

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

1.2023

ВІСНИК

**Хмельницького
національного
університету**

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2023, Issue 1, Volume 317

Хмельницький

**ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки**

Затверджений як фахове видання категорії «Б»,
РІШЕННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ № 1643 ВІД 28.12.2019 та №409 від 17.03.2020

Засновано в липні 1997 р.

Виходить 6 разів на рік

Хмельницький, 2023, № 1(317)

**Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського http://nbuv.gov.ua/j-tit/Vchnu_tekh

Включено до науково-метричних баз:

Google Scholar	http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221
CrossRef	http://doi.org/10.31891/2307-5732

Головний редактор	Скиба М. Є. , д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
Заступник головного редактора	Синюк О. М. , д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	Горященко С. Л. , к.т.н., доцент кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї
Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н., Говорущенко Т.О., д.т.н., Гордєєв А.І., д.т.н., Горященко С. Л., к.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Защепкіна Н.М., д.т.н., Рубаненко О. О., д.с.н., Захаркевич О.В., д.т.н., Злотенко Б.М., д.т.н., Зубков А.М., д.т.н., Каплун П.В., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Любош Хес, д.т.н., (Чехія), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Місяць В.П., д.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Параска О.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Горошко А.В., д.т.н., Сарібекова Ю.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Харжевський В.О., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Бубулєс Альгімантас, доктор наук (Литва), Елсаєд Ахмед Ельнашар, доктор наук (Єгипет), Кальчиньскі Томаш, доктор наук (Польща), Лунтовський Андрій, д.т.н. (Німеччина), Матушевський Мацей, доктор наук (Польща), Мушлевський Лукаш, доктор наук (Польща), Мушял Януш, доктор наук (Польща), Натріашвілі Тамаз Мамієвич, д.т.н., (Грузія), Попов Валентин, доктор природничих наук (Німеччина)

<i>Технічний редактор</i>	Горященко К. Л., к.т.н.
<i>Редактор-коректор</i>	Броженко В. О.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 08 від 23.02.2023 р.**

Адреса редакції: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

т	(038-2) 67-51-08	web:	http://journals.khnu.km.ua/vestnik
e-mail:	visnyk.khnu@khmnu.edu.ua visnyk.khnu@gmail.com		http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія KB № 24922-14862ПР від 12 липня 2021 року

© Хмельницький національний університет, 2023
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2023

ЗМІСТ

ДУБАС ЮРІЙ, КУНАНЕЦЬ НАТАЛІЯ ВИКОРИСТАННЯ ОНТОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ ДОПОМОГИ У ФОРМУВАННІ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ СТУДЕНТІВ	9
БАБЕНКО ОЛЕКСІЙ, КУТІНА МАРИНА, ПРОЦЕНКО ЛЮДМИЛА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК НА ПІДПРИЄМСТВАХ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ	18
БОРТНИК ГЕННАДІЙ, БОРТНИК ОЛЕКСАНДР, КИРИЛЮК СЕРГІЙ СПЕКТРАЛЬНО-КОВАРІАЦІЙНИЙ МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ	21
ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА, ВАРГАТЮК ГАННА, БОЛДИРЕВА ОЛЬГА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ РАДІОІНТЕРФЕЙС З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	26
ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА, ПРИКМЕТА АНДРІЙ, ОЛІЙНИК АНДРІЙ, НІКІТОВИЧ ДІАНА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	33
ВЕСЕЛОВСЬКА НАТАЛІЯ, БУРЛАКА СЕРГІЙ МЕТОДИ ТА ПРИЙОМУ КОМБІНУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ КОМПЛЕКСНИХ ҐРУНТОБРОБНИХ МАШИН	42
ВЛАСЮК ВАЛЕНТИН ПОБУДОВА ПРОГНОЗОВАНИХ МОДЕЛЕЙ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНИХ ТА СКЛАДЕНИХ ЗГІДНО З КОНЦЕПЦІЄЮ SMART GRID СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ	48
ГОРБІЙЧУК МИХАЙЛО, КРОПИВНИЦЬКИЙ ДМИТРО ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ З ВРАХУВАННЯМ СТАНУ ОЗБРОЄННЯ ДОЛОТА	58
ГУРМАН ІВАН, БОБРОВНИКОВА КІРА, БЕДРАТЮК ЛЕОНІД, БЕДРАТЮК ГАННА МЕТОД АНАЛІЗУ ПРОГРАМНОГО КОДУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЯДРА CUDA	67
ДАНИЛКОВИЧ АНАТОЛІЙ, САНГІНОВА ОЛЬГА ЗАСТОСУВАННЯ ТАНІДІВ АКАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛАСТИЧНИХ ШКІР	74
ДАНИЛКОВИЧ АНАТОЛІЙ, ЛІЩУК ВІКТОР ФОРМУВАННЯ ВЗУТТЄВОЇ ШКІРИ ЗІ СПИЛКУ ШКУР СВИНЕЙ	82
ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК, ПАНАСЮК ІГОР, ЛИЧОВ ДМИТРО, КОШЕЛЬ ГАННА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РЕЖИМІВ РУХУ РОБОЧОГО МАСИВУ В ГАЛТУВАЛЬНІЙ МАШИНІ З ДОДАТКОВОЮ РУХОМОЮ ЛАНКОЮ ПОВЗУНОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗМІНИ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ	87
ЗЕЛІНСЬКА ОКСАНА, ПОТАПОВА НАДІЯ, МЕЛЬЯНОВА АНАСТАСІЯ ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ВЕДЕННЯ РЕЄСТРУ КЛІЄНТІВ БАНКУ	94
КОВАЛЬОВ ЮРІЙ, ПЛЕШКО СЕРГІЙ, СУВОРОВ ІВАН РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЕКСТРУДЕРА	100
КРАВЦОВ АНДРІЙ, ЛЕВКІН ДМИТРО, БЕРЕЖНА НАТАЛІЯ, ЛЕВКІН АРТУР МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БІОБ'ЄКТОВИХ ЗАДАЧ	105

КРАВЧЕНКО СВІТЛАНА, МАРЧУК ГАЛИНА, ЛОКТИКОВА ТАМАРА, ГРИШКУН ЄВГЕНІЙ МЕТОДИ ЮЗАБІЛІТІ-ТЕСТУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ	111
КУЧЕРЕНКО ЮЛІЯ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ	119
ЛЕМЕШКО АРТЕМ, АНТОНЕНКО АНДРІЙ, ЦВИК ОЛЕКСАНДР АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРАФІКУ	123
МАМУТА МАРИНА, КРАВЧЕНКО ІГОР, МАМУТА ОЛЕКСАНДР ХОСТИНГ СТАТИЧНОГО ВЕБ-САЙТУ ЗАСОБАМИ AWS S3	128
МАРТИНЮК ТЕТЯНА, КОЖЕМ'ЯКО АНДРІЙ, БОРТНИК ГЕНАДІЙ, ВОЙНАЛОВИЧ ОЛЕКСАНДР АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ «ТРИВАЛІСТЬ-КОД»	135
МИХАЙЛОВА НІНА, ПРИВАЛА ВАЛЕРІЙ, ЛУЩЕВСЬКА ОЛЕНА ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МАТЕРІАЛИ ІЗ ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В СТАТИЧНИХ УМОВАХ	139
ОЛІЙНИК ГАЛИНА, ДАНЧЕНКО ЮЛІЯ, КОРНИЦЬКА ЛАРИСА, РАСТОРГУЄВА МАРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АСОРТИМЕНТУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУКЦІЇ СЕРІЇ DEKODER DERUFA ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ СТІНИ В СУЧАСНОМУ ІНТЕР'ЄРІ	145
ОНИЩУК ОКСАНА ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ФЛОКУЛЯЦІЇ ТА КОАГУЛЯЦІЇ ПРИ ОЧИЩЕННІ ВОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ	151
ПАЗДРІЙ ІГОР ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ФРЕЙМВОРКІВ	155
ПЕДЯШ ВОЛОДИМИР МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З МОДУЛЯЦІЄЮ ПО ІНТЕНСИВНОСТІ	162
ПЕДЯШ ВОЛОДИМИР ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА	167
ПОТАПОВА НАДІЯ, ВОЛОНТИР ЛЮДМИЛА МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ ІЄРАРХІЧНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ	174
РИМАР ТЕТЯНА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ПРОЦЕСУ ПОРИЗАЦІЇ РІДИННОСКЛЯНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ В УМОВАХ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ	181
СИНЮК ОЛЕГ, КРАВЧУК ОЛЬГА, КРАВЧУК АНДРІЙ, МАГДІН ВІКТОР, ЗОЛОТЕНКО ІВАН МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ	186
СЛАВІНСЬКА АЛЛА, СИРОТЕНКО ОКСАНА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО НАСТИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ У ШВЕЙНІЙ ГАЛУЗІ	196
СОКІЛ МАРІЯ, ЗВОРСЬКИЙ АНДРІЙ СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОННІ ПОСЛУГИ БІБЛОТЕКИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ НАВЧАЛЬНОГО ТА НАУКОВОГО ПРОЦЕСІВ ЗВО В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	205

СТРЕЛЬБИЦЬКИЙ ВІКТОР

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ «ГАНЦ» 209

ЧИГІНЬ ВАСИЛЬ, ПАЗИНЮК МИХАЙЛО, ТЕРЕНДІЙ ОЛЬГА, МЕНЬШИКОВ ОЛЕКСІЙ

КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ВІДДАЛЕНОГО ПРИСТРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ PYTHON-СЕРВЕРА FLASK 214

ЩЕРБАНЬ ВОЛОДИМИР, КОЛЬВА МИКИТА,**ЄГОРОВ ДМИТРО, КОЛИСКО ОКСАНА, ЩЕРБАНЬ ЮРІЙ**РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КІНЕМАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ ВАЖЛИВИХ
МЕХАНІЗМІВ МАШИН ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНОСТІ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ 220**КОЗУБ ЮРІЙ, КОЗУБ ГАЛИНА**

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ МУЛЬТИПЛАТФОРМНИХ ЗАСТОСУНКІВ НА KOTLIN 224

РУТКЕВИЧ ВОЛОДИМИР, ДІДИК АНДРІЙ

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШІННЯ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА В ШКАРАЛУПІ 230

CONTENT

DUBAS YURI, KUNANETS NATALIYA

 USE OF ONTOLOGY IN INFORMATION SYSTEM TO ASSIST IN THE FORMATION OF AN INDIVIDUAL
EDUCATIONAL TRAJECTORY OF STUDENTS 9

BABENKO OLEKSIY, KUTINA MARYNA, PROTSENKO LYUDMILA

 STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF BIOGAS INSTALLATIONS
AT ENTERPRISES OF THE AGRICULTURAL COMPLEX 18

BORTNYK GENNADIY, BORTNYK OLEXAND, KYRYLYUK SERGIY

SPECTRAL-COVARIATION METHOD OF CLASSIFICATION OF RADIO SIGNALS 21

VASYLKIVSKYI MIKOLA, VARGATYUK GANNA, BOLDYREVA OLGA

INTELLIGENT RADIO INTERFACE WITH THE SUPPORT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE 26

VASYLKIVSKYI MIKOLA, PRYKMETA ANDRII, OLIYNYK ANDRII, NIKITOVYCH DIANA

OPTIMIZATION OF INTELLIGENT TELECOMMUNICATION NETWORKS 33

VESELOVSKA NATALIYA, BURLAKA SERHIY

 METHODS AND TECHNIQUES COMBINATION WORKING BODIES
OF COMPLEX SOIL PROCESSING MACHINES 42

VLASYUK VALENTYN

 BUILDING PREDICTIVE ELECTRICITY CONSUMPTION MODELS FOR TRADITIONAL AND SMART GRID POWER
SUPPLY SCHEMES FOR IRON ORE MINES 48

GORBIYCHUK MYKHAIL, KROPYVNYTSKYI DMYTRO

 OPTIMAL CONTROL OF THE WELL DEEPENING PROCESS CONSIDERING
THE CONDITION OF THE BITTING EQUIPMENT 58

HURMAN IVAN, BOBROVNIKOVA KIRA, BEDRATYUK LEONID, BEDRATYUK HANNA

APPROACH FOR CODE ANALYSIS TO ESTIMATE POWER CONSUMPTION OF CUDA CORE 67

DANYLKOYCH ANATOLIY, SANGINOVA OLGA

APPLICATION OF ACACIA TANNINS IN ELASTIC LEATHER MATERIALS PRODUCTION TECHNOLOGY 74

DANYLKOYCH ANATOLII, LISHCHUK VIKTOR

FORMATION OF SHOE LEATHER FROM SPLIT PIG HIDES 82

ZALYUBOVSKYI MARK, PANASYUK IGOR, LYCHOV DMITRO, KOSHEL GANNA

 RESEARCH OF THE CHANGE OF THE MOTION MODES OF THE WORKING ARRAY IN A TURNING MACHINE
WITH AN ADDITIONAL MOVEABLE SLIDING LINK DEPENDING ON THE CHANGE OF DESIGN FEATURES 87

ZELINSKA OKSANA, POTAPOVA NADIYA, YEMELIANOVA ANASTASHA

INFORMATION SYSTEM FOR MAINTAINING THE REGISTER OF CLIENTS OF THE BANK 94

KOVALYOV YURI, PLESHKO SERGEY, SUVOROV IVAN

DEVELOPMENT OF IMPROVED ROBOTICS EXTRUDER LOADING SYSTEM 100

KRAVTSOV ANDRII, LEVKIN DMYTRO, BEREZHNA NATALIYA, LEVKIN ARTUR

 METHODOLOGICAL APPROACH TO THE MATHEMATICAL MODELS CONSTRUCTION OF BIOOBJECT
PROBLEMS 105

KRAVCHENKO SVITLANA, MARCHUK GALINA, LOKTIKOVA TAMARA, GRISHKUN YEVGENII USABILITY TESTING METHODS FOR ASSESSING A MOBILE APPLICATION	111
KUCHERENKO JYLIA SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF COATING MATERIAL WHEN RESTORING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING	119
ANTONENKO ARTEM, LEMESHKO ANDRII, TSVIK OLEKSANDR ANALYSIS AND FEATURES OF TRAFFIC MONITORING SOFTWARE	123
MAMUTA MARYNA, KRAVCHENKO IGOR, MAMUTA OLEKSANDR AMAZON S3 STATIC WEBSITE HOSTING	128
MARTYNIUK TATIANA, KOZHEMIKO ANDRYI, BORTNYK GENNADIY, VOINALOVYCH OLEKSANDR ANALYSIS OF FEATURES OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION "DURATION-CODE"	135
MIHAILOVA NINA, PRIVALA VALERII, LUSHCHEVSKA OLENA STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES ON MATERIALS WITH A SPECIAL PURPOSE POLYMER COATING UNDER STATIC CONDITIONS	139
OLIJNYK HALINA, DANCHENKO YULIYA, KORNYTSKA LARYSA, RASTORHUIEVA MARIIA STUDY OF THE RANGE AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE DERUFA DECODER SERIES FOR WALL DECORATION IN A MODERN INTERIOR	145
ONYSHCHUK OKSANA TO THE STUDY OF THE FLOCCULATION AND COAGULATION PROCESS IN THE PURIFICATION OF WATER FOR INDUSTRIAL APPLICATION	151
PAZDRIY IHOR COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE DEVELOPMENT SYSTEMS BASED ON FRAMEWORKS	155
PEDYASH VOLODYMYR MATHEMATICAL MODELING OF FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEM WITH INTENSITY MODULATION	162
PEDYASH VOLODYMYR INVESTIGATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL FIBER	167
POTAPOVA NADIIA, VOLONTYR LUDMILA MODELING METHOD IN STOCK MANAGEMENT HIERARCHICAL LOGISTICS SYSTEMS	174
RYMAR TATYANA RESEARCH OF THE TECHNOLOGICAL MODE OF THE PROCESS OF PORIZATION OF LIQUID GLASS COMPOSITE MATERIALS FOR THERMAL INSULATION IN THE CONDITIONS OF UHF RADIATION	181
SYNYUK OLEG, KRAVCHUK OLGA, KRAVCHUK ANDRII, MAGDIN VICTOR, ZOLOTENKO IVAN MODEL OF PLASTIC DEFORMATION OF POLYMER MATERIAL	186
SLAVINSKA ALLA, SYROTENKO OKSANA ANALYSIS OF MODERN SPREADING EQUIPMENT APPLIED IN THE SEWING INDUSTRY	196
SOKIL MARIIA, ZVORSKYI ANDRII MODERN ELECTRONIC SERVICES OF THE LIBRARY TO SUPPORT EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC	205

STRELBITSKIY VICTOR

EVALUATION OF THE RELIABILITY OF «GANZ» PORTAL CRANE MECHANISMS 209

CHYHIN VASYL, PAZYNIUK MYKHAILO, TERENDII OLHA, MENSNIKOV OLEKSII

CONTROLLING THE OPERATION OF THE REMOTE DEVICE USING FLASK PYTHON SERVER 214

SHCHERBAN VOLODYMYR, KOLVA NIKITA,**EGOROV DMITRIJ, KOLISKO OKSANA, SHCHERBAN YURYJ**

DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODULE FOR KINEMATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF IMPORTANT MECHANISMS OF LIGHT INDUSTRIAL MACHINES, PROGRAMS FOR ASSESSING THE TENSION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES 220

KOZUB YURIJ, KOZUB HALYNA

FEATURES OF MULTIPLATFORM APPLICATION DEVELOPMENT ON KOTLIN 224

RUTKEVYCH VOLODYMYR, DIDYK ANDRIJ

OVERVIEW OF METHODS AND TOOLS FOR DRYING WALNUTS IN THE SHELL 230

ПЕДЯШ Володимир

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0002-4071-357X>e-mail: vpedyash@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

Волоконно-оптичні системи передавання є основним типом систем для побудови сучасних телекомунікаційних мереж. В транспондерах сучасних оптичних систем передавання реалізовано ефективні методи модуляції та кодування, що дозволяє суттєво підвищити чутливість приймача і збільшити довжину ділянки регенерації. При проектуванні таких систем постає актуальне завдання з визначення характеристик якості оптичних каналів. Для вирішення цієї задачі слід розробити математичну модель системи передавання і провести імітаційне моделювання з її використанням. Одним із основних функціональних блоків моделі, що впливає на достовірність отриманих результатів, є середовища розповсюдження сигналу – оптичне волокно. В роботі проаналізовано найбільш поширений варіант побудови моделі на базі Фур'є методу розщеплення за фізичними факторами. Розглянуто перелік питань, пов'язаних зі зменшенням обчислювальної складності моделі та її тестування.

Ключові слова: математична модель, оптичне волокно, спотворення, дисперсія, сигнал

PEDYASH Volodymyr

State University of Intellectual Technologies and Communications

INVESTIGATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL FIBER

Fiber optic transmission systems are the main type of systems for building telecommunication networks. The transponders of modern optical transmission systems implement efficient modulation and coding methods, which can significantly increase the receiver sensitivity and increase the length of the regeneration area. The task to define the quality characteristics of optical channels occurs during the design of such systems.

To solve this problem, it is necessary to develop a mathematical model of the transmission system and perform a simulation using it. One of the main blocks of the system is the propagation medium (optical fiber). The optical fiber model is based on the nonlinear Schrödinger differential equation. Several groups of modeling methods have been developed on its basis. The most widespread is the Fourier method of splitting by physical factors, as it has a simple algorithm structure, high computing speed, and high accuracy. This method is recursive, so to reduce the number of iterations, it is reasonable to use the well-known method of nonlinear phase rotation.

To check the functionality of the developed program code, it is recommended to perform testing in several stages. At the first stage, it is proposed to check the accuracy of the distortion of chromatic dispersion. Single pulses of simple shape, such as Gaussian pulses, should be used as a test signal. By calculating the pulse shape using theoretical expressions and comparing them with the modeling results, the accuracy of the optical fiber modeling algorithm can be verified. The next step in verifying the fiber model is to evaluate the accuracy of the simultaneous introduction of dispersion and nonlinear distortions. For this purpose, it is proposed to analyze the propagation of pulses of optical solitons of the first and higher orders.

Keywords: mathematical model, optical fiber, distortion, dispersion, signal

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Швидкий ріст обсягу трафіку в телекомунікаційних мережах і розповсюдження технологій цифрового зв'язку потребують підвищення показників ефективності систем передавання. Сьогодні для досягнення цієї мети успішно використовуються волоконно-оптичні системи передавання (ВОСП), які знайшли широке застосування на ділянках транспортних мереж та мереж доступу. В транспондерах сучасних ВОСП для збільшення спектральної ефективності сигналу та довжини ділянки регенерації реалізовано когерентні методи прийому. Якість роботи цифрового тракту залежить від характеристик оптичного сигналу (метод модуляції, потужність, довжина хвилі, тощо) та функціональних блоків системи передавання. При проектуванні нових та модернізації існуючих фрагментів телекомунікаційних мереж слід вирішувати завдання з розробки та дослідження математичних моделей трактів ВОСП. Це дозволяє обрати оптимальні характеристики сигналу, налаштування функціональних блоків системи передавання і впевнитися у задоволенні допустимих показників якості цифрових трактів ВОСП.

На даний час для моделювання ВОСП вже розроблено пакети спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, Optiwave OptiSystem, Rsoft OptSim та VPIphotonics VPItransmissionMaker. Ці пакети є комерційним програмним продуктом із достатньо високою вартістю, оскільки орієнтовані на використання в наукових дослідженнях із достатньою фінансовою підтримкою. Тому при проведенні бюджетних наукових досліджень виконавцям доводиться вирішувати проблему з розробки і перевірки достовірності своїх моделей трактів ВОСП з використанням більш доступних пакетів моделювання MatLab, SciLab або GNU Octave. Одним із головних функціональних блоків моделі, якість реалізації якого впливає на достовірність отриманого результату є оптичне волокно.

Аналіз останніх досліджень

Проблема моделювання розповсюдження сигналу в ОВ не є новою і на сьогодні запропоновано кілька варіантів її вирішення. Відомо, що процес розповсюдження сигналу вздовж оптичного волокна

описується нелінійним диференціальним рівнянням Шредінгера [1]. Воно встановлює взаємозв'язок між огинаючою оптичного сигналу на вході та виході ОВ. Зважаючи на форму виразу, аналітичного розв'язку дане рівняння не має, тому вирішується численними методами [2–4]. Найбільш поширеним є Фур'є метод розщеплення по фізичним факторам (ФМРФФ), що передбачає вирішення диференційного рівняння в часткових похідних. Таким чином, математична модель ОВ вносить спотворення, тотожні реальному оптичному волокну. Перевагою методу є точність, простота реалізації та висока швидкість алгоритму обчислень. Певним його недоліком є рекурентність, оскільки на кожному наступному кроці ітерації використовуються результати розрахунків з попереднього кроку.

Іншим менш поширеним методом моделювання ОВ є використання теорії рядів Вольєрра [5–7]. На відміну від ФМРФФ він не є рекурентним і дозволяє визначати окремі складові спектру сигналу. В своєму базовому варіанті цей метод передбачає визначати окремі складові спектру шляхом розрахунку суми нескінченної кількості доданків, кожен з яких є згортою вхідного сигналу та функції - ядра Вольєрра. Але визначення всіх доданків є неможливим, оскільки кожен з них містить інтеграл з кратністю, що відповідає його номеру. Зважаючи на це, зазвичай враховують перші два-три доданки, що включають ядра Вольєрра першого, третього та, при необхідності, п'ятого порядку. Нехтування доданками ряду з ядрами вищих порядків призводить до значного зменшення достовірності математичної моделі ОВ. Зменшити погрішність моделювання можна використанням модифікованої версії даного методу [8, 9]. Але широкого розповсюдження даний метод не отримав. Тому в цій роботі дослідження достовірності моделювання ОВ виконано із використанням Фур'є методу розщеплення по фізичним факторам.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є аналіз методів математичного моделювання оптичного волокна та визначення критеріїв достовірності отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу

Зважаючи на конструкцію світловода та фізичні властивості його матеріалів, оптичний сигнал спотворюється при проходженні вздовж середовища розповсюдження. Спотворення, що призводять до зміни часової форми та спектру вихідного сигналу, можна розділити на дві основні групи – лінійні та нелінійні (рис. 1). В свою чергу, лінійні спотворення включають ефекти загасання (втрати потужності сигналу) та дисперсії (спотворення форми сигналу). При аналізі процесу передавання сигналів зі швидкістю до 40 Гбіт/с по одномодовим волокнам, проявами модової та поляризаційної дисперсії можна знехтувати [1].

Загасання призводить до зменшення потужності (інтенсивності) оптичного сигналу зі збереженням його форми в часовій та спектральній області:

$$P(z,t) = P(0,t)e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

де $P(z,t)$ та $P(0,t)$ – потужність сигналу на вході та відстані z від точки вводу випромінювання в ОВ; α – коефіцієнт загасання ОВ.

Потужність оптичного сигналу є квадратом модуля напруженості електричного поля:

$$P(z,t) = |A(z,t)|^2. \quad (2)$$

В оптично прозорих середовищах розповсюдження виникають також і нелінійні спотворення (залежать від потужності вхідного сигналу), які можна розділити на дві групи:

- 1) ефекти Керра, пов'язані з нелінійністю показника заломлення ОВ (фазова самомодуляція, ФСМ; перехресна модуляція, ПХМ та чотирихвильове змішування, ЧХЗ);
- 2) ефекти стимульованих Раманівського та Брілюєнівського розсіювань.



Рис. 1. Класифікація спотворень сигналу в оптичному волокні

Повну величину показника заломлення n_z оптичного матеріалу з врахуванням нелінійності матеріалу визначають за виразом

$$n_z = n_0 + n_2 \left(\frac{P_c}{A_{\text{эф}}} \right), \quad (3)$$

де n_0 та n_2 - відповідно постійна складова показника заломлення та його нелінійний коефіцієнт (для кварцу $n_2 \approx 2,6 \cdot 10^{-20}$ м²/Вт); $A_{\text{эф}}$ - ефективна площа ОВ.

Моделі розповсюдження сигналу в оптичному волокні можна будувати на основі двох груп методів: правилами геометричної (променевої) та хвильової оптики. Перший варіант є більш простим для розуміння і базується на відомому у фізиці законі Снелліуса, що описує поведінку світлового променя на межі двох оптично прозорих середовищ розповсюдження з різними показниками заломлення. Але даний метод не дозволяє побудувати повноцінну модель середовища розповсюдження, що буде відповідати реальному ОВ.

Повний опис процесу розповсюдження оптичного сигналу в оптично прозорому середовищі розповсюдження з лінійними та нелінійними спотвореннями досягається шляхом використання нелінійного рівняння Шредінгера [1, 2]:

$$j \frac{dA}{dz} = -\frac{j}{2} dA + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{d^2 A}{dT^2} - \gamma |A|^2 A, \quad (4)$$

де A - огибающая оптичного сигналу; T - час; α, β_2 та γ - загасання, дисперсія та нелінійність середовища розповсюдження.

Для сигналів довільної форми, рівняння (4) аналітичного розв'язку не має, тому вирішується чисельними методами. Одним із найточніших є Фур'є метод розщеплювання по фізичним факторам (ФМРФФ). В його основу покладена ідея умовного поділу ОВ з сумарною довжиною $L_{\text{ов}}$ на скінчену кількість N_c елементарних сегментів (відрізків) довжиною h_n кожен. Довжина сегментів може бути довільною (в тому числі однаковою), але в будь-якому випадку їхня сума повинна дорівнювати сумарній довжині ОВ.

В базовому варіанті методу [1], вхідний сигнал $A(z, t)$ зі спектром $A(z, \omega)$ на кожному сегменті послідовно обробляється операторами $\hat{D}\{\}$ та $\hat{N}\{\}$, що відповідно вносять лінійні та нелінійні спотворення (рис. 2, а):

$$A(z + h_-, t) = F_{-1} \left\{ \hat{D} \left\{ F \left\{ A(z, t) \right\} \right\} \right\}, \quad (5)$$

$$A(z + h, t) = \hat{N} \left\{ A(z + h_-, t) \right\}, \quad (6)$$

де $F\{\}$ та $F_{-1}\{\}$ - оператори прямого та зворотного перетворення Фур'є; $A(z + h_-, t)$ та $A(z + h, t)$ - напруженість електричного поля оптичного сигналу до та після внесення нелінійних спотворень відповідно.

Вирази для лінійного та нелінійного операторів можна отримати шляхом вирішення рівняння Шредінгера (4) за умови ігнорування одним із ефектів спотворення сигналу, прирівнюючи $\beta_2 = 0$ або $\gamma = 0$. Результатом розв'язку є диференціальні рівняння [1]:

$$A(z, t) = A(0, t) e^{j\gamma |A(0, t)|^2 z}. \quad (7)$$

$$A(z, \omega) = A(0, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 z}. \quad (8)$$

З метою спрощення запису, у виразах (7) та (8) проігнорований коефіцієнт загасання ОВ $e^{-\alpha z}$.

В результаті, вирази для обробки сигналу на кожному сегменті приймають наступну форму:

$$A(z + h_-, t) = F_{-1} \left\{ \hat{D} \left\{ A(z, \omega) \right\} \right\} = F_{-1} \left\{ A(z, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 h} \right\}, \quad (9)$$

$$A(z + h, t) = \hat{N} \left\{ A(z + h_-, t) \right\} = A(z + h_-, t) e^{j\gamma |A(z + h_-, t)|^2 h}, \quad (10)$$

Недоліком базового варіанту ФМРФФ є значний вплив довжини сегменту h на точність чисельного моделювання. Кращої точності можна досягти шляхом використання симетричної версії ФМРФФ [10], який передбачає внесення нелінійних спотворень посередині сегменту (рис. 2, б). Обробку сигналу на кожному з трьох кроків можна описати наступними виразами:

$$A(z + h_- / 2, \omega) = \hat{D} \left\{ A(z, \omega) \right\} = A(z, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 \frac{h}{2}}, \quad (11)$$

$$A(z + h / 2, t) = \hat{N} \left\{ A(z + h_- / 2, t) \right\} = A(z + h_- / 2, t) e^{j\gamma |A(z + h_- / 2, t)|^2 h}, \quad (12)$$

$$A(z + h, \omega) = \hat{D} \left\{ A(z + h / 2, \omega) \right\} = A(z + h / 2, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 \frac{h}{2}}. \quad (13)$$

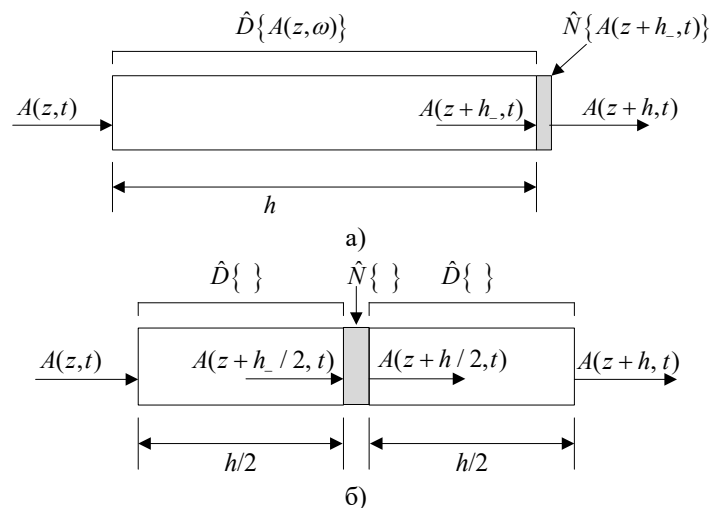


Рис. 2. Графічна інтерпретація варіантів методу ФМРФФ: а) базовий; б) симетричний

Наведений алгоритм симетричного ФМРФФ є досить точним і простим методом, внаслідок чого знайшов широке розповсюдження в імітаційному програмному забезпеченні для ВОСП. Для отримання ідеально достовірних результатів необхідно вибирати довжину елементарного сегменту $h \rightarrow 0$. Оскільки на кожному сегменті виконується дві операції перетворення Фур'є (пряме та зворотне), це призводить до значного росту розрахункових операцій та часу моделювання. Одним з варіантів зменшення кількості елементарних сегментів ОБ зі збереженням достатньої точності є використання методу нелінійного повороту фази [10].

Його суть полягає в тому, що в оптичному сигналі з потужністю P_c , який пройшов відрізок волокна довжиною h виникає зсув фази φ_{nl} , викликаний нелінійністю середовища розповсюдження:

$$\varphi_{nl} = \gamma \cdot P_c \cdot h. \quad (14)$$

Для ВОСП, критичних до нелінійних спотворень, можна зафіксувати максимально допустиме значення фазового зсуву значенням $\varphi_{nl \max}$ і розрахувати відповідно йому довжину сегменту:

$$h = \frac{\varphi_{nl \max}}{\gamma P_c} \quad (15)$$

Для середовища з втратами слід виконувати перерахунок потужності сигналу на вході кожного послідовного сегменту. Блок-схема даного алгоритму наведена на рис. 3.

При аналізі спотворень сигналу в оптичних волокнах, окрім фактичної довжини оптичного волокна L_{ov} , користуються поняттями дисперсійної L_d та нелінійної L_{nl} довжини, які розраховуються відповідно за виразами [1]:

$$L_d = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (16)$$

та

$$L_{nl} = \frac{1}{\gamma P_0}, \quad (17)$$

де T_0 - початкова тривалість імпульсу; P_0 - потужність сигналу.

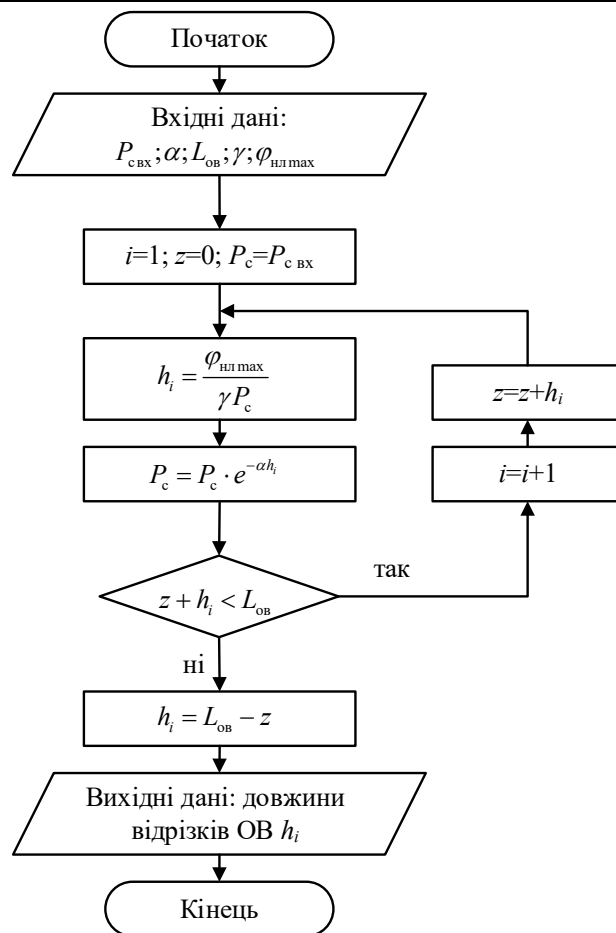


Рис. 3. Блок-схема алгоритму нелінійного повороту фази при моделюванні ОВ

В якості тестового сигналу при дослідженні математичної моделі ОВ доцільно використати гаусівський імпульс з напівшириною T_0 :

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp \left[-\frac{t^2}{2T_0^2} \right]. \quad (18)$$

Виконаємо спочатку перевірку на достовірність внесення спотворень хроматичної дисперсії. Джерело [1] містить форму гаусівського імпульсу на виході дисперсійного середовища розповсюдження для трьох варіантів нормованої довжини лінії: $L_{ов} / L_d = 0$, $L_{ов} / L_d = 2$ та $L_{ов} / L_d = 4$. Аналогічний графік, розрахований шляхом моделювання згідно вищевказаних виразів в середовищі MatLab, наведений на рис. 4. Він повністю співпадає з прототипом із вищевказаного джерела, що підтверджує точність внесення спотворень хроматичної дисперсії.

Остаточну відповідь на питання достовірності математичної моделі ОВ може дати моделювання процесу розповсюдження оптичних солітонів у середовищі з дисперсійними та нелінійними спотвореннями одночасно. В загальному випадку, вираз для форми оптичного солітону має вигляд [11]:

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech} \left(\frac{t}{T_0} \right), \quad (19)$$

де T_0 - тривалість імпульсу.

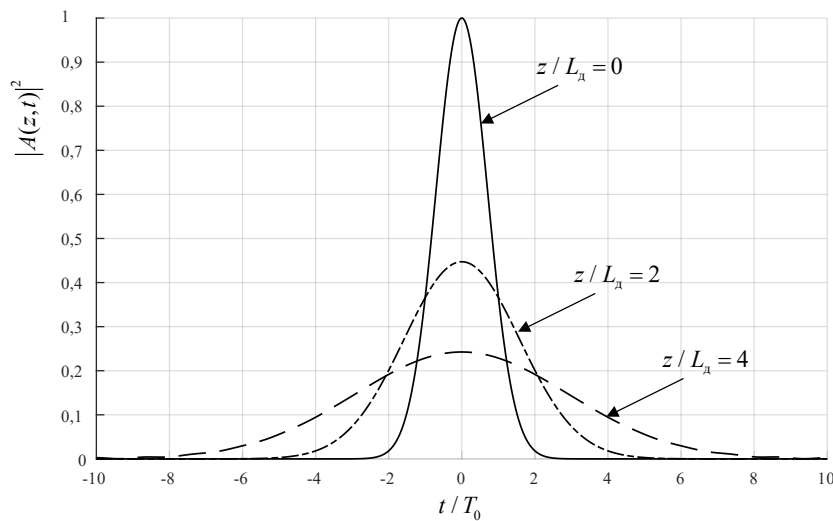


Рис. 4. Спотворення гаусівського імпульсу внаслідок хроматичної дисперсії
($\beta_2 = -20 \cdot 10^{-24} \text{ с}^2/\text{км}$; $T_0 = 1 \cdot 10^{-10} \text{ с}$; $L_d = 500 \text{ км}$; $N_c = 40$)

Пікова потужність імпульсу, необхідна для розповсюдження солітона, розраховується за виразом:

$$P_0 = N^2 \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2}, \quad (20)$$

де N – порядок солітону ($N \geq 0, N \in \mathbb{Z}$).

При розповсюдженні солітона вищих порядків спостерігається зміна його часової форми, яка повторюється через певну відстань z_0 , яка називається періодом солітона [1]:

$$z_0 = \frac{\pi}{2} L_d = \frac{\pi}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2|}. \quad (21)$$

Випадок $N=1$ відповідає основному солітону, який не змінює часової форми при розповсюдженні в просторі. Приклад розрахунку просторової форми солітонів першого та другого порядку в середовищі MatLab наведено на рис. 5. Отримана часово-просторова форма сигналу повністю відповідає поведінці оптичних солітонів, що підтверджує достовірність функціонування розробленого програмного коду до вище описаної математичної моделі ОВ на базі ФМРФФ.

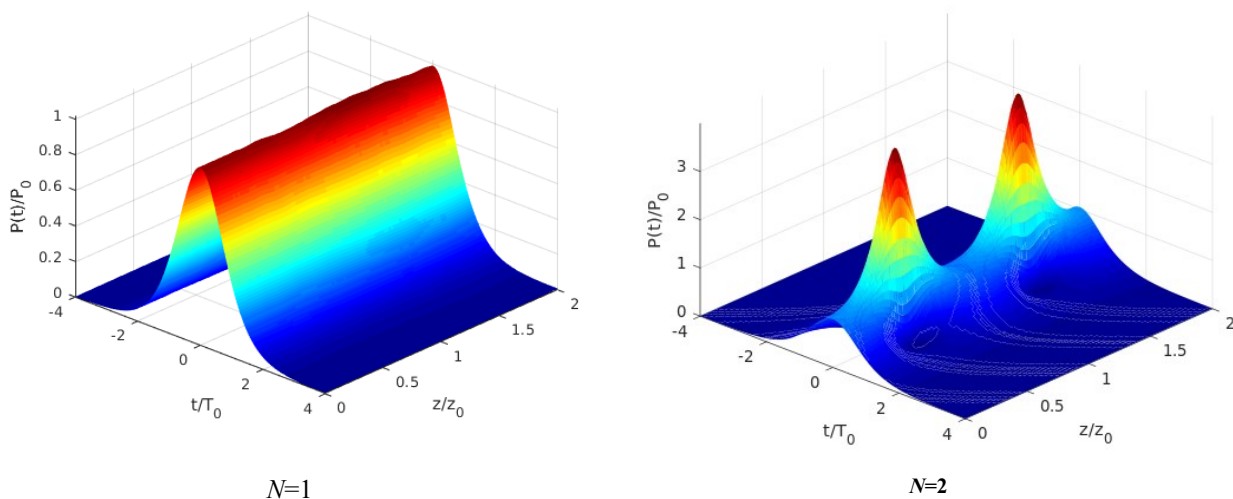


Рис. 5. Еволюція форми основного солітону та вищого порядку
($\beta_2 = -20 \cdot 10^{-24} \text{ с}^2/\text{км}$; $A_{\text{эф}} = 80 \text{ мкВт}$; $\gamma = 1,317 \text{ 1/(Вт*км)}$; $T_0 = 7,09 \text{ пс}$; $z_0 = 3,948 \text{ км}$)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В статті виконано аналіз методів математичного моделювання оптичного волокна. Встановлено, що найбільш розповсюдженим є Фур'є метод з розщепленням по фізичним факторам, оскільки він дозволяє достовірно реалізувати внесення дисперсійних та нелінійних спотворень в оптичний сигнал. З метою зменшення обчислювальних ресурсів, довжини елементарних відрізків ОВ доцільно розраховувати за допомогою методу нелінійного повороту фази. Первинне тестування розробленої моделі ВОСП

пропонується проводити на прикладі аналізу розповсюдження сигналу з простою формою, наприклад, гаусового імпульсу. Більш глибоку перевірку доцільно виконувати з використанням імпульсів оптичних солітонів першого та вищих порядків.

В подальших дослідженнях слід виконати аналіз більш комплексних моделей оптичного середовища розповсюдження для поляризованих сигналів.

Література

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.
2. Shaw J.K. Mathematical principles of optical fiber communications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004. 93 p.
3. Педяш В.В. Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. 2010. – № 1. – С. 109-114.
4. Педяш В.В. Влияние нелинейных искажений оптических волокон на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 2. – С. 70-74.
5. Peddanarappagari K.V., Brandt-Pearce M. Volterra Series Transfer Function of Single-Mode Fibers. Journal of Lightwave technology. 1997. Vol. 15, No 12. P. 2232-2241.
6. Anilionis R., Andriukaitis D., Anilioniene J. Modeling of Nonlinear Circuit using Volterra Series. Elektronika ir elektrotechnika. 2012. No 4(120). P. 43-46.
7. Brandt-Pearce M., Xu B. Comparison of FWM- and XPM-Induced Crosstalk Using the Volterra Series Transfer Function Method. Journal of Lightwave technology. 2003. Vol. 21, No 1. P. 40-53.
8. Brandt-Pearce M., Xu B. Modified Volterra Series Transfer Function Method. IEEE Photonics technology letters. 2002. Vol. 14, No 1. P. 47-49.
9. Педяш В.В. Усовершенствование модели распространения оптического сигнала на базе рядов Вольтерра / В.В. Педяш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С. 96-103.
10. Sinkin O.V., Holzlohner R., Zweck J., Menyuk C.R. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems. Journal of Lightwave Technology. 2003. T. 21, № 1. C. 61–68.
11. Mitschke F., Mahnke C. Soliton Content of Fiber-Optic Light Pulses. Applied Sciences. 7, no. 6: 635.

References

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.
2. Shaw J.K. Mathematical principles of optical fiber communications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004. 93 p.
3. Pedjash V.V. Vliyanie fazovoy samomoduljacji opticheskogo signala na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedjash, O.S. Reshetnikova // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. 2010. – № 1. – S. 109-114.
4. Pedjash V.V. Vliyanie nelinejnyh iskazhenij opticheskikh volokon na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedjash // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 2. – S. 70-74.
5. Peddanarappagari K.V., Brandt-Pearce M. Volterra Series Transfer Function of Single-Mode Fibers. Journal of Lightwave technology. 1997. Vol. 15, No 12. P. 2232-2241.
6. Anilionis R., Andriukaitis D., Anilioniene J. Modeling of Nonlinear Circuit using Volterra Series. Elektronika ir elektrotechnika. 2012. No 4(120). P. 43-46.
7. Brandt-Pearce M., Xu B. Comparison of FWM- and XPM-Induced Crosstalk Using the Volterra Series Transfer Function Method. Journal of Lightwave technology. 2003. Vol. 21, No 1. P. 40-53.
8. Brandt-Pearce M., Xu B. Modified Volterra Series Transfer Function Method. IEEE Photonics technology letters. 2002. Vol. 14, No 1. P. 47-49.
9. Pedjash V.V. Usovershenstvovanie modeli rasprostraneniya opticheskogo signala na baze rjadov Vol'terra / V.V. Pedjash // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2015. – № 2. – S. 96-103.
10. Sinkin O.V., Holzlohner R., Zweck J., Menyuk C.R. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems. Journal of Lightwave Technology. 2003. T. 21, № 1. C. 61–68.
11. Mitschke F., Mahnke C. Soliton Content of Fiber-Optic Light Pulses. Applied Sciences. 7, no. 6: 635.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 08 від 23.02.2023 р.**

Підп. до друку 23.02.2022 р. Ум.друк.арк. 54,31 Обл.-вид.арк. 51,67
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63