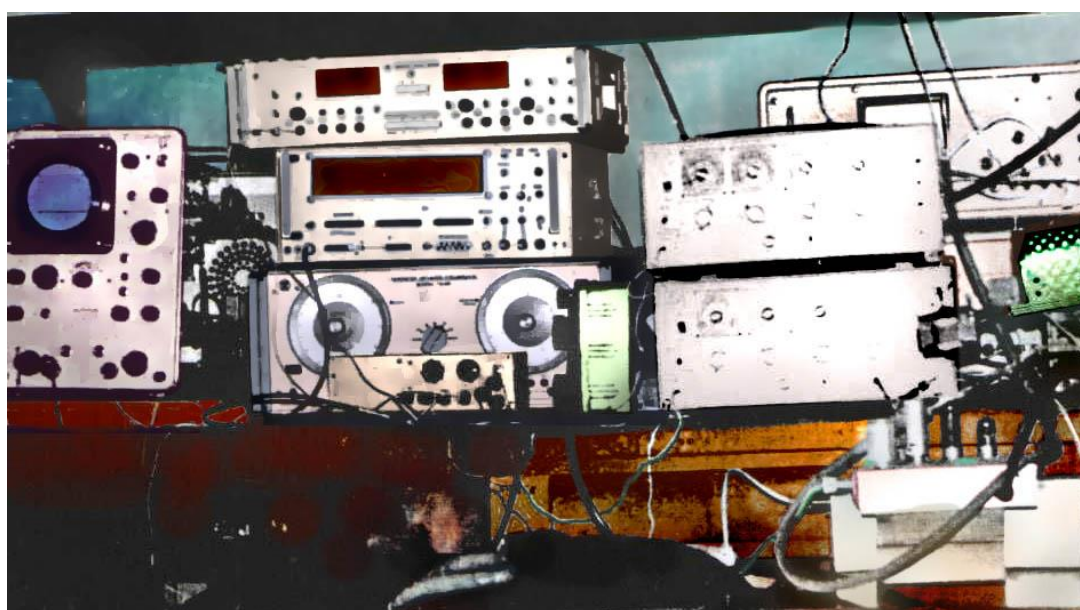


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд установки для дослідження параметрів радіоімпульсного джерела потужності

Живлення генератора здійснювалося від генератора імпульсів Г5-15 і підсилювача потужності. Сигнал від генератора (модулятора) прямокутних імпульсів 1 і підсилювача потужності 2 надходив на досліджуваний імпульсний суматор потужностей 3 на ЛПД, розміщений в циліндричному резонаторі. Вихідний сигнал через відгалужувач 6 подавався на вимірювач потужності 8 і

на аналізатор спектру С4-27. Форма імпульсів струму спостерігалася на екрані двохпроменевого осцилографа С1-70.

На рис. 4.8 представлена огинаюча спектра вихідного сигналу багатодіючого суматора $CN = 16$ в смузї синхронізації. У всіх режимах роботи ГЛПД спостерігається запізнювання НВЧ-імпульсу вихідного сигналу щодо імпульсу струму живлення. Це запізнювання становить 10-20 нс, причому ця величина збігається з тривалістю фронту імпульсу струму живлення діода.

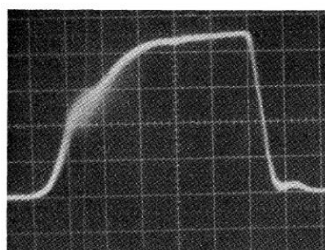


Рис. 4.8. Спектр вихідного сигналу

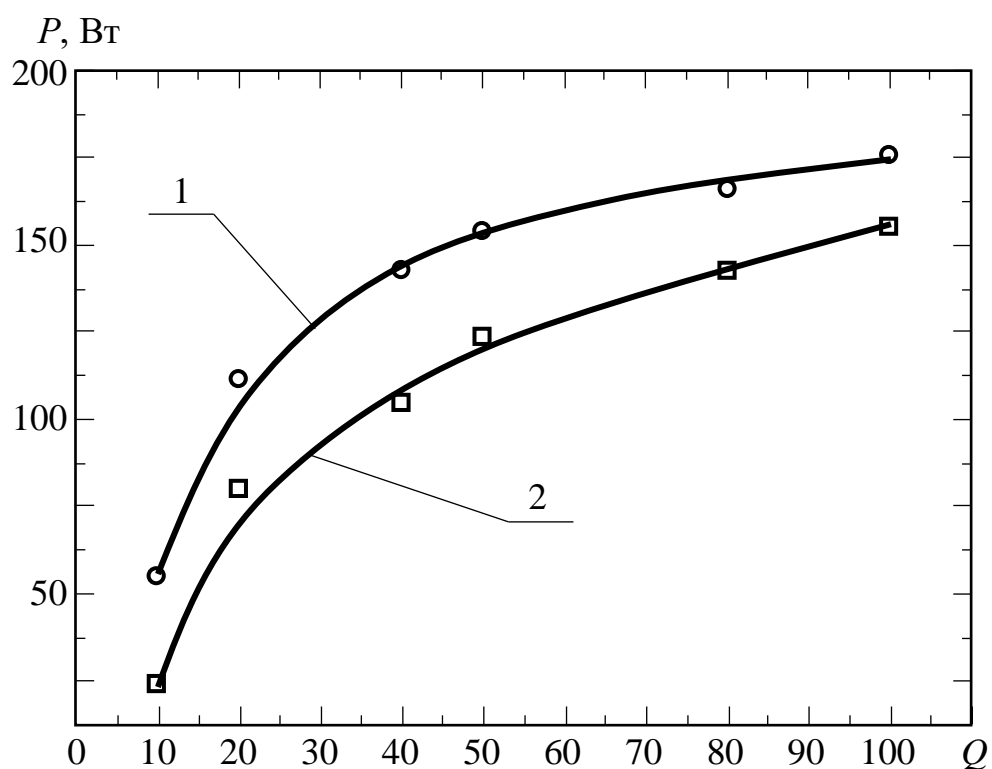


Рис. 4.9. Залежність імпульсної потужності восьмидіючого генератора від шпаруватості імпульсів

На рис.4.9 наведені експериментальні залежності імпульсної потужності P_i відшпаруватості Q для тривалості імпульсу $\tau_i = 0,1$ мкс (1) и $\tau_i = 0,3$ мкс (2).

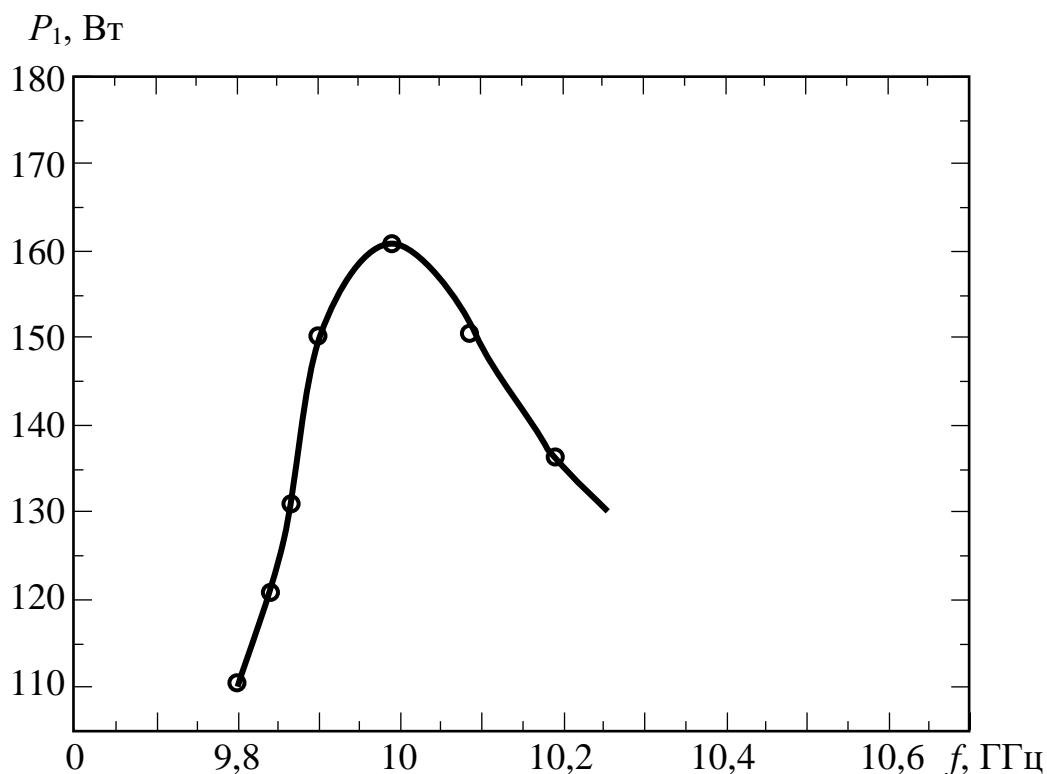


Рис. 4.10. Залежність рівня вихідної імпульсної потужності багатодіючого (= 16) генератора від частоти заповнення імпульсів ($\tau_u = 100$ нс, $Q = 100$)

4.3 Експериментальне дослідження характеристик широкопasmової антени для обробки ікри осетрових риб

Параметри антени мають наступні значення: діаметр розкриву головного дзеркала – 190 мм, контррефлектора – 58 мм, радіус розкриву опромінювача – 15 мм, дійсна піввісь гіперболоїда – 28 мм, фокусна відстань контррефлектора – 110 мм. Загальний вигляд параболічної антени наведено на рис. 4.11.

В якості першого етапу експериментального дослідження випромінювача проаналізуємо відбиття від параболічної антени, навантаженої на вільний

простір. Для цього використовуємо панорамний вимірювач КСХН (коефіцієнт стоячої хвилі напруги) P2-61, робота якого заснована на принципі рефлектометра, тобто роздільного виділення сигналів, пропорціональних потужності, падаючої від генератора і відбитої від антени.



Рис. 4.11. Загальний вигляд параболічної антени

Сигнали, пропорційні падаючій і відбитій потужностям, знімаються з детекторних головок, вбудованих у вторинні тракти спрямованих відгалужувачів. Генерування високочастотного сигналу в смузі $8,24 \div 12,05$ ГГц відбувається в генераторі з хитанням частоти (ГХЧ), виконаному на діодах Ганна. Він забезпечує такі режими перебудови частоти: ручна перебудова частоти; ручне хитання частоти; автоматичне хитання частоти з тривалістю періодів 0,08; 1; 10 с; разове хитання частоти з тривалістю періоду 40 с і ручним запуском. Результати вимірювання КСХН рупорної антени представлені на рис. 4.9. З графіка видно, що навіть в смузі частот, яка забезпечується вимірником P2-61, середнє значення КСХН становить величину рівну 1,5, що відповідає коефіцієнту відбиття від розкриття $\Gamma = 0,2$. Це дозволяє говорити, що навіть в

розглянутому частотному діапазоні практично вся підведена до розкриву антени потужність випромінюється у вільний простір.

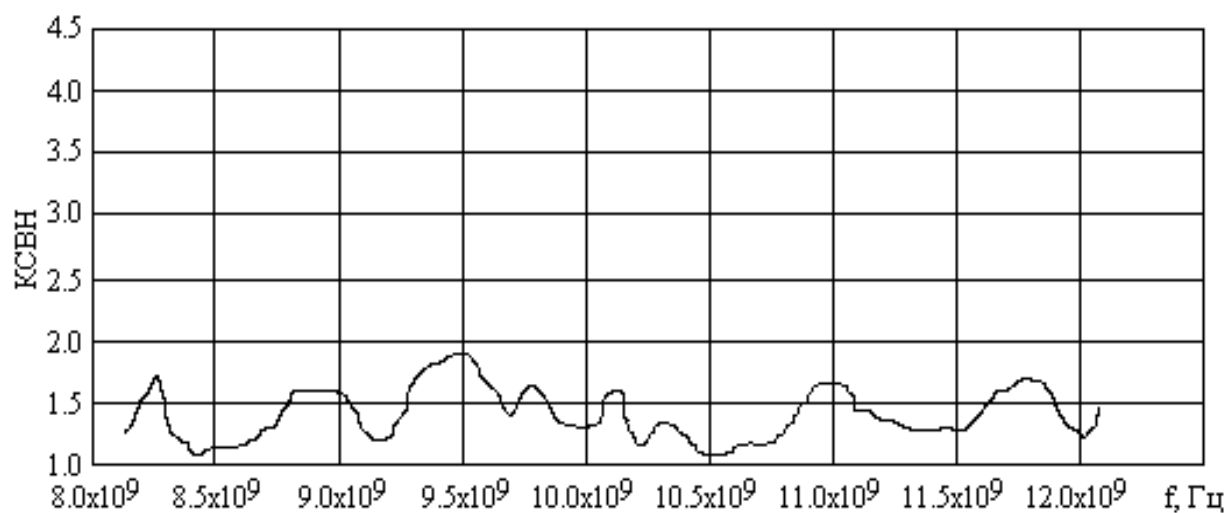


Рис. 4.12. КСВН рупорного випромінювача, навантаженого на вільний простір.

Для вимірювання діаграми спрямованості виготовленого параболічного випромінювача була розроблена блок-схема експериментальної установки, яка приведена на рис. 4.13.

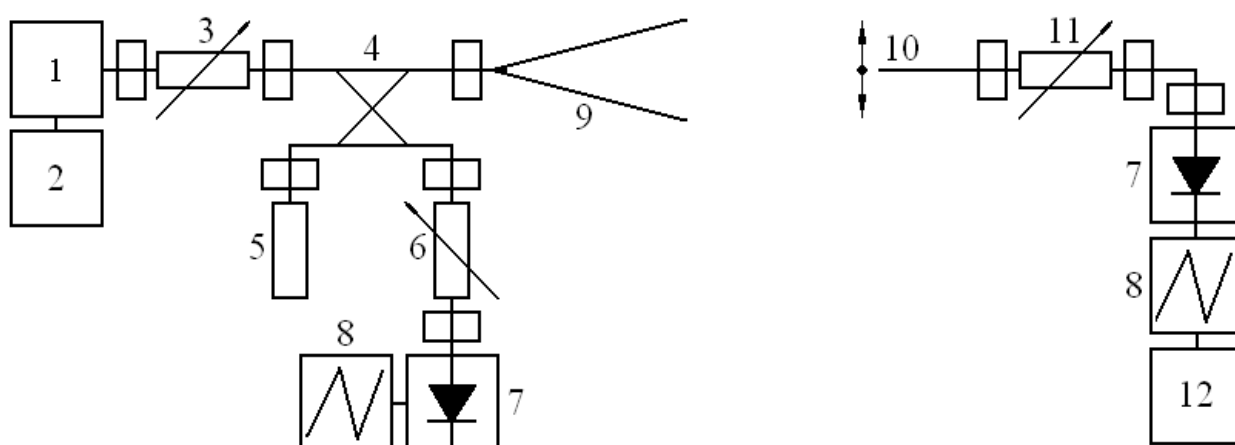


Рис. 4.13. Блок-схема вимірювальної установки.

Як видно з рисунка, схема складається з двох частин. До складу передавального тракту входять: напівпровідниковий імпульсний генератор 1 з блоком живлення 2; інсталяційний атенюатор 3 і параболічна антена 9. У схемі передбачений додатковий канал для контролю роботи передавального генератора. Тому в експериментальну установку включені: спрямований відгалужувач 4; інсталяційний атенюатор 6; детекторна секція 7; осцилограф 8 типу С4-27, який якраз і дозволяє вимірювати імпульсні сигнали в часовому діапазоні від 0,1 мкс до 0,5 с. Для усунення можливих перевідбиттів в тракті в друге плече спрямованого відгалужувачі 4 включене узгоджене навантаження 5. До складу приймального тракту входять: вимірювальний зонд 10, що представляє собою відкритий кінець трисантиметрового хвилеводу перетином 23×10 мм; поляризаційний атенюатор 11; детекторна секція 7; стробоскопічний осцилограф 8, який за допомогою USB кабеля з'єднаний з персональним комп'ютером 12. Весь приймальний тракт зібраний на рухомій платформі, яка може переміщатися з кроком до 1 см.

Результати експериментальних вимірювань ЕДС в площині XOZ , яка відповідає площині вектора \mathbf{H} основної хвилі у хвилеводному тракті, представлені на рис. 4.14. Дослідження проведені саме для цієї площини тому, щоб можна було порівняти розрахунок з експериментом. Як видно з малюнка, ЕДС при збудженні рупорного випромінювача широкосмуговим сигналом більш гладка, ніж в разі порушення цієї ж антени монохроматичним сигналом [116]. Цей висновок добре узгоджується з виконаними теоретичними розрахунками. Максимальна відміна виміряної і розрахованої ЕДС параболічної антени не перевищує 10%. Це говорить про те, що методика розрахунку параболічних антен, збуджуваних широкосмуговими сигналами, може бути з успіхом застосована для побудови випромінюючих систем не тільки в сантиметровому, але і в міліметровому діапазоні. Завдяки цьому можуть відкритися широкі перспективи по вивченню впливу радіоімпульсного випромінювання міліметрового діапазону на біологічні об'єкти.

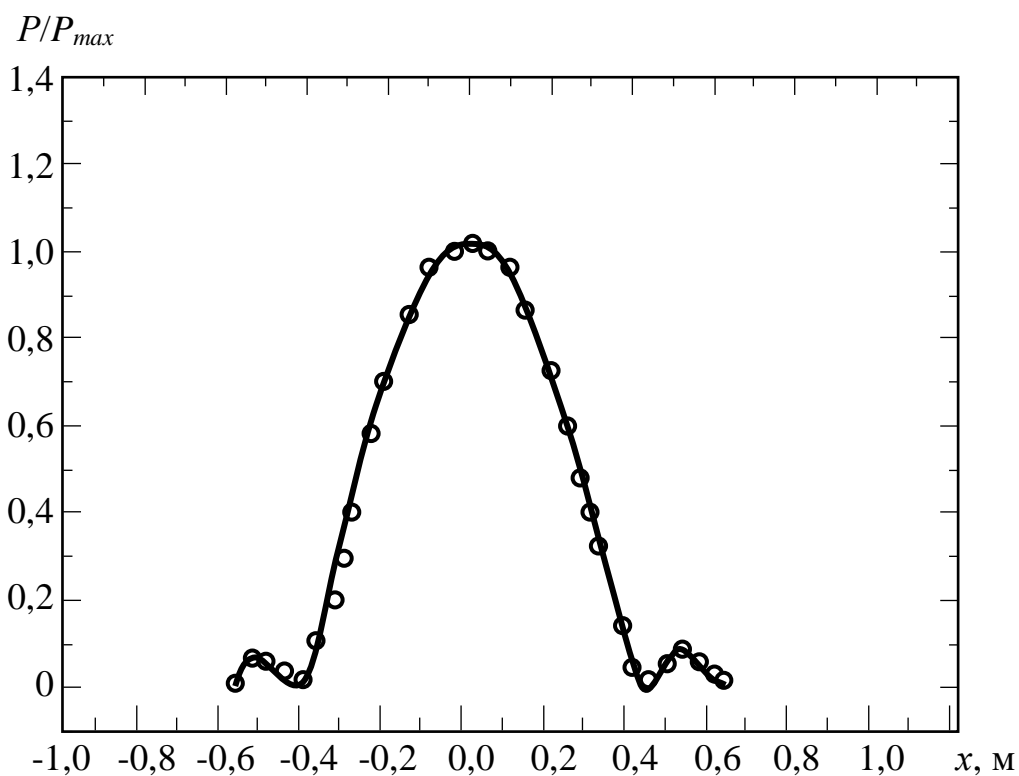


Рис. 4.14. Експериментально виміряна ЕДС параболічного випромінювача в площині вектора H основної хвилі в прямокутному хвилеводі.

4.4. Експериментальні дослідження по впливу електромагнітного випромінювання на репродуктивну здатність осетрових риб

Для отримання потомства, виробників витримують окремо в спеціальних ставках або басейнах з теплою водою. Для дозрівання статевих продуктів вводять в м'язи тіла гіпофізи сазана або коропа. Самки піддаються дробовій, самці – одноразовій ін'єкції, рибу позначають, після ін'єкцій дозрівання настає через 9 – 10 годин. У дозрілих самок ікру, 400 – 800 тис. штук, відціджують і запліднюють спермою самців. Після запліднення ікру промивають очищеною ставковою водою і закладають у спеціальні апарати Вейса. Інкубація триває 18 – 32 години. Запліднена ікра сильно набухає, збільшується у діаметрі, стає більш легкою та стає плавучою. Структура апарата Вейса приведена на рис. 4.14.

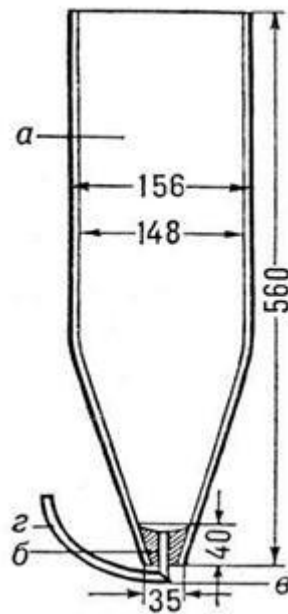


Рис. 4.15. Апарат Вейса: а – інкубаційний посуд; б – пробка; в – мідна трубка; г – шлангводопостачання.

Апарат Вейса [115] використовують для інкубації дрібної ікри. Він являє собою циліндричну скляну, буває з органічного скла, посудину, що звужується донизу (перегорнута велика пляшка без дна). Висота апарату – 56 см, діаметр верхнього отвору – 16 см, нижнього отвору – 3,5 см. Зовнішній кінець цієї трубки з'єднаний з гумовим шлангом, по якому надходить в апарат вода з водопровідного крану. Щоб не було «мертвого» простору над трубкою у стінок посудини там, де відсутні струми води, це місце заповнюють воском або менделєєвською замазкою, або просто пробці надають потрібну увігнуту форму. Нижній отвір щільно закритий пробкою зі вставленою в неї металевою трубкою, через яку під тиском подається вода, що піднімається вгору уздовж стінок посудини. Над пробкою укладають металеву сітку. Струмені води, що йдуть з водопровідного крану, поступають під натиском в нижню частину посудини і піднімають вгору вміщену в апарат ікру. У верхній частині судини натиск води слабшає, тому ікринки починають поступово опускатися в нижню частину де вони підхоплюються струменями води і знову захоплюються вгору.

Таким чином, протягом усього періоду інкубації, ікра перебуває у безперервному русі в товщі води.

Скидання води з апарату відбувається через зливний носик, зроблений в залізному обручі, що обгортає верхні краї посудини. Перед зливним носиком встановлена решітка, що оберігає від виносу з апарату ікринок і вилупившихся предлічинок. Апарат Вейса встановлюють в стійці (рис. 4.15) яка має два гнізда, одне з яких утримує нижню частину, а інше – середню частину судини, причому апарат обов'язково повинен стояти в строго вертикальному положенні. В іншому випадку струмені води спрямовуватимуться по одній стороні судини, що може викликати нерівномірне обертання ікринок і замори в окремих частинах апарату. Апарати Вейса зазвичай монтують по 10 – 20 шт. на одній стійці, причому для кожного з них обов'язково підводиться незалежне водопостачання. Скидання води з апаратів здійснюється спочатку в загальний водоскидний лоток, що лежить під стійкою, а з нього – в каналізаційну мережу витрата води в апараті – 3 – 4 л/хв.



Рис. 4.16. Встановлений апарат Вейса.

Ембріони, що проклонулися з ікри, випускають у спеціальні уловлювачі-садки. В апаратах вони ростуть до переходу на змішане годування. Надалі йдуть у ставки на відрощування. Хімічний склад та енергетична цінність ікри стерляді для лабораторних та виробничих робіт приведена в таб.4.1.

Таблиця 4.1

Хімічний склад та енергетична цінність ікри стерляді

Ікра-сирець	Білок	Ліпіди	Склад, % сума білків і ліпідів	Енергетична цінність на 100 г продукту,		
				кДж	ккал	
Стерлядь	20,0+0,3	8,7+0,7	28,7	708,0	168,5	

Оптимальний температурний режим для розвитку ікри стерляді був установлений в межах 20 – 23° С. У віці 3 – 10 діб вибирали температурну зону 20 – 22° С, 10 – 20 діб – 18,5 – 20,5° С, 20 – 35 діб – 16 – 18,5° С, 35 – 45 діб – 14,5 – 16° С, а 45 – 60 діб – 12 – 14,5° С. Солоність води 2 – 3%. Через 15 діб солоність води встановлювалася до 6%.

Для визначення оптимальних параметрів інформаційного імпульсного електромагнітного випромінювання (частота заповнення імпульсів, напруга в імпульсі, тривалість і період проходження імпульсів, експозиція) був проведений багатофакторний експеримент, в якому в якості відгуку на опромінювання було взято вихід мальків з ікри стерляді, опромінених радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням. Лабораторні дослідження проводились в лабораторії рибзаводу г Миколаєва.

Значення факторів, і їх інтервали варіювання наведені в табл. 4.1 і 4.2. При використанні рототабельного плану другого порядку, у якості ядра планування була застосована напіврепліка для п'яти чинників.

Для даної методики були складені матриці: планування експерименту, розрахунку коефіцієнтів регресії, визначення дисперсії адекватності та

результатів обробки даних, які наведені в додатку Б. Після проведення вимірювань та розрахунків отримано рівняння регресії, пов'язане з параметрами руху сперміїв і параметрами інформаційного імпульсного ЕМП.

Таблиця 4.2

Кодування факторів розглянутого процесу

Інтервал варіювання і рівень факторів	Частота радіоімпульсів, ГГц	Величина потужності в імпульсі, Вт	Період проходження імпульсів, с	Тривалість імпульсів, с	експозиція опромінення, с
Нульовий рівень, x_i	9,0	150,0	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	30
Інтервал варіювання, δ_i	1,0	10,0	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-7}$	5
Нижній рівень, $x_{i=-1}$	8,0	140,0	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	25
Верхній рівень, $x_{i=+1}$	10,0	160,0	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	35
Кодові позначення	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5

Дані для побудови ротатбельного плану другого порядку

Число факторів, k	Число точок ядра	Число зіркових точок, N_a	Число нульових точок, N_0	Зіркові точки, a	Число дослідів, N
5	16	10	6	2,0	32

$$Y = 133,0 + 15,0X_1 + 13,0X_2 + 9,0X_3 + 9,0X_4 + 12,0X_5 + 17X_1X_2 + 15,0X_1X_3 + 15,0X_1X_4 + 14,0X_1X_5 + 13,0X_2X_3 + 13,0X_2X_4 + 14,0X_2X_5 + 5,0X_3X_4 + 6,0X_3X_5 + 7,0X_4X_5 + 6,0X_1^2 + 5,0X_2^2 + 13,0X_3^2 + 12,0X_4^2 + 13,0X_5^2,$$

де Y —кількість мальків з ікри стерляді; X_1 — частота заповнення імпульсів;

X_2 —величина потужності в імпульсі; X_3 — період проходження імпульсів;

X_4 — тривалість імпульсів; X_5 — час опромінення дози ікри.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії проводилася при рівні значущості $\alpha = 0,01$ за критерієм Стьюдента [117, 118]. Всі коефіцієнти в рівняння 4.1 виявилися значущими.

На підставі перевірки даних рівнянь на адекватність за критерієм Фішера [117] зроблено висновок, що рівняння описують реальний процес і, отже, дозволяють оцінити характер впливу кожного з 5 факторів на функції відгуку.

Крім того, стало можливим практичне використання отриманої моделі для прогнозування значення вихідного сигналу в області вирівнювання параметрів X_j .

Для знаходження оптимальних параметрів процесу система рівнянь, отриманих прирівнюванням до нуля значень градієнтів компонентів, обчислена з виразу:

$$\frac{dY}{dX_1} = b_1 + 2b_n X_1 + \sum_{j=1}^n b_{1j} X_1, \quad (4.4)$$

де X_1, X_j – кодоване значення факторів, за якими береться похідна і взаємодіючі з ним, відповідно;

b_1, b_n, b_{1j} – коефіцієнти рівнянь регресії.

Для виразу (4.1) отримана наступна система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 15,0 + 17,0X_2 + 15,0X_3 + 15X_4 + 14X_5 + 12X_1 = 0. \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 13,0 + 17,0X_1 + 13,0X_3 + 13,0X_4 + 14,0X_5 + 10X_2 = 0. \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = 9,5 + 15,0X_1 + 13X_2 + 5,0X_4 + 6,0X_5 + 26X_3 = 0. \\ \frac{\partial y}{\partial x_4} = 9,0 + 15,0X_1 + 13,0X_2 + 5,0X_3 + 7,0X_5 + 25X_4 = 0. \\ \frac{\partial y}{\partial x_5} = 12,0 + 14,0X_1 + 14,5X_2 + 6,5X_3 + 7,0X_4 + 27,0X_5 = 0. \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Розв'язок системи рівнянь (4.5) дає наступні значення чинників в оптимальній точці:

$$X_1 = 1; X_2 = 1; X_3 = -1; X_4 = -1; X_5 = -1,$$

що відповідає таким значенням натуральних параметрів:

- частота заповнення імпульсів – $10,0 \pm 0,02$ ГГц;
- амплітуда потужності в імпульсі – $160,0 \pm 5$ Вт;
- період проходження імпульсів – $1,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,1 \cdot 10^{-5}$ с;
- тривалість імпульсів – $1,0 \cdot 10^{-7} \pm 0,1 \cdot 10^{-7}$ с;
- експозиція опромінення дози ікри – 25 ± 2 с.

Лабораторні дослідження показали, що опромінення ікри стерляді збільшує життєздатність ікри на 40 – 45 % в порівнянні з неопроміненою.

Таблиця 4.4

Показники вирощування молоді осетрових риб

Показники	Стерлядь, контроль	Стерлядь, дослід
Масапчаткова, г	15+3,2	18+5,1
Масакінцева, г	27+5,7	35+4,6
Абсолютний приріст, г	12	17
Середньодобовий приріст, г	0,4	0.56
Відносна швидкість росту, %	57,14	74,15
Тривалість вирощування, дні	30	30
Вихід мальків, %	40	85
Вживаємість, %	86,7	99,78

Аналіз отриманих даних показує, що в досліді початкова вага мальків стерляді була на 20 % більше, ніж в контролі. Через 30 діб маса стерляді в досліді була на 30 % більше, ніж в контролі. В процесі виробництва було встановлено, що відносна швидкість росту в досліді була на 17 % більше ніж в контролі. Вживання мальків в досліді було на 13 % більше, ніж в контролі.

Економічна ефективність від впровадження інформаційної радіоімпульсної електромагнітної технології для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб склала 28000 грн. на 1 кг ікри.

4.5 Алгоритмічно-програмне забезпечення технології

Розроблена система відноситься до класу автоматизованих інформаційних систем, а тому ця система складається із персоналу та комплексу засобів автоматизації його діяльності, що реалізую інформаційну технологію визначених функцій. Дана система повинна забезпечувати автоматизовану діагностику та

керування комплексом параметрів, які є вагомими для побудови оптимального процесу вирощування ікри риби.

Первинні налаштування системи полягають у виборі кількості елементів, які поєднані в єдину установку за рахунок підключення апаратних засобів, які були обґрунтовані вище.

При розробленні алгоритму роботи враховуються наступні фактори:

1. установка повинна бути багатоколбовою;
2. кожна колба має власний канал керування апаратними засобами обслуговування та індивідуальне налаштування керуючих впливів;
3. потрібно зчитувати поточні дані про рівень температури та часу роботи колби.

Такі вимоги повинні забезпечувати технологічну гнучкість процесу вирощування ікри та забезпечити універсальність всієї установки, колби якої можуть використовуватися на різних його стадіях.

Алгоритм роботи системи полягає в наступному: при увімкненні живлення блок інтерфейсу керування виконує діагностику підключених до системи колб. Сформувавши перелік адрес колб, система очікує на дію користувача, яка полягає у виборі елемента установки (конкретної колби), або всіх колб разом.

Після ідентифікації об'єкту керування необхідно здійснити вибір дії – діагностика або регуляція. Діагностика включає в себе збір інформації про об'єкт керування, а саме виводить на екран дані про поточний рівень опромінення, температуру води в колбі та час роботи установки. Регулювання включає в себе керуючі дії щодо присвоєння значень параметрів фізичних факторів, що впливають на колбу зі сторони системи. До таких факторів відноситься рівень опромінення, температура, швидкість циркуляції води. Також, регуляція дозволяє підняти екран для отримання доступу до колби і проведення обслуговуючих робіт.

Значення параметрів керуючих впливів, що виставляються для колби зберігаються в енергонезалежній пам'яті системи та витримуються протягом роботи або при відновленні живлення. Ці параметри є незмінними до тих пір, коли користувач не введе інші значення.

Навігацію по меню та вибір значення параметрів користувач здійснює за допомогою матричної клавіатури та курсору.

В спокійному стані, система перманентно отримує дані про поточну температуру води в колбах і на основі цих даних аналізує кількість кисню, що розчинений в ній. Даний аналіз проводиться по алгоритму, що представлений на рис. А1. Згідно поданого алгоритму, центральний блок інтерфейсу системи, маючи список підключених блоків керування колбами, періодично (1 раз за хвилину) подає запит на отримання температури води до кожного периферійного блоку.

Висновки по розділу

1. Для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб слід використовувати інформаційне електромагнітне джерело з параметрами:

- частота заповнення імпульсів – $10,0 \pm 0,02$ ГГц;
- амплітуда напруги в імпульсі – $160,0 \pm 5$ Вт;
- період проходження імпульсів – $1,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,1 \cdot 10^{-5}$ с;
- тривалість імпульсів – $1,0 \cdot 10^{-7} \pm 0,1 \cdot 10^{-7}$ с;
- експозиція опромінення дози ікри – 25 ± 2 с.
- відносна нестабільність частоти – $1,6 \cdot 10^{-6}$.

2. Встановлено, що для ефективної роботи системи підвищення репродуктивної здатності осетрових риб слід використовувати широкопasmову параболічну антену з параметрами: діаметр розкриття головного дзеркала – 190 мм; контррефлектора – 58 мм; радіус розкриття опромінювача – 15 мм; дійсна піввісь гіперболоїда – 28 мм; фокусна відстань контррефлектора – 110 мм; КСХН не більше 1,8; енергетична діаграма спрямованості – 30 см.

3. Економічний ефект від впровадження інформаційної радіоімпульсної електромагнітної технології підвищення репродуктивної здатності осетрових риб склав 28000 грн. на 1 кг ікри.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі на підставі теоретичних і експериментальних досліджень створено інформаційну радіоімпульсну електромагнітну технологію і технічну систему радіоімпульсного електромагнітного випромінювання в сантиметровому діапазоні довжин хвиль для підвищення репродуктивної здатності осетрових риб при їх промисловому виробництві. Все це дозволяє вирішити одне з головних завдання, яке спрямоване на забезпечення харчової безпеки нашої країни.

1. На основі аналізу фактичного матеріалу вітчизняних і зарубіжних публікацій встановлено, що для збільшення виходу життєздатних мальків з ікри осетрових риб їй необхідно опромінювати інформаційним радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням сантиметрового діапазону довжин хвиль.

2. У процесі теоретичного аналізу розробленої моделі було встановлено, що підвищення життєздатності мальків з ікри стерляді їй слід опромінювати радіоімпульсним ЕМВ з параметрами: тривалість імпульсів $0,5 \cdot 10^{-7} \text{с} \leq \tau \leq 1,5 \cdot 10^{-7} \text{с}$; період повторення імпульсов $0,5 \cdot 10^{-5} \leq T \leq 1,5 \cdot 10^{-5} \text{с}$; шпаруватість імпульсів може бути $q = T/\tau \cong 100$; напруженість електричного поля $E_0 = 70 \text{ В/м}$, $E_{cp} = 49 \text{ В/м}$; величина потужності радіоімпульсів становить 160 Вт ; частота заповнення імпульсів 10 ГГц ; час експозиції $40 \dots 45 \text{ с}$.

3. Для створення радіоімпульсних генераторів слід використовувати корпусовані ЛПД типу 3А750В з параметрами: діапазон частот $9 - 11 \text{ ГГц}$; імпульсна потужність $P_i = 18 \text{ Вт}$; імпульсний струм $I_i = 25 \text{ А}$; імпульсна потужність 160 Вт ; $\tau_i = 100 \text{ нс}$, $Q = 100$; параметри корпуса: $C_k = 0,3 \text{ нФ}$, $L_k = 0,4 \text{ нГн}$, $C = 0,25 \text{ нФ}$.

4. Число діодів, необхідних для отримання на виході суматора потужності 160 Вт , дорівнює 16. У кожному каскаді суматора використовується по 8 діодів,

включених в загальну електродинамічну систему, циліндричний резонатор, для величини втрат $L = 0,2$ дБ.

5. Для виконання вимоги когерентності і стабільності амплітудно-фазових параметрів в імпульсному режимі використовуємо зовнішню синхронізацію імпульсних генераторів високостабільним безперервним сигналом. Як джерело вхідного сигналу використовуємо генератор на ЛПД, із стабілізуючим високодобротним об'ємним резонатором прохідного типу.

6. Для проведення інкубації ікри стерляді, опроміненої інформаційним радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням, необхідно використовувати апарат Вейса з параметрами: висота апарату – 56 см, діаметр верхнього отвору – 16 см, нижнього отвору – 3,5 см.

7. Виробничі дослідження з ікряю стерляді, опроміненою радіоімпульсним електромагнітним випромінюванням, показують, що в досліді початкова вага мальків стерляді була на 20 % більше, ніж в контролі. Через 30 діб маса стерляді в досліді була на 30 % більше, ніж в контролі. В процесі виробництва було встановлено, що відносна швидкість росту в досліді була на 17 % більше, ніж в контролі. Вживання мальків в досліді було на 13 % більше, ніж в контролі.

8. Економічний ефект від впровадження інформаційної радіоімпульсної електромагнітної технології підвищення репродуктивної здатності стерляді склав 28000 грн. на 1 кг ікри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Детлаф Т.Л. Развитие осетровых рыб. (Созревание яиц, оплодотворение, развитие зародышей и предличинок) / Т.Л. Детлаф, А.С. Гинзбург.- М.: Наука, 1981.-224с.
2. Дехтяров П.А. Фізіологія рыб: підручник/ П.А. Дехтяров, М.Ю. Євтушенко.-К.: Аграрна освіта, 2008.-341с.
3. Рекомендации по технологии выращивания осетровых рыб в условиях рыбоводных хозяйств Северного Казахстана. – Алматы. – 2011. – 40 с. <http://www.slideshare.net/slavalist/ss-11868688>.
4. Рыбоводно-биологические показатели молоди белуги, стерляди, русского осетра и севрюги при выращивании в системе УЗВ <http://cyberleninka.ru/article/n/rybovodno-biologicheskie-pokazateli-molodi-belugi-sterlyadi-russkogo-osetra-i-sevryugi-pri-vyraschivanii-v-sisteme-uzv>.
5. Е.Г. Васильева, И.В. Мельник. Некоторые аспекты влияния электромагнитного поля на десятиногих ракообразных. // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2009. – №1. – С.121-125.
6. Мухачев И.С. Влияние факторов среды на численность русского осетра / Мухачев И.С.- Тюмень, 2003.-176с.
7. Киреева И.Ю. Оценка физиологического состояния производителей русского осетра / И.Ю. Киреева, И.С. Кононенко // Научные ведомости БелГУ. Серия естественные науки.-2010.-№15 (86). Вып.12.-С.94-97.
8. Касимов Р.Ю. Изменение отношения к свету и температуре у некоторых видов курильских осетровых в раннем онтогенезе / Р.Ю. Касимов // Осетровое хозяйство в водоёмах СССР.-М.: Изд-во АН СССР.-1963.-С. 65-68.
9. Касимов Р.Ю. Изучение реакций зародышей, личинок и молоди осетровых на разную освещённость / Р.Ю. Касимов // Новое в рыбохозяйственных исследованиях Азербайджана.-Баку.-1973.-С.118-131.

10. Касимов Р.Ю. Суточный ритм двигательной активности видов осетровых рыб и их гибридов / Р.Ю.Касимов // Зоол. журнал.-1961.-Т. 40, вып. 1. – С.63-72.
11. Власов В.А. Влияние света на рост и развитие рыб / В. А. Власов, Н.И. Маслова, С.В. Пономорёв // Вестник АГТУ. Сер. Рыбное хозяйство.-2013.- №2.-С. 24-32.
12. Е.Г. Васильева. Механизм влияния электромагнитных полей на живые организмы // «Вестник АГТУ». – 2008. – №3(44). – С.186-191
13. Shwan H. P. Microwave radiation: biophysical considerations and standards criteria / H.P. Shwan // IEEE Trans Biomed. – 1972. – Vol.19. – №4. – P.67-74.
14. Хандола О.Ю. Использование электромагнитных излучений миллиметрового диапазона в ветеринарии и биологии / О.Ю.Хандола // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – Вип. 142. – С. 81 – 83.
15. Sher L. D. In the possibility of no thermal biological effects of pulsed electromagnetic radiation / L.D. Sher, E. Kresch, H.P Shwan // Biophys S. – 1970. – Vol. 10. – P. 970-979.
16. Тучный В.П. Микроволновые технологии в современной структуре технологического процесса / В.П. Тучный // Сб. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. – Одесса: ОКФА, 2000. – С. 6-12.
17. Брюхова А.К. Влияние ЭМП миллиметрового диапазона, лазерного излучения и их комбинационного действия на свойства микроорганизмов / А.К. Брюхова // Электронная промышленность. – 1985. – Вып.39. – С.6-9.
18. Webb S.I. Genetic continuity and metabolic frequencies on these phenomena / S. I. Webb // Ann.N.Acad.Sci. – 1975. – №247. – P.327-351.
19. Наумчева Н.Н. Применение электромагнитных волн миллиметрового диапазона в медицине / Н.Н. Наумчева // ММ-волны в биологии и медицине. – 1995. – №6. – С. 26-30.

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

21. Всесоюзное научно-производственное совещание по применению оптического излучения в сельскохозяйственном производстве при выполнении производственной программы: тезисы докладов // Львов, 1984. – 86 с.

22. Севостьянов Л.А. Особенности воздействия радиоволн миллиметрового диапазона в комбинации с фторафуром на кроветворную систему / Севостьянов Л.А., Потапов С. Л. // Биологические науки. – 1967. – № 12. – С. 48 – 50.

23. Pazderova–Vey. Proceedings: Influence of pulsed microwaves on hematopoiesis of adolescent rate / Pazderova–Vey, V. Zupkova., Z. Frank // Microwave Power. – 1976. – Vol. 11, № 2. – P. 133 – 142.

24. Kagi P. Hematological studies on changes caused by warming of the blood with microwaves / P. Kagi., R. Riegg., P.W. Straub., G. Hossli // Inflationsther. Klin. Ernach. – 1977. – Vol. 4, № 5. – P. 285 – 289.

25. Суббота А. Г. Нетепловые действие микрорадиоволны на организм животных (обзор литературы) / Суббота А. Г. // ВМЖ. – 1970. – Вып. 40. – С. 39 – 45.

26. Всесоюзное научно-производственное совещание по применению оптического излучения в сельскохозяйственном производстве при выполнении производственной программы: тезисы докладов (Львов, 11-14 сентября 1984 г.) – Львов, 1984. – 86 с.

27. Лисиченко М.Л. Вплив форми лазерного світлового пучка на ефективність опромінення яйця / М.Л. Лисиченко // Вісник ХДТУСГ «Питання електрифікації сільського господарства». – Харків: ХДТУСГ, 2000. – С. 193-198.

28. Webb S. I. Microwave absorption by normal and tumoscellg / S.I. Webb, A.V. Booth // Ann. N. Acad. Seb. – 1971. – №174. – P.72-74.

29. Webb S.I. Genetic continuity and metabolic reguencies on these phenomena / S. I. Webb // Ann. N. Acad. Seb. – 1975. – № 247. – P. 327-351.

30. Сасімова І.А. Обґрунтування інформаційних електромагнітних методів і оптико-електронних систем. Збільшення продуктивності тварин: автореф. дис.

канд. техн. наук: 05.11.17 / Сасімова Інна Анатоліївна; Харківський нац. техн. ун-т сільськ. госп. ім. П. Василенка. – Х.: ХНТУСГ, 2009. – 24 с.

31. Сорокін М. С. Імпульсна електромагнітна технологія та технічні системи підвищення відтворення тварин: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.17 / Сорокін Максим Сергійович; Харківський нац. техн. ун-т сільськ. госп. ім. П. Василенка. – Х.: ХНТУСГ, 2011. – 23 с.

32. Парпиев Б. А. Влияние экологических факторов на физиологические процессы у тутового шелкопряда / Б. А. Парпиев // Труды среднеазиатского научно-исследовательского института. – Ташкент, 1976. – Т.9. – С. 97-104.

33. Золотин А.З. Занимательное шелководство / А.З. Золотин. – К.: Урожай, 1984. – 70 с.

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

35. Барсуков Н.А. Ветеринарная физиотерапия / Н.А. Барсуков. – Иркутск: Из-во Иркутского университета, 1985. – 144 с.

36. Хандола О.Ю. Влияние на продуктивность тутового шелкопряда информационного ЭМП: тезисы материалов XVIII научно-производственной конференции [«Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT-технологий»] (Белгород, 26-27 мая 2014 г), Белгородская государственная сельскохозяйственная академия им. Б.Я. Горина.– Белгород: БелГСХА, 2014. –Т.2. – С. 20.

37. Шерстюк А.В. Электромагнитные технологии повышения иммунитета животных: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.17 / Шерстюк Александр Валерьевич; Харьковский нац. техн. ун-т сільськ. хоз. ім.П. Василенко. – Х.: ХНТУСХ, 2012. – 25 с.

38. Барсуков Н.А. Ветеринарная физиотерапия / Н.А. Барсуков. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1985. – 52 с.

39. Исмаилов Э.Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучения. / Э.Ш. Исмаилов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 144 с.

40. Девятков Н.Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н.Д. Девятков, М.Б. Голот, О.В. Бескид. – М.: Радио и связь, 1991. – 169 с.

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

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

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

44. Mandra A., Titova N. Analysis of the biophysical action of an electromagnetic field to increase the reproductivity of sturgeon fish // The Scientific Heritage (Budapest).-2020.- No. 45 (2020), P. 2.- Pp. 3-6.

45. Мандра А.В. Анализ биофизического действия электромагнитного поля для повышения репродуктивности осетровых рыб: *тези за матеріалами X міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* [«Сучасний рух науки»] (Дніпро, 2-3 квітня 2020р/Мандра А. В., Косуліна Н.Г., Титова Н.В. // М-во освіти і науки України, «Way Scisence». – Т.1.- С. 733–737.

46. Девятков Н.Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бескин. – М.: Радио и связь, 1991. – 169 с.

47. Сасимова И.А. Обоснование биофизического действия информационных электромагнитных излучений на микробиологические объекты животноводства / И.А. Сасимова, Л.Ф. Кучин // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2008. – № 4 / 2(34). – С. 27 – 29.

48. Черенков А.Д. Влияние низкоэнергетических ЭМП на клетки тканей вымени коров, больных маститом / А.Д. Черенков, Л.Ф. Кучин // Вісник ХДТУСГ. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – Вип. 6. – С. 32 – 331.

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

49. Кузнецов А.П. Электромагнитные поля живых клеток в КВЧ-диапазоне / А.П. Кузнецов // Электронная техника. Сер. 1. Электротехника СВЧ, 1991. Вып. 7 (441). – С. 3 – 6.

50. Рубин А.Б. Биофизика Т.2. Биофизика клеточных процессов / А.Б. Рубин. – М.: Высшая школа, 1987. – 303 с.

51. Nelson L. Локализация актина в сперматозоидах / L.Nelson // Biol. Bull, 1962. – № 123. – 468 p.

52. Кафиани К.А. Информационные макромолекулы в раннем развитии животных / К.А. Кафиани, А.А. Костомарова. – М.: Наука, 1978. – 335 с.

53. Бурнашева С.А. Современные проблемы сперматогенеза/ С.А. Бурнашева, Н.С. Габаева, Л.В. Данилова. – М.: Наука, 1982. – 250 с.

54. Райцина С.С. Сперматогенез и структурные основы его регуляции / С.С. Райцина. – К.: Урожай, 1985. – 204 с.

55. Koehler J.K. Lectins as probes of the spermatozoon surface / J.K. Koehler // Androl, 1981.– № 16.– P. 197 – 217.

56. 1.Filatova A.E.Research of alternative diagnostic features in intelligent computer-based cardiological decision support systems/ A.I.Povoroznyuk, A.E Filatova, O.S.Kovalenko, W.Wojcik, M. Maciejewski, M.Szarkowska, A. Tuleshova// Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097,R. 93,2017.-NR 3. – P. 125-128/

57. Bedford J.M. Granges in the electrophoretic properties of rabbit spermatozoa during passage through the epididymis // Nature (Lond.), 1963.- P. 1178 – 1180.

58. Nevo A.S. Electroforetic properties of bull and rabbit spermatozoa / A. S. Nevo, I. Michael, H. Schindler // Exp. Cell. Res., 1961.– P. 69 – 83.

59. Beilve A.R. The mamalian spermatozoon: structuro and temporat assembly / A.R. Beilve, D.A. O'Brien // Mechanism and Control of Animal Fertilization // Ed. Hartman – New York: Acad. Press. 1983.– P. 55 – 137.

60. Eddy E.N. Restricted domains of the sperm surfase. Sening Electron Microscopy / E.N. Eddy, J.K. Koehler // Ed. O. Johari.– Chicago: SEM, 1982.– P. 1313 –1323.

61. Koehler J.K. A collagen binding protein on the surfase of ejaculated rabbit spermatozoa / J.K. Koehler, E.D. Nudelman, S.A. Hakomori // J. Cell Biol, 1980.– P. 529 – 536.

62. Kraemer D.C. Collection gross charateristics and freezing of baboon semen / D.C. Kraemer, N. C.VeraCruz // J. Reprod. Fert, 1969.– P. 345 – 348.

63. Bearer E. L. Modifications amonis lipid domains / E.L. Bearer, D.S. Friend // J. Cell biol, 1982.– P. 604 – 615.

64. Bradley M.P. Effects of filipin, digitonin and polymixin B on plasma membrane of ram spermatozoa / M.P. Bradley, D.G. Rayns, I.T. Farrester // Archs. Androl, 1980.– P. 195 – 204.

65. Eshenshade K. Electroforetic characherisation on of proteins in the plasma membrane of porcine spermatozoa / K. Eshenshade, E. Clegg // J. Reprod. Fert, 1976.– 47,– № 2 – P. 333 – 337.

66. Кузнецов Л.П. Электромагнитные поля животных клеток в КВЧ диапазоне / А.П. Кузнецов. – Электронная техника, сер. 1 Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 7 (441). – С. 3 – 6.

67. Нефедов Е.И. Взаимодействие физических полей с животными существами / Е.И. Нефедов, А.А. Протопопов, А.И. Семенцов. – Тула: Из-во ТулГУ, 1995. – 264 с.

68. Selivanova, K. Determination of the basic parameters of sensor devices for the implementation of psychoneurological research with the introduction of multitouch technology / K. Selivanova, O. Avrunin, N. Kazimirov // Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 2020.No.1(11),P. 147–155.DOI:<https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.147>

[11.147](https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.147)

69. Петросян В.Н. Физика взаимодействия ММ-волн с биологическими объектами / В.Н. Петросян, Ю.В. Гуляев, Э.А. Житенева, В.А. Елкин // Российский симпозиум. «Миллиметровые волны в медицине и биологии»: Сб. докл. – М.: ИРЭ РАН. – 1995. – С. 140 – 143.

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

71. Каталог радиоизмерительных приборов 1991-1994 гг. – М.: НИИЭПР, 1995. – 386 с.

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

73. Chernin D. Threedeminsional multy-frequency large signal model for nolixtraveling wavetubes. / D. Chernin, Т.М. Antonsen, В. Levust // IEEE Trans. on Electron Devices, 2002. – Vol. ED-48, №1. – PP. 3 – 11.

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

75. Корнеенков В.К. Генераторы дифракционного излучения непрерывного и импульсного действия / В.К. Корнеенков, В.С. Мирошниченко, Б.К. Скрынник // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины, 1998. – Т.3, №1. – С. 67 – 70.

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

77. Левченко М.С. Определение параметров корпуса ЛПД на СВЧ / М.С. Левченко, В.М. Хахалкин // Труды учебных институтов связи. – Л.: ЛЭИС, 1976. Вып. 81. – С. 107 – 109.

78. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот / В.Ф. Коваленко . – М.: Сов. Радио, 1955. – 344с.

79. Ясинский В.К. Тепловой режим импульсных генераторных диодов / В.К. Ясинский // Техника и электроника, 1975. – Т. XX, №1. – С. 224-226.
80. Хижняк Н.А. Функция Грина уравнений Максвелла для неоднородных сред // ЖТФ. - 1958. - Т. 28, № 7. - С. 1592 - 1609.
81. Mandra A. Calculaton of electromagnetic pulse field in incubation capacity with sturgeon caviar/A. Mandra, E. Pirotti// The Scientific Heritage (Budapest).-2020.- No. 46 -P.1.- Pp. 20-24.
82. Березинский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Киев: Наукова думка, 1990. – 223 с.
83. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing // Progress in Electromagnetics Reserch. PIER. 35, 2001, p. 251-270.
84. Семенов А.А. Теория электромагнитных волн. М.: Изд. Моск. университет, 1968. – 317 с.
85. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: ГИФМЛ, 1958. – 647 с.
86. Дмитриев В.И., Захаров Е.В. Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 167 с.
87. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения. Методы. Алгоритмы. Программы. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1986. – 543 с.
88. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеивания электромагнитных волн / [Сиренко Ю. К., Сухаревский И. В., Сухаревский О. И., Яшина Н. П.]. – Харьков: Крок, 2000. – 344 с.
89. Анго А. Математика для электро- и радио инженеров. / М.: Наука, 1965. – 778 с.
90. Mandra A. Deternation of the electromagnetic pulse field parameters influencing the sturgeon caviar in the incubation capacity/A. Mandra,Y. Pirotti // Slovak international scientific journal.- N₀40,VOL.1.- Bratislava, 2020.-P.16 -21.
91. Рубин А.Б. Биофизика: В 2-х кн.: Учебник для биол. спец. Кн.2. Биофизика клеточных процессов / А. Б. Рубин. – М.: высшая школа, 1987.–303 с.

92. Сорокин М. С. Математическое моделирование процесса взаимодействия электромагнитных импульсов со спермой животных / Вестник национального технического университета «ХПИ». Сборник научных работ. Тематический выпуск: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», – 2009. – № 44. С. 145 – 151.

93. Исмаилов Э.Ш. Биофизическое действие СВЧ – излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

94. Пиротти Е. Л. Изменение мембранного потенциала клеток биологических объектов, находящихся во внешних электромагнитных полях / Е. Пиротти, А. Черенков // Вестник Харьковского государственного политехнического института. – Харьков: ХПГУ, 2000. Вып. 92. – С. 96 – 99.

95. Сорокин М. С. Теоретическое определение параметров импульсного ЭМП для повышения оплодотворенности спермиев животных / М.С. Сорокин, Н.Г. Косулина // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2009. – № 6/2(42). С.47 – 49.

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

97. Мандра А.В. Особенности электронных систем для повышения репродуктивных свойств осетровых рыб: *тези за матеріалами 12 міжнародної науково-практичної конференції* [«Влияние современности в науке и практике»] (Edmonton, 12-13 april 2020p.) / Мандра А.В., Чугуй Е.А., Титова Н.В. // Canada.- С.465–468.

98. Касаткин Л. Твердотельные импульсные генераторы на ЛПД миллиметрового диапазона волн / Л. Касаткин // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. -1996- Вып.2.- С.41-47.

99. Вальд-Перлов В.М., Захаров А.Л., Мартиросов И.М. Мощность, отдаваемая в нагрузку генератором на ЛПД. Полупроводниковые приборы и их применение. – Сборник статей. 1968, вып.20, с. 180-200.

100. Тагер А.С. К расчету тепловых характеристик полупроводниковых структур в режиме коротких импульсов / А.С. Тагер // Электронная техника. Серия1. Электроника СВЧ. - 1981.- Вып 5.- С.3-7.

101. Касаткин Л.В. Стабилизация СВЧ-параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД. // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 2001, том 44, №3, с. 18-25.

102. Mandra A. Analysis of energy and construction parameters of the synchronizing generator on the avalanche flight diodes // Slovak International Scientific Journal.-2020.- Vol. 1, No. 39 (2020).-Pp. 21-25.

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

104. Mandra A. Determination of the parameters of the electrodynamic system of a multi-diode generator to increase the reproductive ability of sturgeon fish // Osterreichisches Multiscience Journal.-2020.- Vol. 1, No. 26 (2020).-Pp. 47-51.

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

106. Овечкин С.М. Сложение мощностей диодов в открытом резонаторе / С.М. Овечкин, С.И. Ребров, В.П. Сазонов, А.С. Тагер // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т.10. – Вып.6. – С. 367-370.

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

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

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

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

111. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1966.- 778с.

112. Кацеленбаум Б.З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966,- 240с.
113. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. Москва, »Высшая школа», 1990, -331с..
- 114.Справочник по волноводам //под ред. Я.Н. Фельдман.- М.: Сов. радио, 1952.- 340с.
115. Атор Ю. Биологические ритмы / Ю. Атор.- М.:Наука ,1984. – 262 с.
116. Чернышев С.Л., Виленский А.Р. Пространственно-временной анализ характеристик сверхширокополосной антенны // Вопросы дифракции и распространения электромагнитных волн: межвед. сб. науч. тр. / МФТИ. – М., 2001. – С. 113-120.
117. Богданович А.И. Расчеты в планировании экспериментов / А.И. Богданович – Л.: ЛТА, 1978. – 10 с.
118. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

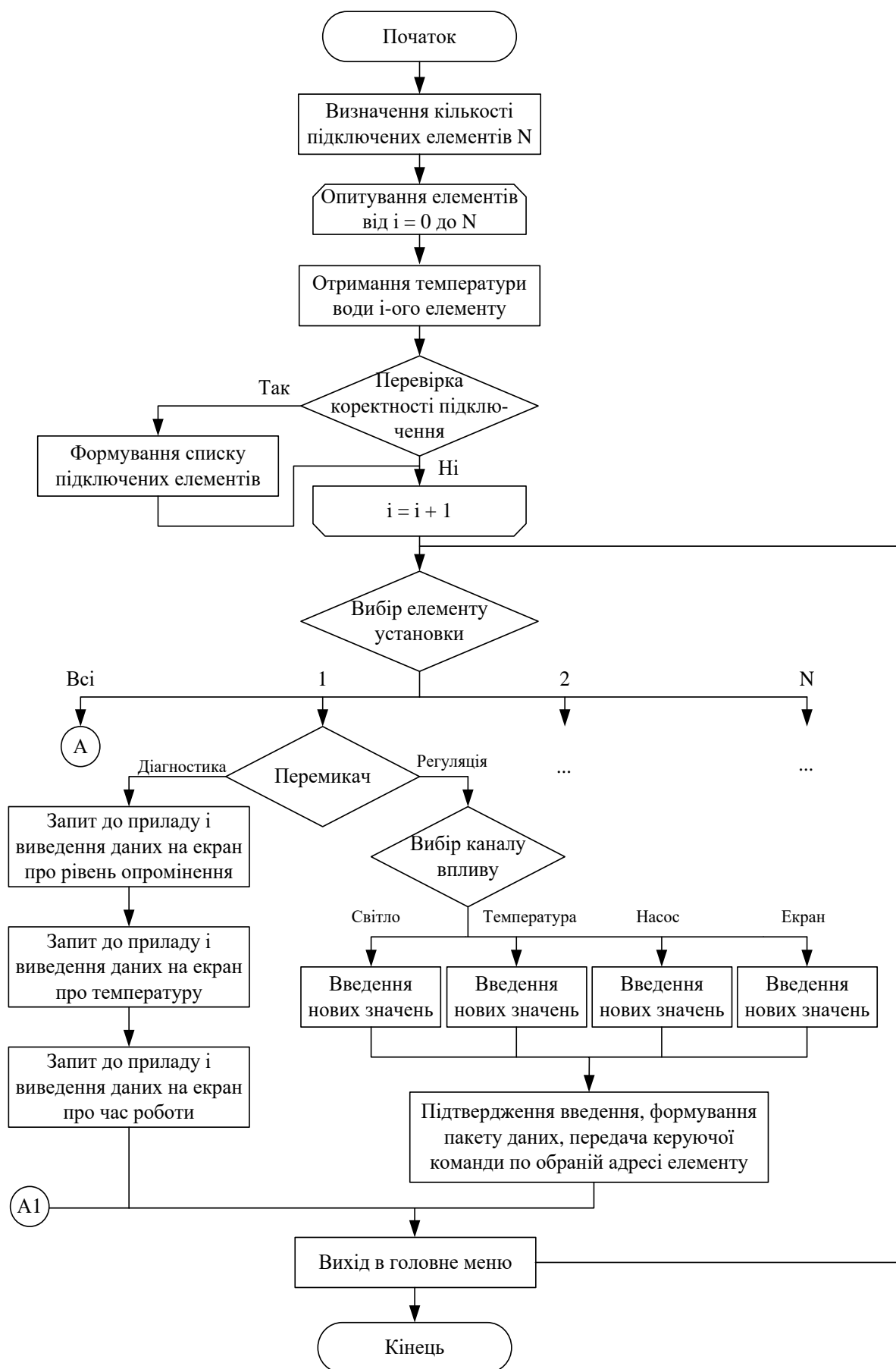


Рис.А1. Блок-схема загального алгоритму роботи системи

ДОДАТОК Б

ДАНІ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Рівняння регресії для повнофакторного експерименту типу 2^5 :

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + \\
 & + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5 + b_{123}x_1x_2x_3 + \\
 & + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{125}x_1x_2x_5 + b_{135}x_1x_3x_5 + b_{145}x_1x_4x_5 + \\
 & + b_{235}x_2x_3x_5 + b_{245}x_2x_4x_5 + b_{345}x_3x_4x_5 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 + b_{1235}x_1x_2x_3x_5 + b_{1245}x_1x_2x_4x_5 + \\
 & + b_{1345}x_1x_3x_4x_5 + b_{2345}x_2x_3x_4x_5 + b_{12345}x_1x_2x_3x_4x_5
 \end{aligned}$$

де y – вихідний параметр;

x_i – фактори, що визначають перебіг процесу (вхідні параметри);

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – емпірично визначаємі коефіцієнти рівняння регресії.

Приймаючи $x_1 = x_2x_3x_4$, $x_5 = x_2x_3$, рівняння регресії матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + \\
 & + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \\
 & + b_{44}x_4^2 + b_{55}x_5^2
 \end{aligned}$$

Для здійснення ротательного плану другого порядку, приймаємо в якості ядра планування для п'ятифакторного експерименту напіврепліки [116,117].

Розрахункова матриця для 2^{k-1} приведена в таб. Б.1. В таб. Б.2 приведені дані, що характеризують процес експерименту.

Розрахунок коефіцієнта регресії і розрахункова матриця для визначення залишкової суми квадратів і дисперсії адекватності наведені в таблицях Б.3 і Б.4.

Матриця планування експерименту

Опит	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_1x_5	x_2x_3	x_2x_4	x_2x_5	x_3x_4	x_3x_5	x_4x_5	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_5^2	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	184,0	182,0	183,0
2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	154,0	152,0	153,0
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	154,0	156,0	155,0
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	187,0	189,0	188,0
5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	184,0	182,0	183,0
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	172,0	174,0	173,0
7	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	172,0	172,0	172,0
8	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	185,0	183,0	184,0
9	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	182,0	180,0	181,0
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	172,0	170,0	171,0
11	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	174,0	174,0	174,0
12	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	184,0	182,0	183,0
13	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	133,0	135,0	134,0
14	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	174,0	172,0	173,0
15	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	157,0	159,0	158,0
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	368,0	366,0	367,0
17	+	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	127,0	127,0	127,0
18	+	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	188,0	188,0	188,0
19	+	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	128,0	126,0	127,0
20	+	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	181,0	181,0	181,0
21	+	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	167,0	167,0	167,0
22	+	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	204,0	202,0	203,0
23	+	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	165,0	167,0	166,0
24	+	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	200,0	200,0	200,0
25	+	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	164,0	164,0	164,0

26	+	0	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	212,0	210,0	211,0
27	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	133,0	131,0	132,0
28	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	133,0	131,0	132,0
29	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135,0	135,0	135,0
30	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137,0	135,0	136,0
31	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135,0	135,0	135,0
32	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132,0	132,0	132,0

Таблиця Б.2

Матриця для розрахунку коефіцієнтів регресії

Дослід	$x_1\bar{y}_n$	$x_2\bar{y}_n$	$x_3\bar{y}_n$	$x_4\bar{y}_n$	$x_5\bar{y}_n$	$x_1x_2\bar{y}_n$	$x_1x_3\bar{y}_n$	$x_1x_4\bar{y}_n$	$x_1x_5\bar{y}_n$	$x_2x_3\bar{y}_n$	$x_2x_4\bar{y}_n$	$x_2x_5\bar{y}_n$	$x_3x_4\bar{y}_n$	$x_3x_5\bar{y}_n$	$x_4x_5\bar{y}_n$	$x_1^2\bar{y}_n$	$x_2^2\bar{y}_n$	$x_3^2\bar{y}_n$	$x_4^2\bar{y}_n$	$x_5^2\bar{y}_n$	\bar{y}_n	$(\bar{y}-\bar{y})^2$	S_n^2
1	-183	-183	-183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	-183	-183	183	183	183	183	183	183,0	0,0	0,0
2	154	-154	-154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154,0	1,0	0,5
3	155	155	-155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155,0	0,0	0,0
4	189	189	-189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	-189	-189	189	189	189	189	189	189,0	1,0	0,5
5	184	-184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	-184	-184	184	184	184	184	184	184	184,0	1,0	0,5
6	174	-174	174	174	174	174	174	174	174	174	174	174	-174	174	-174	174	174	174	174	174	174,0	1,0	0,5
7	-172	172	172	-172	172	-172	-172	172	-172	172	-172	172	-172	172	-172	172	172	172	172	172	172,0	0,0	0,0

	172			172		172	172		172		172													
8	184	184	184	-184	-184	184	184	-184	-184	184	-184	-184	-184	-184	184	184	184	184	184	184	184	184,0	0,0	0,0
9	-182	-182	-182	182	-182	182	182	-182	182	182	-182	182	-182	182	-182	182	182	182	182	182	182	182,0	1,0	0,5
10	172	-172	-172	172	172	-172	-172	172	172	172	-172	-172	-172	-172	172	172	172	172	172	172	172	172,0	1,0	0,5
11	-175	175	-175	175	175	-175	175	-175	-175	-175	175	175	-175	-175	175	175	175	175	175	175	175	175,0	1,0	0,5
12	182	182	-182	182	-182	182	-182	182	-182	-182	182	-182	-182	182	-182	182	182	182	182	182	182	182,0	1,0	0,5
13	-134	-134	134	134	134	134	-134	-134	-134	-134	-134	-134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134,0	0,0	0,0
14	173	-173	173	173	-173	-173	173	173	-173	-173	-173	173	173	-173	-173	173	173	173	173	173	173	173,0	0,0	0,0
15	-158	158	158	158	-158	-158	-158	-158	158	158	158	-158	158	-158	-158	158	158	158	158	158	158	158,0	0,0	0,0
16	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367,0	0,0	0,0
17	-254	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	508	0	0	0	0	0	127,0	0,0	0,0
18	376	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	752	0	0	0	0	0	188,0	0,0	0,0
19	0	-250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0	125,0	4,0	2,0
20	0	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	0	0	0	0	180,0	1,0	0,5
21	0	0	-340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	680	0	0	0	170,0	9,0	4,5
22	0	0	408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	816	0	0	0	204,0	1,0	0,5
23	0	0	0	-332	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	664	0	0	166,0	0,0	0,0
24	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	0	0	200,0	0,0	0,0

25	0	0	0	0	- 328	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	656	164,0	0,0	0,0
26	0	0	0	0	422	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	844	211,0	0,0	0,0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132,0	0,0	0,0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	131,0	1,0	0,5
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135,0	0,0	0,0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	133,0	9,0	4,5
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135,0	0,0	0,0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132,0	0,0	0,0
Σ	372	336	228	216	288	272	248	240	224	208	216	232	88	104	112	4196	4164	4420	4402	4441	5470	33,0	16,5

Таблиця Б.3

Матриця для розрахунку адекватності моделі

ДОСЛІД	b_0	b_{1x_1}	b_{2x_2}	b_{3x_3}	b_{4x_4}	b_{5x_5}	$b_{12x_1x_2}$	$b_{13x_1x_3}$	$b_{14x_1x_4}$	$b_{15x_1x_5}$	$b_{23x_2x_3}$	$b_{24x_2x_4}$	$b_{25x_2x_5}$	$b_{34x_3x_4}$	$b_{35x_3x_5}$	$b_{45x_4x_5}$	$b_{11x_1^2}$	$b_{22x_2^2}$	$b_{33x_3^2}$	$b_{44x_4^2}$	$b_{55x_5^2}$	\hat{y}
1	133,0	-15,0	-13	-9,0	-9,0	12	17	15,0	15	-14	13	13,0	-14,0	5,0	-6,0	-7	6	5,0	13	12,0	13,0	185,0
2	133,0	15,0	-13	-9,0	-9,0	-12	-17	-15,0	-15	-14	13	13,0	14,0	5,0	6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	151,0
3	133,0	-15,0	13	-9,0	-9	-12	-17	15,0	15	14	-13	-13,0	-14,0	5,0	6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	157,0
4	133,0	15,0	13	-9,0	-9	12	17	-15,0	-15	14	-13	-13,0	14,0	5,0	-6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	187,0
5	133,0	-15,0	-13	9,0	-9	-12	17	-15,0	15	14	-13	13,0	14,0	-5,0	-6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	183,0
6	133,0	15,0	-13	9,0	-9	12	-17	15,0	-15	14	-13	13,0	-14,0	-5,0	6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	175,0
7	133,0	-15,0	13	9,0	-9	12	-17	-15,0	15	-14	13	-13,0	14,0	-5,0	6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	171,0
8	133,0	15,0	13	9,0	-9	-12	17	15,0	-15	-14	13	-13,0	-14,0	-5,0	-6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	185,0
9	133,0	-15,0	-13	-9,0	9	-12	17	15,0	-15	14	13	-13,0	14,0	-5,0	6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	181,0
10	133,0	15,0	-13	-9,0	9	12	-17	-15,0	15	14	13	-13,0	-14,0	-5,0	-6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	173,0
11	133,0	-15,0	13	-9,0	9	12	-17	15,0	-15	-14	-13	13,0	14,0	-5,0	-6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	173,0
12	133,0	15,0	13	-9,0	9	-12	17	-15,0	15	-14	-13	13,0	-14,0	-5,0	6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	183,0
13	133,0	-15,0	-13	9,0	9	12	17	-15,0	-15	-14	-13	-13,0	-14,0	5,0	6,0	7	6	5	13	12,0	13,0	135,0
14	133,0	15,0	-13	9,0	9	-12	-17	15,0	15	-14	-13	-13,0	14,0	5,0	-6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	171,0
15	133,0	-15,0	13	9,0	9	-12	-17	-15,0	-15	14	13	13,0	-14,0	5,0	-6,0	-7	6	5	13	12,0	13,0	159,0

Розрахунок коефіцієнтів регресії і перевірка їх значимості

№	Найменування величини	Розрахункова формула	Розрахункове значення
1	2	3	4
1.	Сума квадратів побудованих дисперсій [117]	$S_n^2 = \frac{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2}{2}$	
2.	Сума квадратів помилок	$S_E = \sum_{n=1}^{N=32} S_n^2$	33,0
3.	Повторність дослідів	γ	2
4.	Кількість дослідів	N	32
5.	Рівень значущості	α	0,05
6.	Розрахункові значення критерію Кохрена	$G_p = \frac{S_n^2 \max}{S_E}$	0,136
7.	Розрахункові значення критерію Кохрена	G_T при $\alpha = 0,05; N=2;$ $f = \gamma - 1 = 1$	0,29
8.	Перевірка відтворюваності дослідів	$G_p < G_T$	0,14 < 0,29
9.	Коефіцієнти	$b_0 = \delta_0^1 \sum_{n=1}^{N=20} \bar{y}_n - \delta_0^1 \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_m^2 \bar{y}_n$ $\delta_0^1 = 0,15091, \delta_0^n = 0,034091$	$b_0 = 133$
10.	Рівняння регресії	$b_n = \delta_{ii}^1 \sum_{n=4}^N x_m^2 \bar{y}_n + \delta_{ii}^2 \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_m^2 \bar{y}_n - \delta_{ii}^3 \sum_{i=1}^K \bar{y}_n;$ $\delta_{ii}^1 = 0,03125; \delta_{ii}^2 = 0,002841;$ $\delta_{ii}^3 = 0,034091$	$b_{11} = 6,0$ $b_{22} = 5,0$ $b_{33} = 13,0$ $b_{44} = 12,0$ $b_{55} = 13,0$
		$b_i = \delta_i \sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n; \delta_1 = 0,041667$	$b_1 = 15,0$ $b_2 = 13,0$

			$b_3 = 9,0$ $b_4 = 9,0$ $b_5 = 12,0$
		$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{y}_n ; \delta_i = 0,0625$	$b_{12} = 17,0$ $b_{13} = 15,0$ $b_{14} = 15,0$ $b_{15} = 14,0$ $b_{23} = 13,0$ $b_{24} = 13,0$ $b_{25} = 14,0$ $b_{34} = 5,0$ $b_{35} = 6,0$ $b_{45} = 7,0$

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4
11.	Дисперсія відтворюваності	$S_y^2 = \frac{S_E}{N}$	1.03
12.	Дисперсія коефіцієнтів регресії [117]	$S_{b_0}^2 = \gamma_0 S_y^2 ; \gamma_0 = 0.1591$	0,16
		$S_{b_{ii}}^2 = \gamma_{ii} S_y^2 ; \gamma_{ii} = 0.0312$	0,0321
		$S_{b_{ij}}^2 = \gamma_{ij} S_y^2 ; \gamma_{ij} = 0.0625$	0,0643
		$S_{b_i}^2 = \gamma_i S_y^2 ; \gamma_i = 0.0417$	0,43
13.	Табличне значення критерію Стьюдента	$t_{p\text{при}} \begin{cases} \alpha = 0,05 \\ f = N(\gamma - 1) \end{cases}$	2,04
14.	Умовна	$ b_0 \geq S_{b_0} \cdot t_p$	0,816

	значущість коефіцієнтів рівняння регресії	$ b_i \geq S_{bi} \cdot t_p$	1,34
		$ b_{ii} \geq S_{b_{ii}} \cdot t_p$	0,365
		$ b_{ij} \geq S_{b_{ij}} \cdot t_p$	0,52
15.	Залишкова сума квадратів	$S^2 = \sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - \tilde{y}_n)^2$	16,5
16.	Частота $f_{ад}$	$f_{ад} = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2} (N_0 - 1)$	6
17.	Залишкова сума квадратів в центрі плану	$S = \sum_{n=1}^N (\bar{y}_{on} - \tilde{y}_{on})^2$	5,0
18.	Помилка досліду при рототабельном плануванні	$S_0^2 = \frac{S}{N_0 - 1}$	1,0
19.	Різниця дисперсій	$S_{общ.} - S$	11,5
20.	Дисперсія адекватності	$S_{ад.}^2 = \frac{S_{общ.} - S}{f_{ад.}}$	1,9
21.	Розрахункове значення критерію Фішера	$F_p = \frac{S_{ад.}^2}{S_0^2}$	1,9
22.	Табличне значення критерію Фішера	$F_{T\text{при}} \begin{cases} \alpha = 0,05 \\ f = N(\gamma - 1) \end{cases}$	2,42
23.	Умова перевірки адекватності моделі	$F_p \leq F_T$	1,9 < 2,42

Додаток В

Додаток Д