

Безпрозваних Ганна Вікторівна, доктор технічних наук, проф., тел. (+38) 050-343-55-59; Hanna.Bezprozvannikh@khpі.edu.ua (ORCID ID: 0000-0002-9584-3611)
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

РЕТРОСПЕКТИВА ОПТОВОЛОКОННОЇ ТЕХНІКИ – НЕВІД'ЄМНОЇ СКЛАДОВОЇ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ “ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНА, КАБЕЛЬНА ТА ОПТОВОЛОКОННА ТЕХНІКА”

***Анотація.** Представлено історичні та науково-технічні передумови виникнення й розвитку волоконної оптики. Акцентовано увагу на технічних рішеннях щодо технології виготовлення зі зменшеними втратами електромагнітної енергії у оптичних волокна. Проаналізовано чинники сприяння відкриття спеціалізації “Оптоволоконна техніка” на кафедрі “Електроізоляційна та кабельна техніка”. Обґрунтовано своєчасність та необхідність підготовки спеціалістів в області оптоволоконної техніки для задоволення потреб кабельної промисловості України у випуску інноваційних волоконно-оптичних кабелів. Наголошено на ефективності ігрового проектування, міждисциплінарних занять для активізації навчального процесу та мотивації студентів спеціалізації до навчання. Показано сучасні інноваційні високоефективні інтегровані з оптичним високовольтні кабельні системи для електроенергетики. Представлено результати наукових досліджень щодо впливу радіаційного опромінення на механічні властивості конструктивних елементів волоконно-оптичних кабелів.*

***Ключові слова:** оптоволоконна техніка, технологія виготовлення, оптичні кабелі, коефіцієнт згасання, ігрове проектування, міждисциплінарність в освіті.*

Bezprozvannykh Ganna, Dr. techn. sciences, Professor; (+38) 050-343-55-59; Hanna.Bezprozvannukh@khpі.edu.ua (ORCID ID: 0000-0002-9584-3611)
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine,

RETROSPECTIVE OPTICAL FIBER TECHNIC – AN INTEGRAL PART OF THE SPECIALIZATION "ELECTRICAL INSULATION, CABLE AND OPTICAL FIBER TECHNIC"

***Abstract.** The historical and scientific and technical prerequisites for the emergence and development of fiber optics are presented. Attention is focused on technical solutions for manufacturing technology with reduced losses of electromagnetic energy in optical fibers. The factors contributing to the opening of the specialization "Optical fiber technic" at the department "Electrical insulation and cable technic" were analyzed. The timeliness and necessity of training specialists in the field of optical fiber technic to meet the needs of the cable industry of Ukraine in the production of innovative fiber optic cables is substantiated. Emphasis is placed on the effectiveness of game design, interdisciplinary classes to activate the educational process and motivate students of specialization to study. Shown are modern innovative high-efficiency integrated optical high-voltage cable systems for the power industry. The results of scientific research on the influence of radiation exposure on the mechanical properties of structural elements of fiber-optic cables are presented.*

***Keywords:** optical fiber technic, manufacturing technology, optical cables, attenuation coefficient, game design, interdisciplinarity in education.*

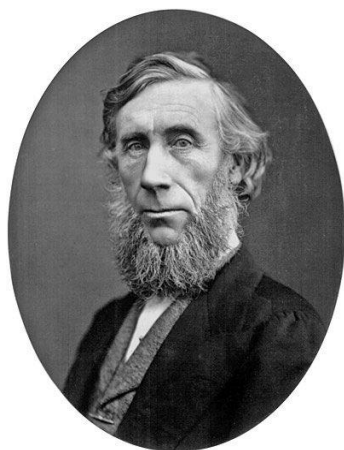
ВСТУП. У сучасному оцифрованому світі з високим ступенем зв'язку волоконна оптика – революційна технологія, яка забезпечує сучасний зв'язок швидше, надійніше та ефективніше. Волоконна оптика – дивовижна, а часом загадкова частина телекомунікацій. Від моменту створення концепції до реалізації в широкому діапазоні застосувань оптичне волокно, як основа волоконно-оптичних кабелів, відіграло та відіграє ключову роль у покращенні глобального зв'язку та сприянні обміну інформацією. Вплив волоконної оптики на сучасні комунікації, від її історичної еволюції до її інноваційного застосування в різних галузях промисловості – вражає. Завдяки своїй здатності передавати дані за допомогою імпульсів світла – електромагнітних хвиль оптичного діапазону через скляні або пластикові діелектричні хвилеводи волоконна оптика суттєво удосконалила спосіб спілкування, сприяючи передачі великих обсягів інформації з безпрецедентною швидкістю на значну відстань.

У бізнесі, де швидка передача даних має вирішальне значення для продуктивності, чи в онлайн-розвагах, де користувачі потребують потокового відео високої чіткості та онлайн-ігор без затримок, оптичне волокно проклало шлях до швидшого та надійнішого підключення. Волоконна оптика стала фундаментальним каталізатором у трансформації сучасних комунікацій, забезпечуючи міцну, надійну, високоефективну інфраструктуру для передачі даних із надвисокою швидкістю. У все більш взаємопов'язаному світі волоконна оптика є основою комунікаційних мереж, що забезпечує швидке та надійне з'єднання в усіх сферах повсякденного життя.

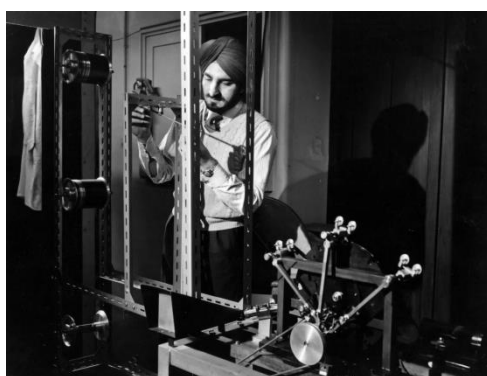
ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ. Історія волоконної оптики почалася в дев'ятнадцятому столітті: в 1870 році на зібранні Королівського суспільства вчений Джон Тиндалл (рис.1,*a*) на основі законів геометричної оптики продемонстрував можливість управління світлом (рис. 2,*a*). Світло, проведене через вигнутий потік води, захоплюється всередині потоку на підставі закону повного дзеркального відбиття (рис. 2,*б* – демонстрація розповсюдження світла видимого діапазону від лазерного джерела у заготовці оптичного волокна) [1] - [2]. Саме цей принцип став основою технології волоконної оптики – розповсюдження світла – електромагнітних хвиль у оптичних волокнах [3] - [6].

На початку 20-го століття, у 1910-х роках, Чарльз Вернон Бойз запропонував використовувати тонкі скляні волокна для передачі зображень. На той час це залишалось ідеєю: технології для втілення у реальність не існувало. В той же час це надихнуло на подальші теоретичні та експериментальні дослідження діелектричних хвилеводів, в тому числі гнучких скляних стрижнів. Це призвело до розроблення у 50-х роках волокон для передачі зображень Браєном О'Брієном – працівником Американської оптичної компанії, і Наріндером Капані під час роботи над докторською дисертацією з колегами в Імператорському науково-технологічному коледжі в Лондоні. Саме Капані називають «батьком волоконної оптики» [1]-

[2]. Регулярно вкладені скляні волокна діаметром 50 мкм без оболонки знайшли застосування в волоконно-оптичних джгутах та використовуються, наприклад, в медичних або технічних ендоскопах для візуального спостереження внутрішніх органів людей та поверхонь складних відповідальних деталей. Доктор Капані (рис.1,б) першим у 1956 році розробив скляні волокна в скляній оболонці, розробив технологію їх укладки, яка у видозмінній формі використовується в промисловості у якості стандартної, та запропонував термін “волоконна оптика” – це оптика на основі активних або пасивних волокон, застосовувана для передачі світла (ультрафіолетової, видимої та інфрачервоної областей спектру) по заданому шляху [1]-[6].



a



б

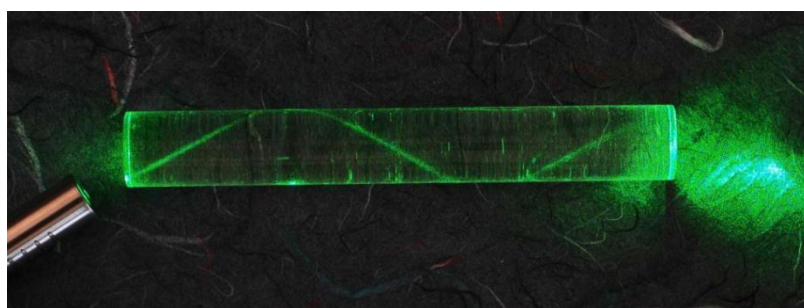


в

Рисунок 1 – Фотографії вчених Тиндалла (а), Капані (б) та Нобелівського лауреата з фізики 2009 р. К.С.Као (в) [1]-[2]



a



б

Рисунок 2 – Візуалізація процесу розповсюдження світла видимого діапазону у струмені води (а) та у заготівлі оптичного волокна (б) [1]-[2]

У 1957 році Гордон Голд – випускник Колумбійського університету сформулював принципи роботи лазера як інтенсивного джерела світла. Теоретичні роботи Чарльза Таунса спільно з Артуром Шавловим в Bell Laboratories викликали бурхливий сплеск експериментальних досліджень, спрямованих на створення лазера. У 1960 році Теодор Меймен створив перший у світі рубіновий лазер (лазер – **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – Посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання). В цьому ж році

Таунс продемонстрував роботу гелій-неонового лазера. Сьогодні шкільні лабораторії з фізики оснащені саме такими лазерами, які працюють у видимому діапазоні довжини хвилі ($\lambda=0,68$ мкм, рис. 3). У 1962 році лазерна генерація була отримана на напівпровідниковому кристалі. Такі типи лазерів використовуються у волоконній оптиці. Голду з великим запізненням, у 1988 році, вдалося отримати чотири основних патенти за результатами робіт, виконаних їм в 50-і роки і присвячених принципу роботи лазера [1]-[2].

В 1961 р. Снітцер отримав лазерні волокна зі скла з добавкою рідкісноземельного елементу неодиму і дослідив їх використання в якості підсилювачів світла. На сьогоднішній день волоконно-оптичні підсилювачі є невід'ємними компонентами синхронних мереж цифрової ієрархії та основою для створення повністю оптичних мереж без застосування квантово-електронних модулів. Власне, останні є найвразливішим компонентом мережі до електромагнітних завад [3]-[6].

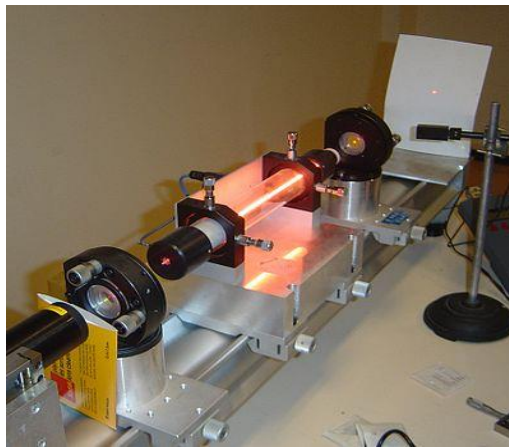


Рисунок 3 – Гелій-неоновий лазер.

Область, що світиться, в центрі – свічення позитивного стовпа

Найзначніший прорив у волоконній оптиці стався у 1966 році: Чарльз К. Као (рис. 1,в) та його колега Джордж Хокхем – працівники British Standard Telecommunications Experimental Ltd, у Сполученому Королівстві, опублікували статтю «Поверхневі хвилеводи з діелектричних волокон для оптичних частот» [7]. У своїй статті автори зазначали: ослаблення оптичних сигналів у оптичних волокнах можна зменшити шляхом зменшення домішок у скляних волокнах. Оптичні волокна можна використовувати в області практичного зв'язку при досягненні згасання менше 20 дБ/км (для порівняння: сучасні виті пари для структурованих кабельних систем категорії 5е мають коефіцієнт згасання 22 дБ/100м на частоті 100 МГц!). Пізніше ця стаття стала основою теорії оптоволоконного зв'язку та відкрила двері в еру оптичного волокна – як основного конструктивного елементу оптоволоконних кабелів. Наприкінці того ж року в Лондоні інженер компанії Corning Incorporated [8], яка є найстарішим виробником скла в США, Вільям Шейвер відвідав дослідницьку лабораторію та наполегливо рекомендував компанії провести дослідження оптичного волокна. Рекомендацію серйозно

сприйняли керівники Corning Incorporated і незабаром було розпочато розробку скляних волокон високої чистоти [8-9].

У 1970 році Роберт Маурер зі своїми колегами з Corning Glass Works отримав перше оптичне волокно із згасанням менше 20 дБ/км [9]. Важливо, що запропоновано було використовувати не кристалічний оксид кремнію, а плавлений, аморфний, SiO_2 . Компанія Corning змогла досягати високої температури 2000°C , за якої відбувається реакція гідролізу та компоненти, які складають основу оптичного волокна, реагують у газовій фазі. Завдяки цьому досягається висока ступінь очищення. До 1972 року в лабораторних умовах технологічний процес модифікованого хімічного осадження з парової фази (MCVD) дозволив отримати оптичні волокна з рівнем згасання електромагнітної енергії в 4 дБ/км, що відповідало критерію Као і Хокхема [7].

У наступні роки через економічну рецесію компанія Corning зіткнулася з певними труднощами у просуванні комерціалізації своєї волоконно-оптичної технології. Для залучення коштів були підписані угоди з декількома компаніями про спільну розробку щодо комерціалізації оптоволоконної технології. У 1976 році Американська телефонно-телеграфна компанія (AT&T) встановила першу в світі експериментальну волоконно-оптичну систему зв'язку в Атланті, довжина якої становила приблизно 1,25 милі (2000 метрів) [9]. Через три роки, у 1979 році, японська фірма Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) розробила кварцове волокно з низькими втратами зі значенням загасання 0,2 дБ/км, що було близьким до теоретичної межі фундаментальних втрат енергії, обумовлених розсіюванням світла на неоднорідностях структури кварцового волокна [1-2]. У 1980 році на Зимових Олімпійських іграх у Лейк-Плесіді (США) вперше успішно передали телевізійні сигнали за допомогою оптоволоконних кабелів [9].

Безумовно, всі технічні інновації спочатку впроваджено у військово-промисловий комплекс. Так, військово-морські сили США впровадили волоконно-оптичну лінію на борту корабля Little Rock в 1973 році [9]. У 1976-му в рамках програми ALOFT військово-повітряні сили змінили кабельну бортову проводку літака А-7 на волоконно-оптичну. При цьому кабельна система з 302 різних типів мідних кабелів загальної протяжності 1260 м і вагою 40 кг замінена на 12 волокон загальною довжиною 76 м і вагою 1,7 кг [9]. Військові вперше застосували у 1977 році 2-х кілометрову волоконно-оптичну кабельну систему зі швидкістю передачі інформації 20 Мб/с для зв'язку наземної супутникової станції з центром управління.

Дослідження та розробка зв'язку із застосуванням волоконно-оптичних кабелів в NTT Laboratories (Японія) розпочато в 1976 році зі швидкістю передачі 32 Мбіт/с, яка була збільшена до 400 Мбіт/с за допомогою одномодового оптичного волокна в 1982 році [1-2].

У 1977 році компаніями AT&T і GTE (США) створили комерційні телефонні системи на основі оптичних кабелів. Ці системи довели ефективність та високу ступінь захищеності передачі інформації завдяки надзвичайним властивостям оптичних волокон – високоякісного діелектрика та слабо магнітного матеріалу. У 1980-му AT&T оголосила про амбіційний проект волоконно-оптичної системи, що зв'язує між собою Бостон і Річмонд [9]. Реалізація проекту наочно продемонструвала швидкісні якості нової технології в серійних високошвидкісних системах, а не тільки в експериментальних. Технічна та технологічна ера впровадження волоконно-оптичних кабелів було розпочато. В 1983 році випущено одномодовий волоконно-оптичний кабель, практичне використання якого було пов'язано з безліччю проблем. До 1985 року провідні телекомунікаційні компанії США компанії AT&T і MCI удосконалили одномодові оптичні системи та підтвердили їх у якості стандарту для майбутніх проектів [9].

У 1988 році зусиллями консорціуму з AT&T, British Telecom і France Telecom на відстань 5846 км на глибині 1000 м прокладено перший трансатлантичний підводний оптичний кабель ТАТ-8, який з'єднав Сполучені Штати Америки, Великобританію та Францію. Вартість проекту становила 300 млн. дол. В конструкції підводного кабелю застосовано одномодове оптичне волокно, яке працює на довжині хвилі 1,31 мкм. Довжина ділянки підсилювання становила 50 км. Швидкість передачі сигналів – 280 Мбіт/с з можливістю одночасної передачі 40 000 телефонних сигналів. Важливо, що повністю змонтований з муфтами, ретрансляторами такий оптичний кабель довжиною 6000 км (рис.4,б) для прокладання завантажено на спеціальний корабель ((рис.4,в)). Вкрай висока чутливість оптичного волокна до механічних зусиль, що розтягують, обумовило саме таку спеціальну технологію прокладання [1]-[9].

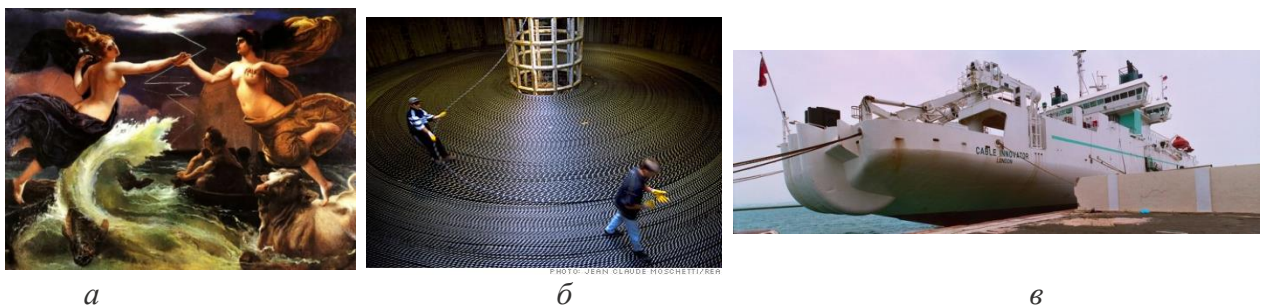


Рисунок 4 – Від прокладання першого трансатлантичного телеграфного кабелю (алегорія у вигляді Європи та Північної Америки – картина художника Яна Матейка розміщена у головному корпусі Львівської політехніки) до прокладання підводного оптичного кабелю ТАТ-8

У 1990 році Лінн Моллінар, співробітник Bellcore, продемонстрував можливість передачі сигналу без регенерації зі швидкістю 2,5 Гб/с на відстані близько 7500 км [9].

Дві основні оптичні характеристики оптичних волокон, які визначають дальність передавання сигналу: коефіцієнт згасання електромагнітної енергії та часова дисперсія –

спотворення форми сигналу [3-4]. Для відновлення потужності оптичного сигналу застосовують підсилювачі, котрі встановлюються через кожні (50-100) км у волоконно-оптичній лінії із застосуванням одномодового оптичного волокна при роботі з напівпровідниковим лазером на довжині хвилі 1,31 та 1,55 мкм відповідно [10-11].

Для відновлення сигналу у часовій області – регенератори, тобто повна процедура регенерації цифрового оптичного сигналу: підсилення та перетворення оптичного цифрового сигналу у електричний, електричний цифровий – у аналоговий електричний, відтворення первинної тривалості та форми електричного сигналу зі зворотнім порядком перетворення: електричний – у цифровий електричний – у оптичний цифровий. У представленій системі Моллиара лазер працював, по-перше, у режимі генерації солітонів – імпульсів, котрі зберігають свою форму та тривалість без часової дисперсії завдяки нелінійному ефекту третього порядку в одномодовому оптичному волокні. По-друге, застосовано підсилювачі на одномодовому оптичному волокні з домішками рідкоземельного елементу ербію (EDFA) [10-11]. У той же час японської компанії Nippon Telephone & Telegraph досягнуто швидкість 20 Гб/с на більш короткій відстані.

Розвиток волоконної оптики та Інтернету є взаємопов'язаними, але різними досягненнями. Волоконна оптика, як технологія, виникла ще до Інтернету. Ранні дослідження та розробки волоконної оптики забезпечили кабельну інфраструктуру, яка згодом стала основою розвитку Інтернету. Інтернет почав формуватися наприкінці 1960-х років із створенням мережі ARPANET – прообразом сучасного Інтернету [2],[6]. ARPANET розроблено для з'єднання невеликої кількості дослідницьких установ і державних установ із застосуванням телефонних кабелів для передачі даних. Технічні можливості таких кабелів стали очевидними із підвищеними вимогами щодо зростання попиту на вищі швидкості і більші відстані передачі даних. Наприкінці 1990-х років почали розроблятися спеціальні кабелі на основі витих пар відповідної категорії для структурованих кабельних систем. В той самий час оптоволоконна технологія стала невід'ємною частиною розширення Інтернету, забезпечуючи високошвидкісну магістраль, необхідну для ефективної передачі даних. Розгортання волоконно-оптичних кабелів дозволило Інтернету швидко розростатися, враховуючи вибухове зростання трафіку даних, спричинене поширенням комп'ютерів, мобільних пристроїв і онлайн-сервісів.

Метою даного дослідження є обґрунтування необхідності відкриття спеціалізації “Оптоволоконна техніка” на кафедрі “Електроізоляційна та кабельна техніка” з оглядом комплексу складових для її повноцінного функціонування.

ПІДСТАВИ ВІДКРИТТЯ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ “ОПТОВОЛОКОННА ТЕХНІКА” НА КАФЕДРІ. Ініціатори відкриття спеціалізації “Оптоволоконна техніка” та безпосередніми

виконавцями щодо наповнення методичним змістом з науковою складовою та організаційними питаннями – доц., к.т.н. Набока Б.Г., доц., к.т.н. Безпрозваних Г.В.

Набока Борис Григорович – професор, д.т.н., талановитий та знаний вчений, засновник наукової школи з електричної ізоляції та її діагностики. Першим в Україні започаткував моніторинг старіння кабелів, що працюють на атомних електричних станціях. Під керівництвом професора Набоки Б.Г. захищена 1 докторська дисертація (науковий консультант Безпрозваних Г.В.) й п'ять кандидатських дисертацій (науковий керівник Безпрозваних Г.В., Гладченка В.Я., Чан Кі Фука, Альбдешті, Федяй Г.С.).

Безпрозваних Г.В. мала практичний досвід роботи на заводі “Скловолокно”, який спеціалізувався, у тому числі, на створенні металізованих скляних волокон для військово-промислового комплексу, та заводі “Азовкабель”, який також виготовляв спеціальні польові кабелі з'язку для військових цілей.

Виникає питання: чому саме у Харкові, Харківському політехнічному інституті, на кафедрі “Електроізоляційна та кабельна техніка” у 1990 році розпочато роботу по відкриттю спеціалізації “Оптоволоконна техніка”? Цьому сприяло багато чинників.

У період підготовки та відкриття спеціалізації з 1987 по 1992 рр. кафедру очолював доц., к.т.н. Ломов С.Г.

[Посади, вчені та наукові звання наведено у хронологічному порядку, поступово у часі].

По-перше, висока мотивація колективу кафедри: доц., к.т.н. Набоки Б.Г., доц., к.т.н. Безпрозваних Г.В., доц., к.т.н. Гуріна А.Г., доц., к.т.н. Оболончика І.Б., доц., к.т.н. Страрусевої С.Ф., доц., к.т.н. Щебенюк Л.А., доц., к.т.н. Гладченка В.Я., доц., к.т.н. Ломова С.Г., ст. викл. Зеленської З.Б., ст. викл. Моїсєєвої Н.А.; розуміння актуальності та перспективності напрямку оптоволоконної техніки, безпосередньо оптичних кабелів.

На той час кафедра “Електроізоляційна та кабельна техніка” – єдина кафедра з підготовки інженерних кадрів для розвиненої кабельної та електроізоляційної бази України [12]. Кафедра “Електроізоляційна та кабельна техніка” у Київському політехнічному інституті в 1986 р. була приєднана до відкритої першої в Україні кафедри відновлюваних джерел енергії, яку очолив доц., к.т.н. **Кириленко Всеволод Михайлович** – відомий фахівець в області електротехнічних матеріалів, науковець, лауреат Державної премії України за 1989 рік [13].

Проведення методичних семінарів на кафедрі щодо:

на першому етапі – включення у навчальну програму дисципліни “Електротехнічні матеріали та технологія їх виготовлення” розділу “ Оптичні волокна на основі кварцу та полімерів. Технологія виготовлення”;

на другому – обґрунтування щодо викладання вперше розроблених навчальних дисциплін “Кабелі зв’язку” та “Фізичні основи оптоволоконної техніки” для студентів спеціальності “Електроізоляційна та кабельна техніка”.

Пропозиції зав. кафедри Ломова С.Г. щодо залучення до викладання розроблених дисциплін лекторів інших кафедр не отримали підтримки колективу кафедри. Самодостатність кафедри у фаховому, науковому та навчально-методичному забезпеченні викладання розроблених дисциплін перевірено часом та підкріплено підготовленими спеціалістами, провідними топ-менеджерами в області оптоволоконної техніки та кабелів зв’язку для кабельної промисловості України.

По-друге, в Україні знаходилися Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості (м. Бердянськ) та два потужні заводи з випуску кабелів зв’язку:

“Азовкабель” (м. Бердянськ) з унікальною на той час сучасною заводською лабораторією щодо вимірювань комплексу, у тому числі і електричних, параметрів кабелів; “Одескабель” (м. Одеса) – один з провідних підприємств СРСР із виробництва кабелів для телефонного зв’язку, монополіст з виробництва телефонних симетричних кабелів ємністю до 2400 пар.

Так, цех № 10 заводу “Азовкабель” спеціалізувався на випуску зонних та магістральних симетричних та магістральних коаксіальних кабелів, а також інших кабелів для спеціальних та військових потреб.

На заводі “Одескабель” – першому та єдиному кабельному підприємстві СРСР у 1986 році відповідно до Постанови кабінету Міністрів встановлено обладнання фінської фірми “Nokia-Maillefer” з виробництва волоконно-оптичних кабелів та розпочато випуск оптичних кабелів у 1990 році. Важливо, що на підприємстві встановлено унікальні вежі висотою 15 метрів по витяжці оптичного кварцового волокна із високо прозорих оптичних заготівель.

По третє, завод “Скловолокно” (м. Бердянськ) – одне з двох підприємств СРСР підпорядкування Міністерству електротехнічної промисловості; відділення з електротехнічних матеріалів Всесоюзного науково-дослідного інституту електроізоляційних матеріалів (м. Харків); науково-виробниче підприємство “Хартрон” (м. Харків) з власним виробництвом спеціальних кабелів для ракетно-космічної промисловості; Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування (НДТП) [14-15] – державне підприємство в складі Національного космічного агентства України, головна організація по технології, матеріалознавству та стандартизації приладобудування, у тому числі військової техніки (м. Харків) та Державне підприємство завод “Радіореле” (м. Харків) з унікальним прецизійним японським обладнанням виготовлення волоконно-оптичних з’єднувачів (конекторів).

Необхідно наголосити, що на момент відкриття спеціалізації студенти кафедри проходили переддипломну практику та виконували дипломне проєктування на заводі

“Одесакбель”; особливому конструкторському бюро кабельної промисловості (м. Митищі, РФ); науково-виробничому підприємстві “Хартрон”; заводі “Радіореле” за темами щодо розроблення технології виготовлення, конструкції магістральних та спеціальних оптичних кабелів, електромагнітних впливів між оптичними волокнами, технології оптичних роз’ємів (керівники дипломних проєктів: доц., к.т.н. Набока Б.Г., доц., к.т.н. Безпрозванних Г.В.).

Фундаментальність, забезпечення міждисциплінарності, системності, комплексності шляхом поєднання викладання навчальних дисциплін у межах спеціальності, зокрема, “Електротехнічні матеріали” (викладачі: доц., к.т.н. Ломов, ст.викл. Моїсеєва Н.А.), “Хімія діелектриків” (викладач: доц., к.т.н. Гурина Г.В.), “Фізика діелектриків” (викладачі: доц., к.т.н. Оболончик І.Б., доц., к.т.н. Старусєва С.Ф.), “Кабельна техніка”(викладач: доц., к.т.н. Щебенюк Л.А.), “Техніка випробувань” (викладач: доц., к.т.н. Набока Б.Г.) з введеними дисциплінами “Фізичні основи оптоволоконної техніки”, “Основи оптоволоконної техніки: кабелі зв’язку”, “Нелінійні явища в оптичних кабелях” (викладач: доц., к.т.н. Безпрозванних Г.В.) з дисциплінами спеціалізації “Технологія виготовлення волоконно-оптичних кабелів”, “Розрахунок та конструювання волоконно-оптичних кабелів”, “Діагностика волоконно-оптичних кабелів” (викладач – керівник спеціалізації доц., к.т.н. Безпрозванних Г.В. [16-17]) – стали основою у підготовці спеціалістів в області оптоволоконної техніки.

ОРГАНІЗАЦІЙНІ, МЕТОДИЧНІ ТА НАУКОВІ СКЛАДНИКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ “ОПТОВОЛОКОННА ТЕХНІКА”. У 1990 р. сім студентів третього курсу обрали спеціалізацію “Оптоволоконна техніка” у складі спеціальності “Електроізоляційна та кабельна техніка”: Варич Володимир, Васильєва Оксана, Єхічев Андрій, Жезмер Світлана, Нікітина Анна, Пученя Андрій, Чуєв Євген.

Відповідно до технологічного звіту компанії з виготовлення оптичних волокон та волоконно-оптичних кабелів Lucent [9], наприкінці 1990-х оптичні кабелі розгорталися зі швидкістю приблизно 4800 км/год: загальна довжина оптичних волокон майже тричі оберталася навколо земної кулі щодня. Інтернет-революція та дерегуляція телекомунікаційного сектору з-під державного контролю, які відбулися майже в усьому світі, суттєво сприяли безпрецедентному зростанню за такий короткий час, яке рідко можна побачити в інших технологіях.

Оптичне волокно – надзвичайно наукомісткий продукт, який постійно вдосконалюється [18]-[22]. Так, компанія Corning вкладає у розвиток технології виготовлення оптичних волокон не менше 500 млн. дол. щорічно [8]. Розроблення та впровадження оптичних волокон та оптичних кабелів напряму пов’язано зі стандартизацією волоконної оптики Міжнародною Електротехнічною комісією (IEC) та Міжнародним телекомунікаційним Союзом (ITU-T) [18]-[25].

1. За безпосередньої ініціативи зав. кафедри Гуріна Анатолія Григоровича при підтримці проректора з наукової роботи проф., д.т.н. Марченка А.П. та керівництва заводу “Південкабель” – генерального директора доц., к.т.н. Золотарьова В.М., технічного директора к.е.н. Карпушенка В.П. із залученням промислових та науково-дослідних організацій наказом Держстандарту України від 19.03.1999 року № 126 створено Технічний комітет стандартизації № 131 “Електроізоляційна та кабельна техніка” з секретаріатом на кафедрі, тобто в НТУ “ХП”. Необхідно визначити потужну роботу, ентузіазм, відданість та високий професіоналізм Анатолія Григоровича при створенні та забезпеченні ефективної роботи ТК щодо гармонізації та впровадженню міжнародних та європейських стандартів у кабельну галузь України.

Гурин А.Г. – д.т.н., професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки 2019 р. за роботу «Електротехнологічний комплекс виробництва кабельних систем надвисоких напруг». До складу авторського колективу увійшли також представники Інституту електродинаміки НАН України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» та ПАТ «Завод Південкабель».

Своєчасність відкриття спеціалізації підтверджується початком випуску у 2001 р. на Одеському кабельному заводі кабелів категорії 5 на основі витої пари для комп'ютерних локальних мереж.

Кафедра звернулася з пропозицією щодо підтримки представників заводу “Одескабель” на отримання Державної премії України в галузі науки і техніки, яку було ухвалено Вченою радою університету. Три представники заводу, у тому числі генеральний директор к.т.н. Юргачев Д.В., у 2001 р. стали лауреатами Державної премії України за комплекс дослідно-конструкторських та технологічних розробок по впровадженню високих технологій при виробництві волоконно-оптичних кабелів [26].

Розвиток технології “Волокно в будинок” (Fiber to the Home – FTTH), пасивних оптичних мереж (PON – концепція запропонована у 1987 році дослідниками з British Telecom) сприяли відкриттю на заводі “Південкабель” у 2004 році цеху з виробництва волоконно-оптичних кабелів. Важливо, що у налагодженні незвичного для даного підприємства напряму виготовлення волоконно-оптичних кабелів з доведенням приросту коефіцієнту згасання електромагнітного енергії менше 20% приймали участь випускники спеціалізації «Оптоволоконна техніка», зокрема, начальник цеху – Пученя А.М., технологи – Обозний А.Л., Зиков М.Б., Сафін І.Р., Соколенко О.М., Тарасевич Д.О., Гурина С.М., Глуценко К.А.

2. Значну роль у можливості активізації навчального процесу з винятковою перспективою наочно бачити передові технології, сучасні конструкції та технологічне обладнання для виробництва оптичних кабельних систем відіграло проведення занять на філії кафедри – заводі “Південкабель”, створеної у 1998 році. Проведення в активній формі лекцій,

практичних та лабораторних занять, виконання дипломних проєктів надало можливості студентам отримати унікальний практичний досвід (рис.5,*a*).

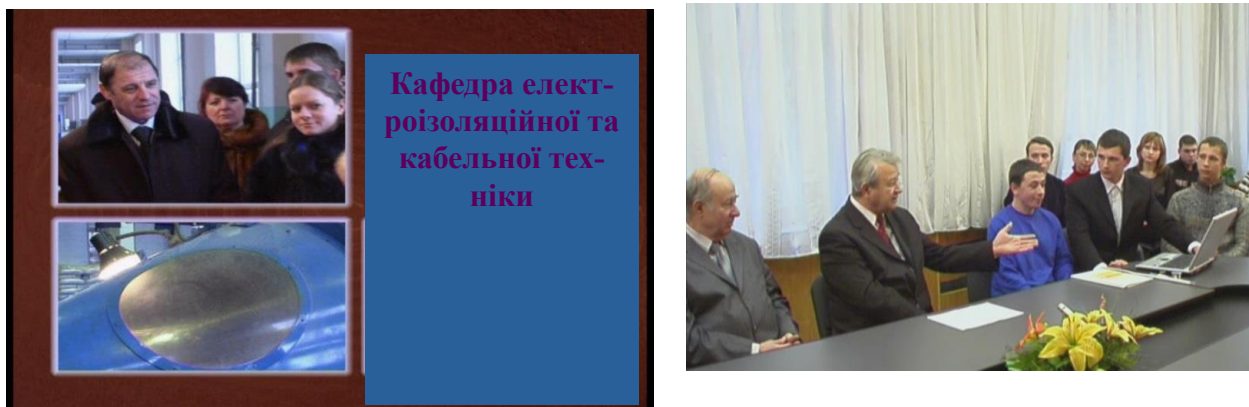
Цьому сприяло також долучення студентів спеціалізації та спеціальності у ігровому проектуванні, започаткованому в університеті проф. Горелим О.В. (рис. 5, *б*). Починаючи з 2002 року на кафедрі щорічно проводиться захист курсових проєктів та курсових робіт з елементами ігрового проектування, міждисциплінарні заняття серед студентів різних курсів спеціальності. Так, захист у 2010 р. курсової роботи з дисципліни «Фізичні основи оптоволоконної техніки» продемонстрував творчій потенціал, творче мислення та мотивацію досягнення наукового результату магістром Костюковим Іваном. В наступний час Іван Олександрович – доктор технічних наук, зав. кафедри “Теоретичні основи електротехніки” НТУ “ХП”.

У 2012 році вперше в історії університету відбулося спільне комплексне міждисциплінарне ігрове проектування студентів кафедри та студентів спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання» Харківського університету повітряних сил ім. Івана Кожедуба Міністерства оборони України. За результатами вирішення технічних задач та доповідей на основі голосування студентів визначено переможців: Кессаєв Олександр, Тоїчкіна Анна, Шерстобітова Маргарита, Калюжна Оля, Мудраченко Дар’я, Ведмідь Анна (рис. 6, *б*).

Олександр Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедри “Електроізоляційна та кабельна техніка” НТУ “ХП”.

Студенти спеціалізації мали можливість долучитися та спостерігати за розвитком оптоволоконної локальної обчислювальної мережі університету: від прокладання у Харкові першого в історії вищих навчальних закладів 4-х модульного оптичного кабелю зовнішнього прокладання фірми SieCor (Siemens+Corning) з відповідною технікою монтажу та підключення до прокладання одномодульного оптичного кабелю фірми ВІСС (Велика Британія) з зусиллям, що розтягує, 800 Н з пошуком місця обриву оптичного волокна із застосуванням рефлектометру фірми Schlumberger [27].

Так, в 2004 році дипломний проєкт «Навчальна лабораторія «Фізичні основи оптоволоконної техніки» студента групи Е-48а Тарасевича Дениса Олександровича посів перше місце серед студентських робіт Електроенергетичного факультету. В склад лабораторії входять, зокрема, конструкції волоконно-оптичних кабелів внутрішнього та зовнішнього прокладання, оптичний рефлектометр, вимірювачі оптичної потужності для визначення коефіцієнту згасання в оптичному кабелі, зварювальний апарат.



a

б

Рисунок 5 – Генеральний директор ПАТ «Завод Південкабель», д. т. н., професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки Золотарьов Володимир Михайлович (*a*) акцентує увагу студентів 5-го курсу групи Е-43а спеціалізації «Оптоволоконна техніка» Бабенку Олександр та Мамай Світлані на ефективність ігрового проектування; на зустрічі 6 грудня 2007 року з ректором НТУ проф. ТОВАЖНЯНСЬКИМ Л.Л. (*б*) магістр Холодков Олексій презентує результати спільного курсового проекту з телекомунікаційних кабелів, виконаного Туніком Дмитром, Любимовим Олександром та Степаненком Олександром



a

б

в

Рисунок 6 – Перед початком (*a*), в процесі (*б*) та після (*в*) захисту курсових робіт студентами кафедри

Дипломна робота «Технічна діагностика кабелів цеху радіаційної безпеки АЕС» магістра групи Е-41а Ляшенко Ольги Ігорівни нагороджена першою премією на міському конкурсі студентських робіт.

3. Викладачі кафедри активно приймали участь у семінарах, конференціях, виставках щодо сучасних тенденцій та інновацій в області оптоволоконної техніки [28]-[40]. Зокрема, у 1993 році на Міжнародній науково-технічній конференції «Волоконно-оптичні лінії зв'язку та системи передачі інформації «ВООСП – 93» представлено доповіді «Навчальна лабораторія оптоволоконної техніки кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» [29] та «Ієрархія елементів оптоволоконної техніки в об'єктно-орієнтованому програмуванні» [30] з демонстрацією на екрані комп'ютера (на той час ще не було ноутбуків: інформацію записано на дискеті!) траєкторії розповсюдження променів (рис.7) та структури електромагнітних хвиль у багатомодових оптичних волокнах. На Міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці та енергетиці» (Львів, 1995 р.) науковій спільноті представлено доповідь «Моделювання фізичних процесів в елементах волоконно-оптичної техніки» [32]. Важливим моментом стала публікація у 1998 р. статті «Нелінійні явища в

оптичних кабелях” [34-35] (рис. 8) та зроблені доповіді “Fiber optic tube diagnostic by using the reflectograms” у 2000 р. на 2nd International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling «LFNM’2000» [37] і у 2005 р. “Influence of radiation on properties of materials and losses of optical cables ” на III Міжнародній конференції з оптоелектронних технологій [40].

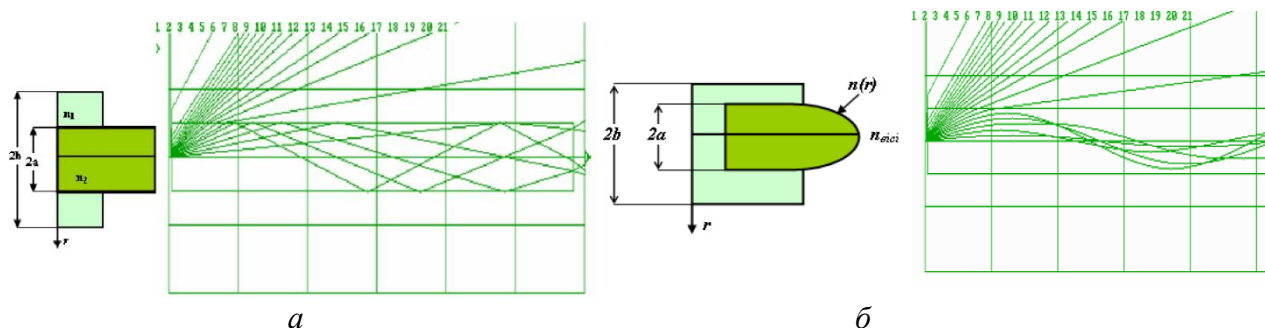


Рисунок 7 – Моделювання траєкторії розповсюдження променів у багатомодових оптичних волокнах зі ступінчастим (а) та градієнтним (б) профілями показника заломлення [33]

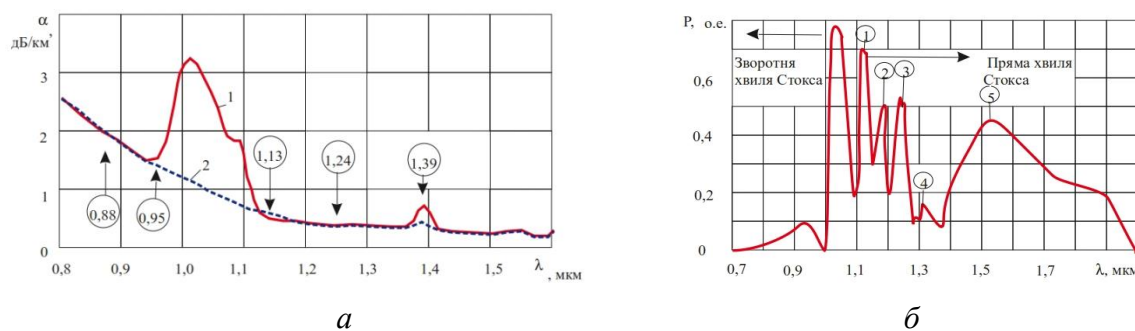


Рисунок 8 – Прояв комбінаційного розсіювання, обумовленого наявністю гідроксильної групи (а), в оптичних кварцових волокнах та виникнення хвиль Стокса при розповсюдженні лазерного випромінювання в осерді (б) оптичного волокна [34-35]

Випуск силових кабелів високої та надвисокої напруги обумовив необхідність створювати інтегровані з оптичним кабельні системи (рис. 9,а) для моніторингу в режимі реального часу струменевого навантаження силових кабелів. Саме на застосуванні нелінійних ефектів (рис.8,б) в оптичних волокнах при розповсюдженні лазерного випромінювання виявляється можливість спостерігати за розподілом температури по довжині силового кабелю (рис. 8,б) [41-43]. Конвергенція силових та оптичних кабелів є ефективним шляхом до створення «розумних» енерго-інформаційних мереж, що є вкрай важливим трендом у енергетиці [44-45].

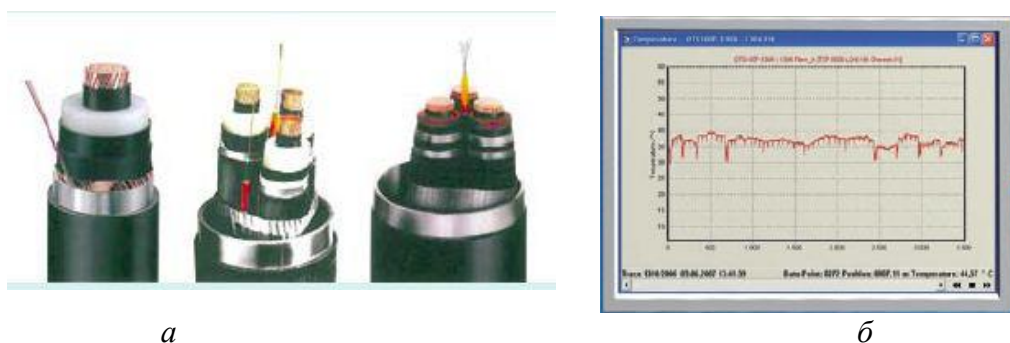


Рисунок 9 – Конструкції силових високовольтних кабелів з вбудованим оптичним волокном (а) та рефлектограма розподілу температури (б) вздовж довжини силового кабелю

Прикладом застосування оптичного волокна у якості датчика для визначення технічного стану трубопроводів став дипломний проєкт «Сучасна цифрова система технологічно-службового зв'язку та моніторингу стану трубопроводів на основі волоконно-оптичних кабелів», виконаний та успішно захищений студентом-іноземцем з Туркменістану Шамуратовим Муратом у 2017 року (рис.10).



Рисунок 10 – Фото з ректором проф. Соколом Є.І. під час нагородження грамотою та врученням диплому з відзнакою випускнику спеціалізації Шамуратову Мурату

В період 2000-2020 рр. при виконанні фундаментальної держбюджетної теми МОН України «Розробка теоретичних засад визначення технічного стану твердої ізоляції» (номер держреєстрації № 0108U006119) та господарчих договірних тем з СертЦентром АСУ Держцентру якості Державного комітету ядерного регулювання України проведено комплекс досліджень щодо змінення механічних властивостей матеріалів конструктивних елементів оптичних кабелів під дією радіаційного опромінення, визначено факт радіаційного зміцнення оптичного модуля на основі полібутилентерефталату при дозі опромінення до 20 Мрад (рис. 11) [39], встановлено вплив домішок на релаксаційно-наведені втрати в оптичних волокнах на основі плавленого кварцу під дією радіаційного опромінення.

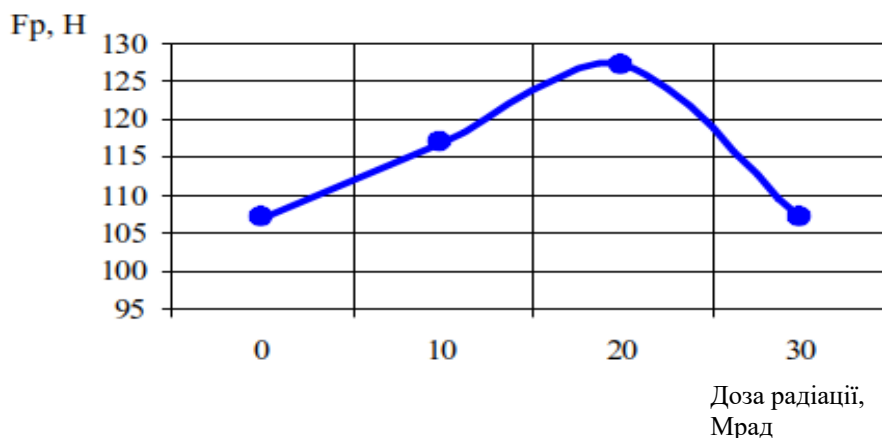


Рисунок 11 – Вплив дози радіаційного опромінення на розривну механічну міцність оптичного модуля оптичного кабелю зовнішнього прокладання [39]

Необхідно відмітити студентів спеціалізації “Оптоволоконна техніка”, які активно та успішно навчалися, продовжили навчання в аспірантурі та своєчасно захистили кандидатські дисертації: Федяй Ганна (2007 р.), Бойко Антон (2016 р.), Кессаєв Олександр (2017 р.).

Важливо: на всіх етапах становлення та розвитку спеціалізації відбувалася підтримка, розуміння та гармонізація роботи кафедри з Електроенергетичним факультетом, особливо з деканом проф. Лазуренком О.П., керівництвом інституту, університету у цілому.

Сила класичної освіти, яка базується на традиціях з гуманістичним характером інститутської атмосфери, надають впевненості щодо підсилення прямої взаємодії технічної освіти з виробництвом для створення умов реалізації творчого потенціалу освічених та ефективних випускників – найсильнішої переваги економіки країни.

У 2020 році відбулося об’єднання спеціалізації “Оптоволоконна техніка” зі спеціалізацією “Електроізоляційна та кабельна техніка”. Причина полягає у відбитті загальних процесів реформування вищої освіти: перехід від кількісного до якісного. Така тенденція спостерігається у провідних світових вищих навчальних закладах. Навчальні групи все більше нагадують творчі “лабораторії, майстерні”. Освічені, ефективні кадри – найсильніша перевага економіки будь-якої держави. Вміння оперативно реагувати на проблеми спільноти, що змінюється, злагоджено та ефективно працювати в команді та забезпечувати високі результати – запорука виживання, перш за все, країни. Сучасна система інженерної освіти повинна реагувати на зміни. В той же час спостерігається поглиблення міждисциплінарних зв’язків між різними спеціалізаціями. Саме такий підхід апробовано та реалізовано спеціалізацією “Оптоволоконна техніка” у складі спеціальності “Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка”.

Спеціалізація “Оптоволоконна техніка” продовжує успішно розвиватися попри всі труднощі сьогодення [46-48]. Підтвердженням є успішно захищений у 2023 році комплексний дипломний проєкт магістрами Осіним Данилом та Пушкарем Ігором – студентами заочної форми навчання – топ-менеджерами кабельних підприємств “Запорізький кабельний завод” та Науково-виробничого підприємства “Алай”. Керівник дипломного проєкту – проф., д.т.н. Безпрозванних Г.В. Проєкт присвячено сучасній кабельній інфраструктурі дата центрів на вітчизняних розробках витих пар категорії 6 і 6А та волоконно-оптичних кабелях відповідно [47-48].

Безумовно, всі випускники спеціалізації та спеціальності досягли успіхів: життя – це виклик, досвід, вміння, навчання. Дякуємо всім нашим студентам, котрі обрали спеціалізацію “Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка”, пройшли разом з нами частинку свого шляху. Успіхів всім нам!

Висновки з проведеного дослідження. Відкриття спеціалізації “Оптоволоконна техніка” детермінувалася низкою чинників, серед яких:

1. Вплив історичних подій на розвиток оптоволоконної техніки, зростання сфер застосування оптичних кабелів.
2. Гостра необхідність підготовки та формування конкурентоспроможних інженерних кадрів з фундаментальними знаннями щодо складних фізичних процесів в оптичних волокнах – основного конструктивного елементу кабелів та фаховим спрямуванням щодо проектування та виробництва оптичних кабелів.
3. Інтеграція освіти з наукою, виробництвом, бізнесом.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Hecht J. City of Light: The Story of Fiber Optics. Oxford University Press. 2004. 340 p.
2. Senior J. M. Optical Fiber Communications: Principles and Practice. Pearson Education. 2009. 1127 p.
3. Buck J.A. Fundamentals of Optical Fibers. Wiley Series in Pure and Applied Optics. 2004. 352 p.
4. Mahlke G., Gossing P. Fiber optic cables: fundamentals, cable engineering, systems planning. Berlin; Munchen: Siemens-Aktienges. 1993. 244 p.
5. Goff D. Fiber Optic Reference Guide. 3rd Edition. Routledge. 2002. p.
6. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. Wiley. 2021. 544 p.
7. Kao C. K., Hockham G. A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1966. 113(7). P. 1511-1158.
8. Corning Inc. Optical Fiber Products. Retrieved from <https://www.corning.com>
9. Chaffee C. The Rewiring of America The Fiber Optics Revolution: Fibre Optics Revolution. 2012. 244 p.
10. Agrawal G.P. Nonlinear optics. Academic Press, Copyright 2001, Copyright 1989 by AT&T Bell Laboratories. 481 p.
11. Agrawal G.P. Applications of Nonlinear Fiber Optics. Academic Press. 2001. 472 p.
12. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" : історія розвитку, 1885 – 2010. За ред. В. І. Ніколаєнка; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т. Х.: НТУ, 2010. 407 с.
13. Згуровський М. З., Ільченко М. Ю., Константинов В. О. Основні етапи розвитку Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Наука та наукознавство. 1999. № 2. С. 106–112.
14. Невлюдов И.Ш., Омаров М.А. Приспособления для обработки торцов оптических наконечников одно и многоканальных кабелей. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении и стимулирование их внедрения в производство. Тезисы доклада республиканской научной конференции 18-20 сентября 1990 г. – Х., 1990. – С. 60-61.
15. Невлюдов И.Ш., Малик Б.А., Филипенко А.И., Филипенко Е.М. Автоматизированные методы контроля соосности оптических волокон в наконечниках оптических соединителей ВОСП. Приборостроение-92. Тезисы доклада Междунар. науч.-техн. конф. – Винница ; Керчь, 1992. С. 48.
16. Творці Української науки: Безпрозваних Г.В. Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка. К.: Видавництво «Анавіт», 2016. 7 с.
17. Науковці України. Еліта Держави. К.: Видавництво Логос Україна. 2022. 355 с.

18. IEC 60793-2-10 Optical fibres – Part 2: Product specification – Sectional specification for category A1 multimode fibers.
19. ITU-T Recommendation G.651.1 (07/2007) Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network.
20. IEC 60793-2-50 Optical fibres – Part 2: Product specification – Sectional specification for category A1 multimode fibers.
21. ITU-T Recommendation G.652 (11/2009) Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.
22. ITU-T Recommendation G.957 (10/2009) Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.
23. ITU-T Recommendation L.60 (09/2004) Construction of optical/metallic hybrid cables.
24. ITU-T Recommendation L.58 (03/2004) Optical fibre cables: Special access network.
25. IEC 60332-2(2004) Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions — Part 2: Test for vertical flame propagation for a single small insulated wire or cable.
26. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В., Дащенко А.Щ. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатации. Одесса: Астропринт, 2000. 535 с.
27. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Диагностика кабелей локальной вычислительной сети ХГПУ. *Вестник ХГПУ*. Харьков: ХГПУ. 1999. Вып.64. 10 с.
28. Беспрозванных А.В. Расчет временной дисперсии в оптических кабелях с нерегулярной структурой. Тезисы доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я». Харків, 1993. 1 с.
29. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Гурин А.Г. Учебная лаборатория оптоволоконной техники кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника». Тезисы доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Волоконно-оптичні лінії зв'язку та системи передачі інформації «ВООСП-93». Запоріжжя. 1993. 2 с.
30. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Иерархия элементов оптоволоконной техники в объектно-ориентированном программировании. Тезисы доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Волоконно-оптичні лінії зв'язку та системи передачі інформації «ВООСП-93». Запоріжжя. 1993. 3 с.
31. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Методические указания к лабораторным и практическим работам по курсу «Физические основы оптоволоконной техники» «Моделирование физических процессов элементов оптоволоконной техники». Харьков: ХПИ, 1993. 55 с.
32. Беспрозванных Г.В. Моделювання фізичних процесів в елементах волоконно-оптичної техніки. Тезисы доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Математичне моделювання в електротехніці та енергетиці». Львів, 1995. 3 с.
33. Беспрозванных Г.В. Моделювання траєкторії поширення променів у багатомодових оптичних волокнах. *Електропанорама*. №3, 2012. С. 34–41.
34. Беспрозванных А.В. Нелинейные явления в оптических кабелях. *Сборник научных трудов ХГПУ*. Харьков, ХГПУ, 1998. Вып.6, Часть первая. 5 с.
35. Беспрозванных А.В. Проявление нелинейных эффектов в оптических волокнах. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків, 2005. №3. 6 с.
36. Беспрозванных А.В. Широкополосные межстанционные оптические кабели связи ГТС. *Сборник научных трудов ХГПУ*. Харьков, ХГПУ, 1998. Вып.6, Часть третья. 8 с.
37. Bezprozvannykh H., Naboka B. Fiber optic tube diagnostic by using the reflectograms. Abstracts 2nd International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling «LFNM'2000». Kharkiv, 2000. 3 p.
38. Беспрозванных А.В., Морозов И.А. Сертификация оптических кабелей внутренней прокладки по пожарной безопасности. Матеріали науково-практичної конференції «Пожежна безпека кабельно-провідникової продукції». Харків: Академія пожежної безпеки України. 2003. 3 с.

39. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Морозова Е.В. Изменение механических свойств материалов конструктивных элементов оптических кабелей под действием радиации. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2004. №7. 6 с.
40. Bezprozvannykh H. Influence of radiation on properties of materials and losses of optical cables. Abstracts III International conference on optoelectronic information technologies «PHOTONICS – ODS 2005». Vinnytsia, 2005. 1 p.
41. Беспрозванных Г.В., Морозов І.А. Силовий кабель з інтегрованим оптичним волокном. Тези доповідей ХІХ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я». Харків: НТУ «ХПІ». 2011. 1 с.
42. Bezprozvannykh H., Zolotaryov VM, Antonets Yu A. High Voltage Cable Systems with Integrated Optical Fiber for Monitoring Cable Lines. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 407-410.
43. Беспрозванных Г.В., Морозова О.В., Приліпко Л.В. Впровадження комбінованих силових кабелів з оптичними – як один із шляхів створення енергоінформаційних мереж. Тези доповідей Міжнар. науково-практичної конф. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: 15-17 жовтня 2014. Харків, 2014. С. 204.
44. Беспрозванных Г.В., Ільченко К.В. Волоконно-оптичні системи захисту від електричної дуги в комплексних розподільних пристроях електричних підстанцій. Тези доповідей Міжнар. науково-практичної конф. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Харків, 2017. С. 187-188.
45. Беспрозванных Г.В., Кессаєв О.Г. Волоконно-оптичні кабелі – як підгрунття для побудови цифрових підстанцій. Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019), 12-15 листопада 2019 р. м. Харків, с. 37.
46. Беспрозванных Г.В., Тараканов М.М., Сушинець Б.В., Костюченко В.В. Виклики перед кабелюю індустрією при впровадженні технології 5G. Міжнародна наук.-практ. Конференція MicroCAD: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. 2022. с. 64.
47. Осін Д.О., Беспрозванных Г.В. Структурована кабельна система дата центрів на основі витих пар. Тези доповідей ХVІІ Міжнар. науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»: 28-30 листопада 2023. Харків, 2023. 2 с.
48. Пушкар О.А., Беспрозванных Г.В. Волоконно-оптичні рішення для дата-центрів. Тези доповідей ХVІІ Міжнар. науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»: 28-30 листопада 2023. Харків, 2023. 2 с.

REFERENCES:

1. Hecht J. City of Light: The Story of Fiber Optics. Oxford University Press. 2004. 340 p.
2. Senior J. M. Optical Fiber Communications: Principles and Practice. Pearson Education. 2009. 1127 p.
3. Buck J.A. Fundamentals of Optical Fibers. Wiley Series in Pure and Applied Optics. 2004. 352 p.
4. Mahlke G., Gossing P. Fiber optic cables: fundamentals, cable engineering, systems planning. Berlin; Munchen: Siemens-Aktienges. 1993. 244 p.
5. Goff D. Fiber Optic Reference Guide. 3rd Edition. Routledge. 2002. p.
6. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. Wiley. 2021. 544 p.
7. Kao C. K., Hockham G. A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1966. 113(7). P. 1511-1158.
8. Corning Inc. Optical Fiber Products. Retrieved from <https://www.corning.com>
9. Chaffee C. The Rewiring of America The Fiber Optics Revolution: Fibre Optics Revolution. 2012. 244 p.
10. Agrawal G.P. Nonlinear optics. Academic Press, Copyright 2001, Copyright 1989 by AT&T Bell Laboratories. 481 p.

11. Agrawal G.P. Applications of Nonlinear Fiber Optics. Academic Press. 2001. 472 p.
12. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute": history of development, 1885 - 2010. Ed. V. I. Nikolayenko; National technical University "Khark. Polytechnic. Institute of Technology. Kh.: NTU, 2010. 407 p.
13. Zgurovsky M. Z., Ilchenko M. Yu., Konstantinov V. O. The main stages of development of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Science and science. 1999. No. 2. P. 106–112.
14. Nevlyudov I.Sh., Omarov M.A. Devices for processing the ends of optical tips of single and multi-channel cables. Progressive technological processes in mechanical engineering and stimulation of their introduction into production. Abstracts of the report of the republican scientific conference on September 18–20, 1990 - Kh., 1990. pp. 60-61.
15. Nevlyudov I.Sh., Malik B.A., Filipenko A.I., Filipenko E.M. Automated methods of controlling the alignment of optical fibers in the tips of optical connectors VOOSP. Instrumentation-92. Abstracts of the report Mezhdunar. scientific and technical conf. – Vinnytsia; Kerch, 1992. P. 48.
16. Creators of Ukrainian science: Bezprovannykh H.V. Electrical insulation, cable and optical fiber technology. K.: Anavit Publishing House. 2016. 7 p.
17. Scientists of Ukraine. State elite. K.: Logos Ukraine Publishing House. 2022. 355 p.
18. IEC 60793-2-10 Optical fibres - Part 2: Product specification – Sectional specification for category A1 multimode fibers.
19. ITU-T Recommendation G.651.1 (07/2007) Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network.
20. IEC 60793-2-50 Optical fibres - Part 2: Product specification – Sectional specification for category A1 multimode fibers.
21. ITU-T Recommendation G.652 (11/2009) Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.
22. ITU-T Recommendation G.957 (10/2009) Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.
23. ITU-T Recommendation L.60 (09/2004) Construction of optical/metallic hybrid cables.
24. ITU-T Recommendation L.58 (03/2004) Optical fibre cables: Special access network.
25. IEC 60332-2(2004) Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions — Part 2: Test for vertical flame propagation for a single small insulated wire or cable.
26. Iorgachev D.V., Bondarenko O.V., Dashchenko A.Sh. Fiber optic cables. Theoretical foundations, design and calculation, technology of production and operation. Odessa: Astroprint, 2000. 535 p.
28. Besprozvannykh A.V., Naboka B.G. Diagnostics of the cables of the local computing network of KhHPU. Herald of KhGPU. Kharkiv: KhHPU. 1999. Issue 64. 10 s.
29. Besprozvannykh A.V. Calculation of temporal dispersion in optical cables with an irregular structure. Abstracts of reports of the International scientific and technical conference "Computer: science, technology, technology, health". Kharkiv, 1993. 1 p.
30. Besprozvannykh A.V., Naboka B.G., Guryn A.G. Educational laboratory of optical fiber technology of the department "Electrical insulation and cable technology". Abstracts of reports of the IV International scientific and technical conference "Fiber-optic communication lines and information transmission systems "VOOSP-93". Zaporozhye 1993. 2 p.
31. Besprozvannykh A.V., Naboka B.G. Hierarchy of elements of optical fiber technology in object-oriented programming. Abstracts of reports of the IV International scientific and technical conference "Fiber-optic communication lines and information transmission systems "VOOSP-93". Zaporozhye 1993. 3 p.
32. Besprozvannykh A.V., Naboka B.G. Methodical instructions for laboratory and practical work on the course "Physical foundations of optical fiber technology" "Modeling of physical processes of elements of optical fiber technology". Kharkiv: KhPI, 1993. 55 p.
33. Bezprovannykh G.V. Modeling of physical processes in elements of fiber-optic technology. Abstracts of reports of the International Scientific and Technical Conference "Mathematical Modeling in Electrical Engineering and Energy". Lviv, 1995. 3 p.

34. Bezprovannykh G.V. Modeling the trajectory of the propagation of rays in multimode optical fibers. *Electropanorama*. No. 3, 2012. P. 34-41.
35. Besprozvannykh A.V. Nonlinear phenomena in optical cables. A collection of scientific works of KhHPU. Kharkiv, KhHPU, 1998. Issue 6, Part One. 5 p.
36. Besprozvannykh A.V. Manifestation of nonlinear effects in optical fibers. *Electrical engineering and electromechanics*. Kharkiv, 2005. No. 3. 6 p.
37. Besprozvannykh A.V. Broadband interstation optical cables of the GTS. A collection of scientific works of KhHPU. Kharkiv, KhHPU, 1998. Issue 6, Part Three. 8 p.
38. Bezprozvannykh H., Naboka B. Fiber optic tube diagnosis by using the reflectograms. Abstracts of the 2nd International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling "LFNM'2000". Kharkiv, 2000. 3 p.
39. Besprozvannykh A.V., Morozov I.A. Fire safety certification of optical cables of internal laying. Materials of the scientific and practical conference "Fire safety of cable and wire products". Kharkiv: Academy of Fire Safety of Ukraine. 2003. 3 p.
40. Besprozvannykh A.V., Naboka B.G., Morozova E.V. Change of mechanical properties of materials of structural elements of optical cables under the influence of radiation. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2004. No. 7. 6 p.
41. Bezprozvannykh H. Influence of radiation on properties of materials and losses of optical cables. Abstracts III International conference on optoelectronic information technologies «PHOTONICS-ODS 2005». Vinnytsia, 2005. 1 p.
41. Bezprozvannykh G.V., Morozov I.A. Power cable with integrated optical fiber. Abstracts of reports of the XIX international scientific and practical conference "Information technologies: science, technology, education, health". Kharkiv: NTU "KhPI". 2011. 1 p.
42. Bezprozvannykh H., Zolotaryov VM, Antonets Yu A. High Voltage Cable Systems with Integrated Optical Fiber for Monitoring Cable Lines. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 407-410.
43. Bezprozvannykh G.V., Morozova O.V., Prilipko L.V. The introduction of combined power cables with optical cables is one of the ways to create energy information networks. Abstracts of the reports of the International scientific and practical conference Information technologies: science, engineering, technology, education, health: October 15-17, 2014. Kharkiv, 2014. P. 204.
44. Bezprozvannykh G.V., Ilchenko K.V. Fiber-optic systems of protection against electric arc in complex distribution devices of electrical substations. Abstracts of the reports of the International scientific and practical conference Information technologies: science, engineering, technology, education, health: Kharkiv, 2017. P. 187-188.
45. Bezprozvannykh G.V., Kessaev O.G. Fiber-optic cables as a basis for building digital substations. Energy efficiency and energy security of electric power systems (EEES-2019), November 12-15, 2019. m. Kharkiv, village 37.
46. Bezprozvannykh G.V., Tarakanov M.M., Sushinets B.V., Kostyuchenko V.V. Challenges for the cable industry when implementing 5G technology. International Scientist-Pract. MicroCAD Conference: Information Technology: Science, Engineering, Technology, Education, Health. 2022. p. 64.
47. Osin D.O., Bezprozvannykh G.V. Structured cable system of data centers based on twisted pairs. Abstracts of reports XVIII International. of the scientific and practical conference of master's and postgraduate students "Theoretical and practical research of young scientists": November 28-30, 2023. Kharkiv, 2023. 2 p.
48. Pushkar O.A., Bezprozvannykh G.V. Fiber optic solutions for data centers. Abstracts of reports XVIII International of the scientific and practical conference of master's and postgraduate students "Theoretical and practical research of young scientists": November 28-30, 2023. Kharkiv, 2023. 2 p.

Надійшла до редакції 27.10.2024 р.