

Праці II міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи” приуроченої 160-річчю видатного українського фізика, піонера в галузі світлотехніки і електротехніки професора ІВАНА ПУЛЮЯ, 24-27 травня 2005 р., Тернопіль (УКРАЇНА) – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2005.

© Праці II міжнародної науково-технічної конференції
„Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи”

ISBN 966-305-028-4

ПЕРЕДМОВА

У цьому році наукова громадськість України відзначає 160-ти літній ювілей визначного українського фізика, електротехніка та громадсько-політичного діяча, професора, доктора Івана Пулюя, багатогранна творчість якого не може не викликати подиву. Австрійський учений професор Вільгельм Форман у 1968 р. охарактеризував його як одну з «найвидатніших наукових постатей кінця 19-го та початку 20-го століть. Він з тих, котрі спричинилися до зміни обличчя нашого світу».

Іван Пулюй уродженець містечка Гримайлова, що на Тернопільщині, дійсний член Наукового товариства імені Т. Шевченка, один із основоположників і засновників нового напрямку у науці – електротехніки.

Його праці стали підґрунтям для епохальних відкриттів ХІХ ст. – Х променів та електрона; ним вперше у світі здійснене масштабне освітлення міжнародної електротехнічної виставки та прилеглих вулиць у Штайрі (Австрія, 1884) лампами розжарювання власної конструкції та розрядними лампами Ф. Кжіжіка; він проектував і будував електростанції, створив низку електричних приладів. Електровакуумну лампу з антикатодом його власної конструкції, яку він використовував для дослідження катодних променів, можна вважати першою у світі люмінесцентною лампою.

Цій важливій даті присвячена ІІ -а Міжнародна науково-технічна конференція “Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми і перспективи”.

В збірнику праць конференції розглянуті історичні аспекти світлотехніки та електротехніки, математичне та електронне моделювання, енергоощадні технології, вторинні перетворювачі та нормалізація параметрів електроенергії, фізичні аспекти генерування світла, високоефективні джерела світла, інформаційно - керуючі та силові електронні пристрої та системи, техногенно-екологічні проблеми сучасної світлотехніки та електротехніки.

І-а міжнародна конференція, присвячена 150 – річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя відбулася в м. Тернополі 24 - 28 травня 1995 року.

ВНЕСОК ІВАНА ПУЛЮЯ У СВІЛОТЕХНІКУ

Донедавна ім'я Івана Пулюя, який своєю науковою і технічною діяльністю заслужив гідне міжнародне визнання, було незнане в Україні не тільки широкому загалу, але й фахівцям у певних галузях науки. Лише відзначення у 1995 році 150-літнього ювілею ученого на загальнонаціональному рівні дозволило не тільки гідно вшанувати цю геніальну людину, але й у якійсь мірі повернути на Батьківщину його наукову спадщину.

На сьогодні про Івана Пулюя говорять як про фізика, відомого своїми фундаментальними працями, що стали підвалинами епохальних відкриттів кінця XIX ст. – X-променів та електрона. Він є одним із засновників рентгенології, адже саме за допомогою “Пулюєвої лампи” було зроблене відкриття К.Рентгеном X-променів, зроблено першу у світі рентгенограму. Саме він першим із фізиків сформулював ідеї щодо природи катодних та X-променів, які є дуже близькими до теперішнього їх розуміння, побудованого на електронній теорії будови речовини.

Відомий Іван Пулюй і своєю інтенсивною громадською діяльністю, спрямованою на національне і державне відродження українського народу. Тут у першу чергу необхідного згадати те, що він разом з П.Кулішем та І.Нечуй-Левицьким зробив переклад та видав українською мовою Біблію, добивався створення у Львові українського університету, був організатором, учасником і опікуном студентських товариств.

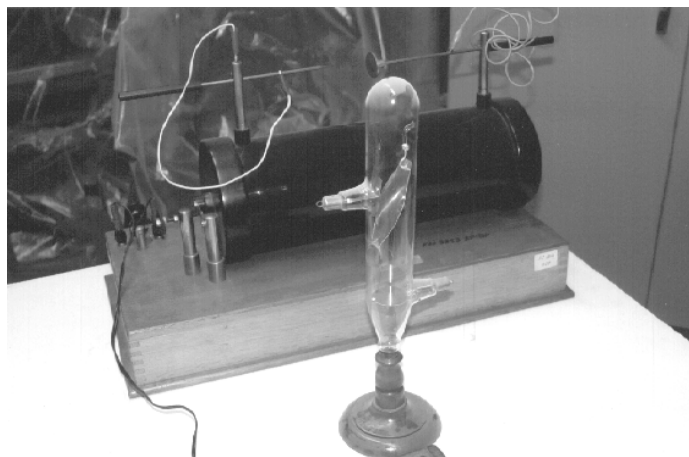
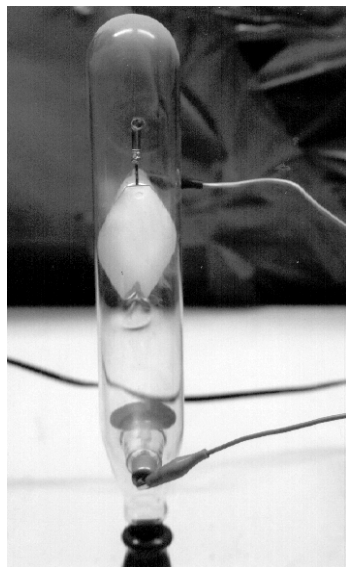
Про ще один напрям його багатогранної і плідної діяльності відомо, але через постійне акцентування на двох перших аспектах його таланту, часто губиться те, що Іван Пулюй разом з тим був знаним винахідником, прекрасним технологом і конструктором, вмілим організатором і будівничим, “був одним з піонерів у бурхливому розвитку електротехніки і промислової революції на межі XIX і XX століть”. І зовсім не має на сьогодні досліджень про його піонерські роботи у такій галузі сучасної науки, як світлотехніка, хоча його досягнення у цьому є беззаперечними.

Перш за все необхідно згадати фундаментальну працю Івана Пулюя „випромінна електродна матерія і так званий четвертий агрегатний стан” у якій він розглядає питання досліджень катодних променів, а також описує явище фосфоресценції твердих тіл під дією випромінної електродної матерії.

Іван Пулюй присвятив значну увагу експериментальному дослідженню фосфоресценції в газорозрядних трубках з низьким тиском. Одним із його досягнень у цій праці було виготовлення першої люмінесцентної лампи, що давала яскраве світло, при якому можна було читати на віддалі декількох метрів. У цьому приладі, який став широко відомим під назвою „лампа Пулюя”, катодне проміння бомбардувало слюдяну пластинку, покриту сульфатом кальцію і

розташовану між анодом і катодом під кутом до останнього, спричинюючи в ній інтенсивну фосфоресценцію. Як з'ясувалося на початку 1896 року, ця лампа була фактично також прообразом „рентгенівської рурки”, сконструйованим на 14 років раніше від відкриття Рентгена; у ній важливу роль відігравав антикатод, уперше застосований Пулюєм. Пізніше слюдяну пластинку замінили на платинову. При подачі напруги живлення з катода вилітають частинки (електрони), які рухаючись попадають на слюдяну пластину, спричиняючи свічення її фосфоресцентного покриття.

На світлинах показана одна із фосфоресційних ламп Івана Пулюя, що зберігається в Технічному музеї в Празі, і яка і по сьогодні є в робочому стані. Належний стан лампи Івана Пулюя підтримує група фізиків із Чеського технічного університету в Празі під керівництвом професора Іво Крауса.



Фосфоресцентна лампа Івана Пулюя

Лампа складається зі скляної колби з викачаним повітрям усередині, до якої прикріплена під певним кутом слюдяна пластина еліптичної форми, яка покрита з одного боку сірчистим кальцієм. Нижче пластини знаходиться алюмінієвий диск, який відіграє роль катода, а вище пластини встановлений анод.

Дамо тепер слово Іванові Пулюєві для пояснення сконструйованих ним ламп: „Ця лампа мала дископодібний катод. Це від’ємний полюс, який висилає свої промені на овальний лосняковий екран, покритий вапняковим сульфідом і витворює тут настільки сильну фосфоресценцію, що при світлі цієї лампи можна читати на віддалі від 4 до 5 метрів.”

Саме ці перші у світі фосфоресцентні джерела світла конструкції Івана Пулюя стали першими ікс-променевими трубками, за допомогою яких були відкриті Х-промені і зроблені перші у світі рентгенограми. На міжнародній виставці 1881 року у Парижі вони були нагороджені дипломами і до сьогодні знаходяться у Паризькому музеї ремесел і мистецтв та у Віденському політехнічному музеї.

Шукаючи нові джерела штучного світла проф. І.Пулюй запропонував за допомогою випроміненої електродної енергії довести тверде тіло, поміщене у колбу, до білого розжарення і використати його для освітлення.

Лампа представляла собою скляну вакуумовану колбу, всередині якої знаходиться негативний алюмінієвий електрод (катод) у вигляді півсфери (чашкоподібний) радіусом 21 мм і дископодібного позитивного електрода (анода), що знаходиться на віддалі 36 мм від катода. За допомогою скляної палички і товстого платиного дроту до анода кріпився маленький вугільний конус.

Якщо лампу під’єднати до джерела індукційного струму, то частинки, що вириваються із вгнутої напівсферичної поверхні катода, фокусуватимуться у точці, яка, за даними Пулюя, знаходиться на відстані 1,7 діаметра сфери. Якщо в фокусі катода помістити кусок вугілля, то, внаслідок виділення великої кількості енергії, воно розжарюється до білого кольору і дає неперервний спектр.

Знову дамо слово І.Пулюю: „Близька була думка довести за допомогою промінної електродної речовини якесь тверде тіло до розтоплення і блиску і вживати його для ламп. Мені вдалося сконструювати таку лампу, яка дає дуже добре ясне світло і хоча через малий розмір не дуже придатна для практичної мети, в кожному разі залишиться добрим експериментом”.

Твердим тілом слугував Пулюєві малий конус з паперового вугілля. Світляних ефектів Пулюй міг досягти і без твердих тіл, як це підтверджує одна фосфорна лампа. З цією лампою Пулюй виконав багато експериментів.

Опублікована у Відні його книжка „Випромінна електродна матерія і так званий 4-й агрегатний стан” це реакція на Пулюєві вакуумні апарати, що були показані на Міжнародній електричній виставці у Парижі 1881 р. Вже раніше Пулюєві досліди були опубліковані у багатьох журналах Віденської Академії наук.

На всесвітній електротехнічній виставці у Парижі вперше демонструвалася й лампа розжарювання Едісона. Але час горіння був обмеженим. Ця лампа дуже зацікавила І.Пулюя. Він відвертається від теорії і присвячується технічній праці. Пулюй стає керівником технічного віділу однієї віденської електротехнічної фірми, займаючись створенням лампи розжарювання власної конструкції, та розробляє нові конструкції флуоресцентних ламп. Він отримує патенти на свої винаходи, зокрема, на переносну охоронну лампу, яку у Відні починають серійно випускати. Основна проблема полягала у тому, щоб створити відповідну нитку для лампи розжарення. Спроб не бракувало. Для найперших волокон для “жарівок” І.Пулюй узяв довге, аж до колін, волосся своєї дружини, яке він карбонізував. Пізніше він використовував науглецьовані нитки бамбука. Лампи конструкції Пулюя випускала фабрика Йозефа Вернделя у австрійському місті Штаєрі. У 1883-84 р.р. там було випущено понад 22 000 таких ламп. Керував виробництвом цих ламп сам І.Пулюй. І вже у 1883 році на електротехнічній виставці у Відні 300 такими лампами був освічений великий портрет цісаря. А у 1884 році було зроблене велике освітлення 1000 лампами міста Штаєра під час чергової електротехнічної виставки. Перше масштабне освітлення лампами Едісона Ейфелової вежі у Парижі було зроблене лише у 1889 році. На той час лампи Пулюя були набагато кращі і мали довший час світіння.

*Науковий секретар
II міжнародної конференції
"Світлотехніка й електротехніка:
історія, проблеми й перспективи"
Василь Липовецький*

УДК 53.01 + 930.1

В.Козирський¹, канд.фіз.-мат.наук;

О.Рокіцький², канд.техн.наук;

В.Шендеровський¹, докт.техн.наук

¹*Інститут фізики НАНУ, Київ*

²*Тернопільський державний технічний університет
імені Івана Пулюя*

ІВАН ПУЛЮЙ І СЬОГОДЕННЯ УКРАЇНИ

В роботі проаналізовано наукову та освітянську діяльність українського вченого Івана Пулюя на терені політичного аналізу місця і ролі України як незалежної держави в Європі. Підкреслено важливість і актуальність результатів цих досліджень для сьогодення України.

В Бюлетені ЮНЕСКО читаємо: “Відзначення і привернення уваги світової громадськості до визначних подій та видатних особистостей, діяльність яких стала вагомим внеском у спільне збагачення культури, сприяє поліпшенню міжнародного порозуміння, тіснішим взаєминам між людьми та зміцненню миру у світі.”

Національні підвалини суспільства – в його генетичній пам’яті. І сьогодні характерною рисою є переосмислення минулого. Спостерігаємо значний потяг до історичних досліджень. На жаль, цьому перешкоджає дефіцит фактів нашої історії, дефіцит штучний, цілеспрямовано створюваний десятиріччями. Відновлення фактуальної бази науки про наше минуле нині набуло не тільки наукового, а суспільного значення. Історія стала своєрідним силовим полем громадянської свідомості. Переосмислення минулого тягне за собою висновок, що потреби принципового реформування історії повинні турбувати не купку часом нефахових ентузіастів, які готові відгукнутися на будь-який суспільний виклик, а державу. Підкреслюємо, державу! Надто складно зворухнути «червоних» істориків правдиво відтворити історію розвитку держави, культури і науки на Україні. Сьогодні перед дослідниками відкрилася справжня terra incognita, де діяли видатні вчені, справжні фахівці, яскраві особистості, доля яких перепліталася з бурхливими подіями у житті країни. Чималою виявилася їхня наукова спадщина. Інша річ – якою мірою вона стала нашим надбанням. Багато праць ще за життя авторів були вилучені з наукового обігу, а якщо лишалися, то заплямовані глумом. Марно було шукати посилення на них в науковій літературі впродовж десятиліть. Тільки останніми роками вони повертаються до нас, їх авторів називають видатними, великими. Але для того, щоб ті справді видатні особистості увійшли у життя наших сучасників, треба

II міжнародна науково-технічна конференція

грунтовно, переконливо розповідати про них, про їхній вагомий доробок у світову скарбівню науки і культури, в ім'я України. До когорти таких Великих Синів України, поза всяким сумнівом, належить Іван Пулюй [1–5].

Невеликий розсип думок про цього непересічного українця.

Професор Іван Пулюй був не тільки найвидатнішим фізиком Австро-Угорщини. Він належав до тих, хто у другій половині XIX – на початку XX ст. формував світ.

Професор Вільгельм Форманн

Іван Пулюй проявив себе як, “знаменитий електротехнік і визначний письменник”, що “дав себе знати як дуже талановитий полеміст у дуже делікатній справі – вживання народного язика в церковних книжках”.

Іван Франко

“Нарис історії української літератури до 1890р.”

... це була скромна людина, якій “на публічних функціях ... залежало мало, так само як на шані і нагородах. Усе ж таки, крім здобуття світової слави, в 1910 році цісар Франц-Йосиф іменував Пулюя придворним радником, а в 1916 році, з переходом на пенсію, нагородив його високим орденом – Лицарським Хрестом Цісаря Франца-Йосифа”.

Чеський інженер Франтишек Кржіжжик

Про людину, що просвітила розумом науку і духовність, заговорить невдовзі з великою повагою не лише Україна, але й світ.

Пантелеймон Куліш

“І не знаю, що Вам сказати! Бо нема слова, щоб виразно було тому чуттю, що моє серце почувало, побачивши в руках Старий і Новий Завіт... да ще у Кулішівці, у його власній хаті... Тяжко було б подумати, що чоловік бився 50 літ і так і слід його почез без Вашої підмоги великої. Казав один дуже осьвічений чоловік науковий: “Не було б Куліша, не було б і Біблії”. А я тепер скажу: “Не було б Пулюя, не було б Біблії”. Так у нас рідкі блюстителі добра і честі другого”.

Ганна Барвінок

“Ти був людиною сильних переконань і гостро викарбованою особистістю, але також людиною, що знала, як дотримуватися вірності народові, з якого ти вийшов, і немає більшої вірності, ніж вірність власному народові. Доля дозволила Тобі побачити ранішню зорю свободи, до якої піднявся з темних хмар твій нарід, який ти любив до останнього подиху, та її перші сонячні промені побажали озолотити кінець, твого сповненого праці життя!”

Професор Бах, ректор Політехніки у Празі (з прощальної промови)

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Тяжкий і навіть трагічний життєвий шлях судилося пройти Іванові Пулюю, одному з найвидатніших фізиків та інженерів Європи й цілого світу, життя і діяльність якого становлять яскравий приклад згубного втручання імперської політики в науку, культуру й життя окремої особи. Адже серед багатьох вчених України визнаних світом, чи не найбільше замовчувалося ім'я Івана Пулюя. Але Бог і Доля не відвели своїх теплих долонь від України, від Івана Пулюя.

Сьогодні вже добре відомо, що Іванові Пулюєві для світової слави було б досить того, що він збудував першу в Австро-Угорській імперії електростанцію, керував запровадженням трамваю у Празі, удосконалював телефон, підійшов близько до пояснення природи електрона, спричинився до відкриття й пояснення природи X-променів та довів важливість застосування їх у медицині, провадив роботи з ураном, написав понад 50 наукових праць, разом з Пантелеймоном Кулішем, Іваном Нечуєм-Левицьким переклав уперше українською мовою Біблію, був технічним радником цісаря Франца-Йосифа...

Цю людину визнавали такі видатні вчені-фізики, як Альберт Айнштайн, Нікола Тесла, Філіп Ленард, Август Кундт, Франтішек Кржижик, медик Іван Горбачевський, письменник Іван Франко, Пантелеймон Куліш, Іван Нечуй-Левицький, найвищі державці світу того часу...

Сягнути вершин світової науки, стати відомим громадським діячем, політиком, патріотом зумовила його велика любов до своєї України. Вихований батьками на українській землі, на підвалинах щирого українського світогляду в умовах бездержавності своєї Батьківщини, Іван Пулюй увібрав у себе вже змалку довічну велику любов до рідної мови, історії, культури.

Він розумів політику польських і російських кіл, що провадили шовіністичну антиукраїнську пропаганду. Мав можливість неодноразово пересвідчитись у цьому впродовж свого життя.

Згадаймо лише, що після закінчення університету 1873 року у Відні Іван Пулюй мав намір стати викладачем у Львові або Києві. Однак йому як неблагонадійному царська поліція не дала згоди на роботу в Києві. До списку "неблагонадійних" Пулюй був занесений за науково-популярну працю "Про нерухомі зірки і планети", в якій навів відомості про нові і перемінні зорі, познайомив читача з предметом, стверджуючи, що в явищах природи немає нічого надприродного і, нарешті, зробив висновок, що всі космічні процеси підпорядковані тим же законам, які панують і на Землі. Особливо він наголосив на такому фундаментальному законі, як закон збереження матерії та руху, про який детально розповів у окремій книжці українською мовою "Непропаша сила"[1].

II міжнародна науково-технічна конференція

Книга “Про нерухомі зірки і планети” [1] фатально позначилась на всій подальшій долі Івана Пулюя. Вона була кваліфікована як така, що спрямована проти російської монархії.

То ж змушений був молодий вчений Іван Пулюй працювати і творити не на своїй землі.

Саме такі люди, як Іван Пулюй, своєю інтелектуальною працею, громадськими зусиллями творили українську ментальність, українську віру. В його розумінні питання національної освіти і культури могло бути розв’язане лише за умови політичної свободи українського народу, лише за умови незалежності Української Держави.

Будучи дійсним членом Наукового Товариства імені Тараса Шевченка, Іван Пулюй активізує дії цього наукового закладу, спрямовані на відкриття Українського університету в Львові. В меморандумі 1902 року до Його Ексцеленції пана міністра-президента, доктора фон Гартля, зокрема, наголошувалося, що “право Русинів на посідання власного університету виходить ще й з ... державного основного закона про загальні права горожан, держави, після якого всі народи держави суть рівноправні й після якого кожний нарід має ненарушиме право зберігати і плекати свою національність і мову “в школі, суді і в публічному життю”. Як-же ілюзорним являється сей закон, коли зважимо, що руський нарід, котрого в Австрії є три з половиною міліонів і котрий числом ніяк не стоїть далеко за Поляками, не має ні одного університету, коли Поляки мають їх два” [4].

“Потреба заложення руського університету тепер тим найглійша, бо у східній Галичині є чотири руські гімназії, отже і громада руських абітурієнтів росте, котрі, не знавши польської мови, мусять тепер на Львівському університеті слухати викладів на польській мові і в тій мові робити іспити”.

Питання і аргументи захисту української мови Іван Пулюй виклав у серії гострих публіцистичних праць, опублікованих 1904–1906 рр., які було б актуальним сьогодні перевидати і якнайширше розповсюдити для широкого загалу. Адже там, уже тоді були висловлені завдання до української інтелігенції в зв’язку з проблемою освіти, культури, а рівнож із аналізом ситуації, що вирине з перебігу подій після заколоту 1905 року. Іван Пулюй писав, що “... коли прийшла важка історична хвиля, в якій і доля українського народу має рішатись, то на Україні стали озиватись москалі, ляхи і жиди, а українська інтелігенція або славословила самодержавіє, що мовляв в імени культури веде боротьбу з жовтою расою,... або тільки несміло упоминалась о права народу, висилаючи до Петербурга коротенькі телеграми, а дехто й меморіяли”.

Іван Пулюй закликав цю українську інтелігенцію до культурної праці передовсім. Так він писав у праці «О руський університет у

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Львові», Львів, 1909: «Організуйте народні кадри, щоб в тих кадрах високо стояв стяг непорочної національної честі і щоб під тим стягом була між людьми єдність і вірність для свого народу, пам'ятаючи, що згода будує, а незгода руйнує (підкр. – автор.). Оруже ваше нехай буде просвіта і наука...» Інтелігенція у кожного народу то “сіль землі”, а коли вона “звітріє, то чим же солити”... «За котрим народом висша культура і освіта, за тим і побіда» – так Іван Пулюй відреагував на царський маніфест на Україні (Емський указ, 18 травня 1876 року). Читаючи працю Пулюя “До дворянства на Україні” (1906 р.), бачиш повне відображення сучасності нашої незалежної вже України, намагання північного сусіди не випустити нашу державу зі своїх братських обіймів, бо “відколи Україна з'єдналася з московським царством, остала Росія завдяки багатствам землі нашої і завдяки мускульній силі українського народу стала якимсь дивом перед Європою і перед цілим світом”.[1]

Згодом, щоби більше показати німецькій публіці роллю української держави у світовому товаристві, Іван Пулюй пише дві праці німецькою мовою.

Це – “Україна та її міжнародне політичне значення” та “Польські русофіли і масові арешти вірних державі українців в Галичині” (1915р.). Обидві статті з огляду на події, пов'язані зі становленням незалежної Української Держави, є вельми цікаві, насамперед для сучасного розуміння перспективи творення держави. Ще раніше у своїй статті “Українська державна ідея” (1915) Іван Пулюй, розвиваючи міркування Пантелеймона Куліша про майбутнє України, писав, що “на арену світової історії виходить українська державна ідея” (як було би корисно почитати ці статті деяким академікам-міфотворцям, які вдень за ясного сонця не хочуть бачити української національної ідеї).

Аналізуючи становище українців в Галичині, Іван Пулюй на основі численних фактів показує, що насправді серед поляків було багато русофілів, які вислугувалися перед Росією, але польські можновладці їх оберігали від покарання, використовуючи різні форми боротьби з українством. Він викриває таке фарисейство польської влади в Галичині і обґрунтовує доконечну потребу звільнення України з-під царату. Але цього Іван Пулюй намагається домогтися через втручання центральних державних інституцій Австро-Угорщини на основі чинної конституції держави. Він показує, як українці, що живуть на теренах Австро-Угорщини, жертвують своєю кров'ю і добром на загальну міць держави, і тому австрійський уряд повинен робити все для поліпшення становища українців. Це була тактична програма, виходячи з тогочасних умов, втілення в життя української національної ідеї.

II міжнародна науково-технічна конференція

У наступній брошурі Іван Пулюй застановив свою увагу вже на аналізі українсько-російських відносин. Коли поставало українське питання, то завше виникала Московія з вимогою, що незалежність Україні не може бути надана за жодних обставин. Українці ж як окрема нація зі своєю питомою культурою є “вигадка” ворогів Росії. Пулюй акцентує увагу на тім аспекті, що після “збирання земель” та їхнього нещадного грабунку Московщина стала могутньою державою і навіть присвоїла собі назву Русь, тепер простягає свої руки московит і до українських земель у Галичині, Буковині і північній Угорщині, щоб і тут “визволити руський народ”. Тепер Московщина стала могутньою Росією, яка становить небезпеку насамперед для Австрії і Німеччини і, без сумніву, також для всієї Європи. Вдумуючись в ці слова, написані майже 100 літ тому, бачимо, що й тоді і тепер експлуатується теза про визволення українського народу після світової війни, як веде свою політику сьогодні Росія у зв’язку з подіями знову ж таки в середині Європи. Великодержавна політика Росії як імперії і тюрми народів не підвладна часові.

Пулюй формулює своє політичне бачення такими словами : “Найбільше і найважливіше наше бажання, ідея і головна мета наших національних прагнень – це визволена з-під Росії вільна Україна, де не повинно бути жодного пригнобленого і жодного гнобителя, де український народ після довголітнього рабства вестиме нарешті вільне у всіх напрямках національне життя, розвиватиме вільно свої великі духові здібності і братиме участь у примноженні скарбів культури усього людства. Ми бажаємо і очікуємо з упевненістю здійснення цього національного ідеалу”.[1]

Вчений звертає увагу, в основному німецького читача, на те що “в Європі не буде миру до того часу, поки існує російська могутність, а про її послаблення не можна думати, поки Московщина продовжує володіти Україною та її природними багатствами. Вільна Україна означає бастион, безпеку середньоєвропейських держав, тому її визволення лежить не більше в інтересах цих держав, але і цілої Європи...”

Далі Іван Пулюй у цій праці приводить читача до висновку, що “українці знають, що Україна мала в минулому і може мати в майбутньому спільні культурні, господарські та політичні інтереси не зі Сходом, а з Заходом і Півднем, що сучасні інтереси народів створять здорову основу для побудови нової Європи і для міжнародного становища України... Самостійна Україна є Гордієвим вузлом, під замком якого перебувають не тільки гарантія миру в Європі, але також гарантія національних прав народів Австро-Угорщини й усього німецького народу”.

Виразно окресливши курс на російщення й колонізацію України, Росія здійснювала його з незною в цілому світі жорстокістю.

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

“Деспотичний царизм хоче позбавити український нарід душі, він грабує в нього останнє і найдорожче багатство – мову” – наголошує Іван Пулюй.

Чи варто зазначати спеціально аналогію сьогодення? Нав’язлий в зубах білінгвізм, офіційність та державність, цілковито забута “Державна програма”, майже зникла в незаних катакомбах українська наукова мова, практична незмога вільно використовувати українську наукову і технічну термінологію, брак правдивих українських стандартів, подальше творення російсько-російських словників, варварське винищування усього, що пов’язане з українською мовою та культурою. І ось уже в незалежній українській державі все частіше лунають голоси на різних державних щаблях влади про необхідність надання російській мові права державної мови. Невже уроки історії нічого не вчать?

До написання цієї брошури німецькою мовою спонукала ситуація, що склалася в Європі в часі першої світової війни, а також потреба шукати дороги до тих людей, які мали вплив на хід війни, але “мимо всіх наших заходів німці все ще дуже мало про Україну знають, а в Австрії німецько-жидівська преса не має місця для обговорення нашої національної справи...”

Іван Пулюй бачив великий і рідкісний історичний момент і сподівався, що “переможні центральні держави в інтересах рівноваги і безпеки довготривалого миру в Європі мають прагнути спочатку відтіснити російську імперію до “матушки” Волги і Каспійського моря, і з цією метою визволити пригноблену Україну – одну з перлин Європи”...

Життя Івана Пулюя засвідчує, що він був великим достойником українства, в якому найбільшою силою була зосереджена національна свідомість.

Подвижник українства, науки і культури Іван Пулюй усе своє життя присвятив формуванню інтелектуального потенціалу українського народу, його духовного піднесення.

Іван Пулюй розумів як ніхто інший, що без національного інтелекту неможливо мати власної сильної держави, ні високого добробуту нації. Він зазначав з великим сумом, що стільки “пропадає наших українців, освічених і вишколених високою наукою, між поляками та німцями, а ще більше – між москалями.” Цей процес винародовлення українського інтелекту триває і понині.

Усвідомлюючи велич вченого, якого подарувала людству українська земля, замислюємося над тим, що сьогодні нам доконечно потрібна програма національного відродження і розвитку інтелектуального потенціалу. Яких зусиль докладав Іван Пулюй, щоб українська молодь мала свої гімназії, університети від Галичини й Буковини до Слобожанщини й Сіверщини, щоб наша молодь не

II міжнародна науково-технічна конференція

опинялася поза межами рідної землі. І з якою байдужістю сьогодні в роки незалежності України високі посадовці споглядають за руйнуванням української науки, за катастрофічним впливом учених високої кваліфікації, а ще більше талановитої української молоді. Цей процес веде до самознищення незалежності Української Держави, незалежності, для якої невтомно трудився і яку наближав для нас, для України своєю патріотичною працею геній українського народу Іван Пулюй.

І наостанок зауважимо, що на порозі до ліпшого світу вчений заповідав перевезти його останки, поховані у Празі, до рідної землі. Принаймі по смерті хотів бути поруч з батьками, у своїй рідній Україні.

The paper analyzes scientific and educational activity of great Ukrainian scientist Iwan Puluj in the context of the mission and the role of Ukraine as independent European state.

We accentuate importance and topicality of his activity for today Ukraine.

Література

1. Іван Пулюй. Збірник праць. За загальною редакцією професора Василя Шендеровського. К. – вид-во “Рада”, – 1966. – 712 с.
2. Подвижники Нації – Пантелеймон Куліш і Іван Пулюй. За загальною редакцією професора Василя Шендеровського. К. – вид-во “Рада”, – 1997. – 288 с.
3. Р.Гайда, Р. Пляцко. Іван Пулюй. Львів – 1998. – вид-во НТШ. – 286 с.
4. В.Козирський, В.Шендеровський. Геній народжений Тернопіллям. – Освіта, №9 (5139), 2005. – с.8-9.
5. О. Рокіцький. Іван Пулюй у світовій науці і культурі. К. – 2001. – 158 с.

УДК 621.327.534

В.Андрійчук, докт.техн.наук; С.Воркун; Л.Костик

*Тернопільський державний технічний університет
імені Івана Пулюя*

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЗМІННОГО СВІТЛОВОГО ПОЛЯ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН НА ЗАКРИТОМУ ГРУНТІ

*Представлено результати впливу параметрів змінного опромінення на сиру на суху біомасу, вміст пігментів (хлорофілів, каротиноїдів), відновлених коферментів рослин *Brassica rapa*, *Brassica juncea* L., *Lepidium sativum* L., а також в культурі *in vitro* мікробульб картоплі різних сортів.*

Режим опромінення рослин впливає як на структуру та функціонування фотосинтетичного апарату, так і на продуктивність рослин. Основним світловим параметром, який здійснює визначальний вплив на онтогенез рослини, є рівень опромінення поверхні її листків, тому першочерговим завданням, яке необхідно вирішити, – це визначення оптимальних параметрів світлового поля [1-3].

Існують такі технологічні процеси, де необхідне інтенсивне оптичне випромінювання короткої тривалості [4]. Воно вимагає менших затрат енергії в порівнянні з неперервним опроміненням. Світлові імпульси можна отримувати як шляхом механічного переривання потоку випромінювання, так і шляхом впливу на електричні параметри джерел випромінювання [5].

В підвищенні ефективності опромінювальних пристроїв для оптичних технологічних процесів важливу роль відіграє характер опромінення. Будемо виходити з того, що від моменту поглинання випромінювання до утворення кінцевого продукту проходить певний проміжок часу, який називається часом релаксації технологічної системи і визначається кінетикою протікання окремих реакцій. Протягом даного часу опромінюваний об'єкт може зовсім не реагувати на дію випромінювання, або перетворювати його з дуже низькою ефективністю. При опроміненні технологічної системи постійним потоком випромінювання значна частина його буде використовуватися не ефективно або навіть гальмувати протікання технологічного процесу, викликаючи небажане нагрівання структурних елементів чи дію інших захисних реакцій. Використання переривчастого опромінення з врахуванням часу релаксації опромінюваного об'єкта дозволяє значно підвищити ефективність дії випромінювання. Розрахунки показують, що витрати енергії в оптичних технологіях в аграрному секторі економіки становлять 15-20% загальних витрат електроенергії в галузі. Це надає особливої актуальності проблеми

II міжнародна науково-технічна конференція

енергозбереження в технологіях опромінення, важливе місце серед яких займає вирощування рослин на закритому ґрунті.

Для оцінки енергетичної ефективності опромінювальних пристроїв змінного опромінення були проведені експериментальні дослідження впливу їх випромінювання на ріст і розвиток ряду рослин на закритому ґрунті. В якості об'єктів дослідження було взято: швидкорослу рослину *Brassica rapa*, Гірчицю сарептську (*Brassica juncea* L.), Крес-салат (*Lepidium sativum* L.), Гвоздику пишну (*Dianthus superbus*), а також в культурі *in vitro* по вирощуванню мікробульб картоплі різних сортів. Основний об'єм робіт було проведено на швидкорослій рослині *Brassica rapa*, вегетаційний період якої триває 30-35 днів.

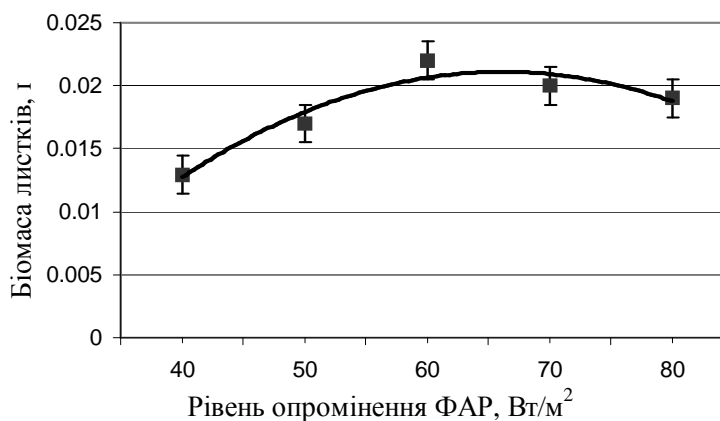
Рослини вирощувалися у вегетаційно-кліматичних камерах при цілодобовому штучному опроміненні опромінювачами РСП-ВОТ-02 з лампами ДНаТ-250 або ДРИ-250-5. Змінне опромінення отримувалось за допомогою опромінювальної установки із зворотно-поступальним рухом опромінювача. Необхідний рівень опромінення задавався висотою опромінювача відносно середньої частини стебла рослин. Рослини вирощувалися у суміші вермикуліту з торфом (1:1), використовуючи для поживи модифікований розчин Хогланда половинної сили. Для вивчення впливу умов опромінення на ріст і розвиток рослин використовували наступні параметри: сира та суха біомаса, вміст пігментів (хлорофілів та каротиноїдів) і відновлених коферментів.

Період вегетації рослин розбивався на три етапи відповідно до особливостей їх онтогенезу: період бутонізації, цвітіння та плодоношення. Проводилась статистична обробка результатів досліджень для випадку невеликої вибірки експериментального матеріалу.

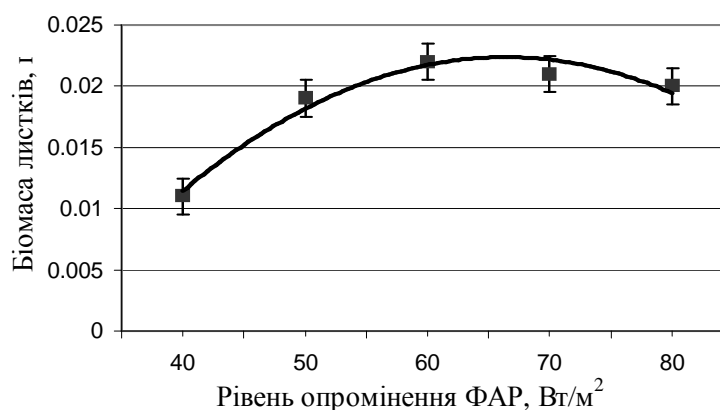
Як відомо режим опромінення рослин впливає як на структуру та функціонування фотосинтетичного апарату, так і на продуктивність рослин. Основним світловим параметром, який здійснює визначальний вплив на онтогенез рослини є рівень опромінення поверхні її листків, тому першочерговим завданням, яке необхідно було вирішити – це визначення оптимального рівня опромінення. Експерименти проводилися як в постійному, так і в змінному світлових полях.

Було вибрано п'ять рівнів опромінення ФАР: 40, 50, 60, 70, 80 Вт/м². На кожному етапі вегетації зрізали 50 рослин.

На рис.1 подані залежності накопичення сухої біомаси рослиною *Brassica rapa* на етапі бутонізації та плодоношення від рівня опромінення ФАР як у постійному, так і у змінному світлових полях.



а)



б)

Рис.1. Залежність накопичення сухої біомаси листків *Brassica rapa*, в перерахунку на одну рослину, на етапі бутонізації від рівня опромінення ФАР при вирощуванні в постійному(а) і змінному(б) світлових полях.

З приведених залежностей можна бачити, що із зростанням рівня опромінення рослин від 40 до 60 Вт/м² як при постійному, так і при змінному опроміненні суха біомаса рослин зростає. Дальше зростання рівня опромінення приводить до спадання процесу накопичення сухої біомаси, або крива виходить на насичення. Таким чином найбільш оптимальним рівнем опромінення ФАР для рослини *Brassica rapa* є 60-70 Вт/м². Для змінного світлового поля, період зміни якого становив 1,2 хв., процес накопичення сухої біомаси протікає таким же чином, як і в постійному полі.

Подібні дослідження були проведені на рослині *Brassica juncea* - Гірчиця сарептська, яка є одним із представників родовідного дерева *Brassica rapa*. Експерименти проводилися на етапі бутонізації, коли світло відіграє дуже важливу роль в онтогенезі рослини (рис.2).

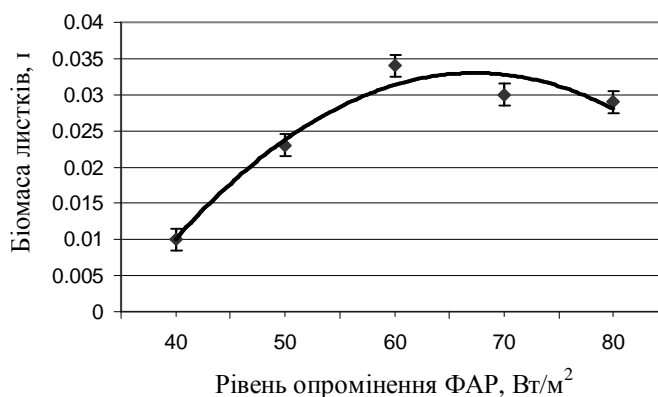


Рис.2. Залежність виходу сухої біомаси листків *Brassica juncea* - Гірчиця сарептська, в перерахунку на одну рослину, від рівня опромінення ФАР при вирощуванні в змінному світловому полі.

Як і у випадку *Brassica rapa*, вихід сухої біомаси *Brassica juncea* зростає із збільшенням рівня опромінення ФАР і досягає максимуму при 60-70 Вт/м². При цьому спостерігається однаковий характер зміни виходу сухої біомаси як у постійному, так і в змінному полях.

Для *Гвоздики пишної (Dianthus superbus)* найбільш оптимальний рівень опромінення ФАР при використанні ламп ДРИ 1000-2 лежить в околі 100-120 Вт/м². Для вирощування в культурі *in vitro* мікробульб картоплі при опроміненні різноспектральним випромінюванням ламп ДРИ-400-5 і ДНаТ-400 оптимальний рівень опромінення ФАР складав біля 70-80 Вт/м². При переході до змінних світлових полів оптимальний рівень опромінення суттєво не змінювався. Зміни, які спостерігалися, були в межах похибки експерименту.

Були проведені експериментальні дослідження вмісту хлорофілу *a*, хлорофілу *b* та каротиноїдів в листках рослин *Brassica rapa* від умов опромінення.

З наведених залежностей випливає, що із збільшенням рівня опромінення концентрація пігментів зменшується і виходить на насичення в околі 60 Вт/м² у постійному світловому полі. При переході до змінних світлових полів характер зміни концентрації каротиноїдів не змінюється, тоді як концентрація хлорофілів продовжує спадати з ростом рівня опромінення ФАР, хоча швидкість спадання при опроміненні більше 60 Вт/м² зменшується.

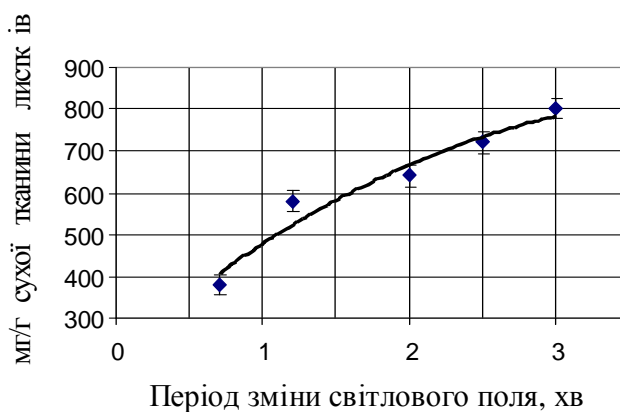
Також були проведені дослідження залежності концентрації відновлених коферментів від рівня опромінення ФАР у листках рослин *Brassica rapa* на етапі бутонізації в постійному та змінному світлових полях. З отриманих експериментальних даних випливає, що із ростом рівня опромінення концентрація коферментів зменшується і досягає насичення в області 60-70 Вт/м². Характер зміни їх вмісту не

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

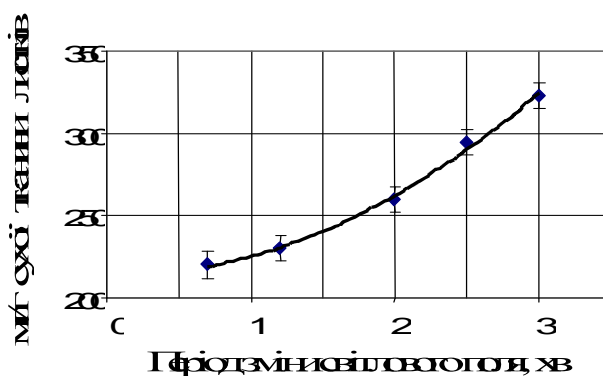
змінюється при переході від постійного до змінного опромінення.

Були проведені дослідження впливу періоду зміни світлового поля на ростові параметри рослин *Brassica rapa* та *Brassica juncea*. Для цього встановлювався рівень опромінення ФАР 60-70 Вт/м² і змінювався період зміни світлового поля. Зміна періоду досягалась шляхом зміни швидкості зворотно-поступального руху опромінювача.

На рис.3 подані залежності концентрації пігментів у листках рослин *Brassica rapa* на етапі бутонізації від періоду зміни поля випромінювання ФАР.



а)



б)

Рис.3. Залежність концентрації хлорофілів в листках рослин *Brassica rapa* на етапі бутонізації від періоду зміни поля випромінювання ФАР:

а) хлорофілу а; б) хлорофілу в

Із експериментальних даних було встановлено, що при зменшенні періоду зміни світлового поля від 3 до 1,2 хв накопичення сухої біомаси рослин *Brassica rapa* та *Brassica juncea* плавно зростає. А при зміні періоду від 1,2 до 0,7 хв. швидкість накопичення біомаси значно сповільнюється, а результати вимірювань в цьому діапазоні переक्रиваються. Це дозволяє вважати, що при вирощуванні рослин

II міжнародна науково-технічна конференція

Brassica rapa та *Brassica juncea* у змінному світловому полі з періодом $T \leq 1,2$ хв накопичення біомаси даних рослин дуже близьке до такого ж параметра, визначеного для постійного світлового поля.

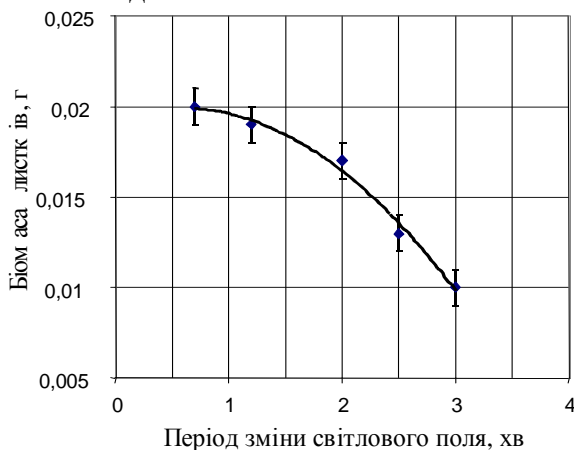


Рис.4. Залежність накопичення сухої біомаси рослини *Brassica rapa* на етапі бутонізації від періоду зміни світлового поля, створеного опромінювачем РСР-ВОТ-02 з лампою ДРИ-250-5.

Отримані результати аналізу біохімічного складу листків добре корелюють з результатами вимірювання сухої біомаси в залежності від періоду зміни поля випромінювання ФАР. Із приведених даних випливає, що для рослини *Brassica rapa* при рівні опромінення $60\text{--}70 \text{ Вт/м}^2$, оптимальний період зміни поля випромінювання лежить в межах $1,0\text{--}1,2$ хв.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень впливу постійних і змінних світлових полів на ріст і розвиток швидкоростучих рослин *Brassica rapa*, *Гірчиці сарептської* (*Brassica juncea* L.), *Крес-салату* (*Lepidium sativum* L.), *Гвоздики пишної* (*Dianthus superbus*) встановлено оптимальні рівні опромінення ФАР: для *Brassica rapa* – $60\text{--}70 \text{ Вт/м}^2$, *Гірчиці сарептської* – $60\text{--}70 \text{ Вт/м}^2$, *Гвоздики пишної* $100\text{--}120 \text{ Вт/м}^2$. З експериментів по дослідженню впливу періоду зміни світлового поля на накопичення сухої біомаси, концентрацію пігментів та відновлених коферментів для *Brassica rapa* і *Brassica juncea* L. встановлено, що ріст та розвиток даних рослин у змінних світлових полях з періодом зміни $T=0,7\text{--}1,2$ хв. протікає з однаковою інтенсивністю як в постійних, так і в змінних світлових полях, що дозволяє підвищити ефективність опромінювальних установок за рахунок змінного характеру опромінення.

The results of influence of variable irradiation parameters on crude and damp biological mass, contents of pigments, restored coferments of plants Brassica rapa, Brassica juncea L., Lepidium sativum L., and also in culture in vitro potatoes of different grades are presened.

Література

1. Кахнович Л.В. Фотосинтетический аппарат и световой режим. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1980. — 144 с.
2. Нечипорович А.А. Реализация регуляторной функции света в жизнедеятельности растения как целого и в его продуктивности// В сб.: Фоторегуляция метаболизма и морфогенеза растений. – М.: Наука, 1975. – С.228-244.
3. Росс Ю.К. Световой фактор продуктивности// Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР. Сер. Физиология растений. - 1977. - Т.3. - С.55-89.
4. Козинский В.А. Электрическое освещение и облучение. - М.: Агропромиздат, 1991. - 239 с.
5. Расчет и эксплуатация светотехнических импульсных установок и источников питания/ Сенилов Г.Н., Родионов Л.В., Ширшов Л.Г. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 193 с.

ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ПОХИБКИ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ

Застосовано відому модель похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги для побудови методики визначення режиму роботи з мінімальною похибкою такого трансформатора. Режим роботи з мінімальною похибкою може бути визначений при відхиленні від номінальної напруги експлуатації.

Підвищення точності високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) дає змогу підвищити до рівня сучасних вимог точність оцінювання споживаної потужності та обліку електроенергії у високовольтних колах електромереж. Для розв'язання завдання підвищення точності застосовується лінійна модель характеристик похибок по напрузі для цих трансформаторів, які мають систематичні складові, що за величиною перевищують їх випадкові складові, тому їх вплив на точність вимірювання є більш суттєвим. Запропоновано методику налаштування режиму роботи ТН таким чином, щоб мінімізувати його похибку по напрузі. Для цього використовуються отримані з паспортних даних або результатів перевірки ТН залежності похибки по напрузі δU від зміни напруги високовольтної обмотки в межах від $0.8U_{1н}$ до $1.2U_{1н}$ при певних значеннях опору навантаження низьковольтної обмотки. За цими даними будемо залежності похибки δU від зміни опору навантаження низьковольтної обмотки в межах від $0.25Z_{2н}$ до $Z_{2н}$ при певних значеннях напруги високовольтної обмотки (рис.1). В результаті отримуємо таке оптимальне значення опору навантаження Z_{2opt} , при якому похибка мінімальна ($\delta U = 0$) для номінального значення напруги високовольтної обмотки.

Користуючись цією ж методикою можна визначити поле значень похибок δU для різних значень навантаження Z_2 у низьковольтній обмотці при зміні напруги високовольтної обмотки. Оскільки ця похибка має систематичний характер, то її можна скомпенсувати.

Саме для вирішення задачі підвищення точності у працях [1,2,3] була побудована лінійна модель характеристик похибок по напрузі та по куту втрат для таких трансформаторів. Встановлено, що ці похибки

мають складову систематичного характеру, яка за величиною значно перевищує їх випадкові складові, тому саме вона суттєво впливає на точність вимірювальних ТН. Постає задача практичного застосування лінійних моделей високовольтних вимірювальних ТН. Варіант вирішення цієї задачі поданий у даній статті.

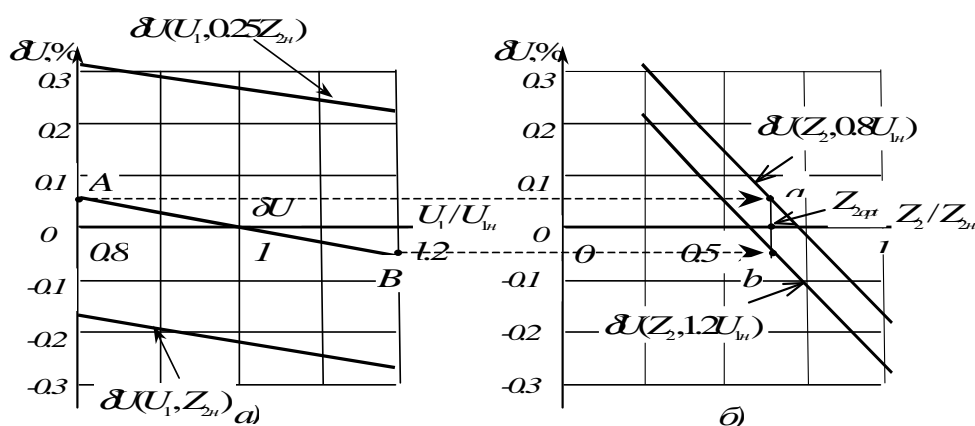


Рис.1. Похибка по напрузі ТН

Моделі характеристики похибки високовольтних ТН подані у працях [1,2] і на основі експериментальних даних підтверджено, що вони мають лінійний характер в залежності від факторів впливу. Відповідний вираз для похибки як функції параметрів режиму роботи трансформатора має вигляд:

$$\delta U = aS_2 + cU_1 + g, \quad (1)$$

де δU - похибка трансформатора по напрузі, a, c, g - коефіцієнти, що визначаються за формулами:

$$a = \frac{4}{3S_{2н}} (\delta U_2 - \delta U_1), \quad c = \frac{2.5}{U_{1н}} (\delta U_3 - \delta U_1),$$

$$g = 3.33\delta U_1 - 0.33\delta U_2 - 2\delta U_3, \quad (2)$$

де $\delta U_1, \delta U_2, \delta U_3$ - позначення похибок для нормованих режимів експлуатації ТН, що взяті з паспортних даних чи результатів повірки трансформатора:

$$\delta U_1 = \delta U(0.8U_{1н}, 0.25S_{2н}), \quad \delta U_2 = \delta U(0.8U_{1н}, S_{2н}),$$

$$\delta U_3 = \delta U(1.2U_{1н}, 0.25S_{2н}).$$

Вираз для δU свідчить, що залежності похибки від напруги у високовольтній обмотці при зміні опору навантаження вторинної обмотки можна подати у вигляді паралельних прямих, які будуються для різних значень опору навантаження Z_2 . Експериментальні дані з високим ступенем точності підтверджують такий характер залежності.

Ця властивість дає змогу використати модель характеристики похибки для настроювання режимів роботи ТН таким чином, щоб похибка була мінімальною.

Застосування моделі похибки ТН для знаходження режиму роботи з мінімальною похибкою

Методику настроювання режиму ТН на роботу з мінімальною похибкою розглянемо на прикладі високовольтного трансформатора напруги НКФ110, для якого ставиться вимога забезпечити мінімальне значення систематичної складової похибки по напрузі, наблизивши її до нуля. На рис 1а приведені залежності похибки δU від відношення напруги високовольтної обмотки до номінального значення цієї напруги $U_1/U_{1н}$ при двох різних значеннях опору навантаження вторинної обмотки $Z_2 = 0.25Z_{2н}$ та $Z_2 = Z_{2н}$ ($Z_{2н}$ - номінальне значення опору вторинної обмотки), що отримані з паспортних даних трансформатора.

Побудуємо аналогічні залежності похибки δU від зміни опору навантаження трансформатора – від відношення опору навантаження вторинної обмотки до номінального значення цього опору $Z_2/Z_{2н}$ при двох різних значеннях напруги у високовольтній обмотці $U_1 = 0.8U_{1н}$ та $U_1 = 1.2U_{1н}$ (рис.1б). З побудованих залежностей видно, що при номінальному навантаженні вторинної обмотки ($Z_2/Z_{2н} = 1$) похибка δU не є мінімальною і становить відповідно -0.18 для $U_1 = 0.8U_{1н}$ та -0.28 для $U_1 = 1.2U_{1н}$. Тому необхідно знайти таке значення опору навантаження Z_{2opt} , при якому похибка δU буде мінімальною.

Застосування лінійної моделі похибки вимірювального ТН дає змогу запропонувати просту методику визначення Z_{2opt} , при якому похибка вимірювання буде мінімальною. Суть цієї методики полягає у наступному. На рис.1а будуємо пряму паралельну $\delta U(U_1, 0.25Z_{2н})$ та $\delta U(U_1, Z_{2н})$, що перетинає вісь абсцис в точці для якої напруга високовольтної обмотки номінальна ($U_1/U_{1н} = 1$), при цьому похибка $\delta U = 0$. З графіку видно, що при $U_1 = 0.8U_{1н}$ $\delta U = 0.05\%$ (точка А, рис.1а), а при $U_1 = 1.2U_{1н}$ $\delta U = -0.05\%$ (точка В, рис.1а). Спроектуємо ці точки на рис.1б, тобто знайдемо значення опору навантаження Z_2 , при якому для напруг високовольтної обмотки, що складають $0.8U_{1н}$ та $1.2U_{1н}$ похибки становитимуть відповідно 0.05% (точка а, рис.1б) та -0.05% (точка б, рис.1б). З'єднавши точки а та б, отримаємо пряму, що перетинає вісь абсцис в точці Z_{2opt} з мінімальною похибкою

($\delta U = 0$). Отже, мінімальне значення похибки δU при номінальній напрузі високовольтної обмотки буде при значенні опору навантаження $Z_{2opt} = 0.7Z_{2н}$. Тому вибравши саме такий режим роботи ТН ми мінімізуємо похибку трансформатора по напрузі. Аналогічно можна знайти Z_{2opt} при інших напругах експлуатації ТН, відмінних від номінальної.

Застосування моделі похибки ТН для оцінювання змін похибки у діапазоні можливих режимів експлуатації

Користуючись тією ж методикою можна визначити поле значень похибок δU для різних значень навантаження Z_2 у низьковольтній обмотці при зміні напруги високовольтної обмотки в межах від $0.8U_{1н}$ до $1.2U_{1н}$.

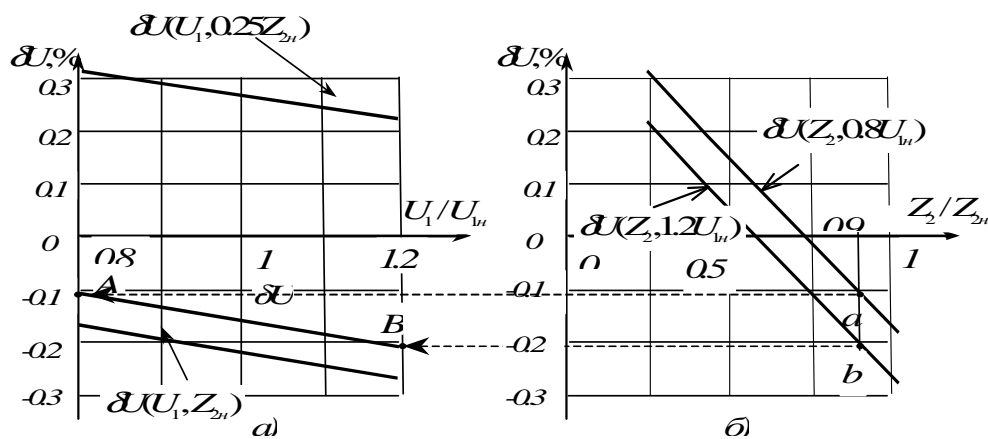


Рис.2. Похибка по напрузі ТН

Наприклад, при опорі навантаження $Z_2 = 0.9Z_{2н}$ та напрузі $U_1 = 0.8U_{1н}$ $\delta U = -0.11\%$ (точка а, рис.2б), а при напрузі $U_1 = 1.2U_{1н}$ і тому ж опорі навантаження $\delta U = -0.21\%$ (точка б, рис.2б). Спроекуємо ці точки на рис.2а, отримаємо відповідно точку А, для якої при $U_1 = 0.8U_{1н}$ похибка по напрузі становить -0.11% та точку В, для якої при $U_1 = 1.2U_{1н}$ похибка по напрузі становить -0.21% . З'єднавши точки А та В отримаємо пряму $\delta U(U_1, 0.9Z_{2н})$ – поле значень похибок по напрузі при опорі навантаження $0.9Z_{2н}$. З рис.2а видно, що при номінальній напрузі високовольтної обмотки значення похибки становить -0.15% , оскільки вона має систематичний характер, то її можна скомпенсувати.

Висновки

В статті наведено приклад практичного застосування моделі похибки високовольтних вимірювальних (ТН) для знаходження поля похибок при будь-якому значенні навантаження низьковольтної обмотки шляхом використання їх паспортних даних або даних останньої повірки. Подана методика дає змогу скомпенсувати систематичну складову цієї похибки та підвищити точність вимірювань за рахунок визначення оптимального значення опору навантаження, при якому ця похибка вимірювання є мінімальною.

There has been implemented a known model of high voltage measuring transformer tolerance to build up a technique to define its work mode with maximum tolerance. The work mode can be defined with a maximum tolerance at deviation from nominal work voltage.

Література

1. П.Євтух, Н.Куземко. Модель характеристики похибки високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги. //Вісник ТДТУ.- 2004.- Т.9. – №1-С.107-111.
2. П.Євтух, Н.Куземко. Використання паспортних даних високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги для підвищення їх точності. //Вісник ТДТУ.- 2004.- Т.9. – №2-С.89-93.
3. П.Євтух, Н.Куземко. Модель характеристики кутової похибки вимірювального трансформатора напруги та визначення її систематичної складової. //Вісник Національного університету „Львівська політехніка”.- 2004.– №500-С.19-24.

УДК 536.755+621.3

І. Щур, докт.техн.наук

Національний університет "Львівська політехніка", Україна

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ НЕРІВНОВАЖНИХ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ – НОВИЙ НАПРЯМ У ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ

На принципах термодинаміки нерівноважних процесів (перетворювачів енергії) розроблено теоретичні основи нового наукового напрямку – енерготехнології. Перевагами запропонованого підходу є: уніфікація, наочність та простота формування різних критеріїв енергетичної ефективності. Показано приклад застосування цього підходу до задач електротехніки.

Вступ

XX століття ознаменувалося бурхливим розвитком різних галузей науки як в теоретичному, так і в прикладному напрямках. У цей же час розвинулася інша наука – класична термодинаміка, яка завдяки феноменологічному підходу до макроскопічного опису систем є фундаментальною і дозволяє аналізувати енергоперетворення у явищах різної природи (фізичних, хімічних, біологічних) і навіть досліджувати закономірності в інформаційних, суспільних системах тощо. Проте об'єкти механіки, електротехніки, світлотехніки, за малим виключенням, не стали предметами дослідження термодинаміки, оскільки для них були розроблені свої методи і закони, які, як правило, мають узагальнені відповідники в термодинаміці. Термодинаміку використовували переважно для опису оборотних процесів та ізольованих систем зі значною часткою теплової енергії, звідки й походить назва науки. Термодинаміка нерівноважних процесів (ТД НП), яка розвинулася з класичної термодинаміки у другій половині XX ст., підвела загальні теоретичні основи під енергетичні закономірності не лише ізольованих, а й закритих і відкритих систем з реальними необоротними процесам та врахуванням їх швидкості протікання. В результаті був розроблений чіткий математичний апарат, особливо для лінійних систем, який дозволяє уніфікувати опис енергетичних перетворень. В наш час, коли гостро постала проблема ощадного використання енергії, є доцільною і перспективною розробка на основі підходів ТД НП теоретичних основ нового наукового напрямку – енерготехнології, в рамках якого були б розроблені як загальні принципи ощадного використання енергії в техніці, так і шляхи підвищення енергетичної ефективності конкретних технологічних процесів в різних галузях техніки – електротехніці, світлотехніці тощо, а особливо в комплексних енергетичних системах, де мають місце явища різної фізичної природи.

Термодинамічний аналіз перетворювачів енергії

Для будь-якої неізольованої системи, яка обмінюється енергією і речовиною із зовнішнім середовищем, зміна ентропії виражається двома членами: $d_e S$ – зовнішнім, зумовленим обмінами із зовнішнім середовищем (потік ентропії); $d_i S$ – внутрішнім, зумовленим нерівноважними процесами всередині системи (виробництво ентропії). Виходячи з цього, узагальнена форма другого закону термодинаміки для неізольованих систем виражається наступною залежністю швидкості виробництва ентропії в системі:

$$\sigma_s = \frac{d_i S}{dt} \geq 0. \quad (1)$$

Оскільки кожен реальний необоротний процес супроводжується якимось внутрішнім потоком \vec{J}_k , що породжується відповідною рушійною силою \vec{X}_k , яка виражає нерівноважність, то доказано [1], що в умовах локальної рівноваги має місце рівність

$$\sigma_s = \sum_i \vec{J}_k \vec{X}_k. \quad (2)$$

Принцип локальної рівноваги, що лежить в основі ТД НП, полягає в тому, що за нерівноважного стану тіла при не дуже швидкоплинних процесах стан дуже малих його елементів можна вважати рівноважним і застосувати до нього рівняння класичної ТД [2]. Добуток σ_s на абсолютну температуру системи носить назву дисипативної функції, оскільки відображає швидкість дисипації (розсіяння, деградації) вільної енергії системи.

Для умов локальної рівноваги справедливим є також феноменологічний закон, який виражає інтенсивність будь-якого потоку у вигляді добутків ТД-сил \vec{X}_i і відповідних кінетичних коефіцієнтів L_{ki} (принцип лінійності Онзагера):

$$\vec{J}_k = \sum_i L_{ki} \vec{X}_i. \quad (3)$$

Вираз (2) показує, що один потік може спонукатися різними термодинамічними рушійними силами. Проте, відповідно до принципу Кюрі [2], різні рушійні сили можуть одночасно впливати на пернос, якщо вони є тензорами одного рангу, наприклад, тільки скаляри або тільки вектори. У виразах (2) і (3) потоки і сили мають векторний характер, що найчастіше буває на практиці.

Відповідно до другого закону ТД (1), сума в рівнянні (2) повинна бути більшою від нуля. Але це не означає, що кожен із членів цієї суми окремо повинен бути більшим від нуля. Можливі випадки, коли одні члени додатні, тобто продукують ентропію, при умові, що інші від'ємні, тобто споживають надлишкову кількість ентропії. Це явище

яке полягає в тому, що одні процеси можуть спонукати інші процеси протікати в термодинамічно невігідному напрямку (проти рушійної сили, "під гору"), було названо ТД-спряженням [3]. Так, для двох спряжених процесів, до яких належить будь-який перетворювач енергії (ПЕ), оскільки його вихідні параметри (o – output) визначаються вхідними (i – input), можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} J_i = L_{ii} X_i + L_{io} X_o \\ J_o = L_{oi} X_i + L_{oo} X_o \end{cases} \quad (4)$$

де кінетичні або "феноменологічні" коефіцієнти знаходяться з виразів

$$L_{jk} = \left(\frac{\partial J_j}{\partial X_k} \right)_{X_j = \text{const}} \quad (5)$$

За визначенням X_i , X_o та J_i додатні, а J_o - від'ємний, що означає поглинання енергії на вході і утворення її на виході, тому L_{ii} , L_{oo} та $-L_{io}$ повинні бути додатними.

Завдяки ТД НП з допомогою рівнянь (2)-(5) були відкриті нові, а також досліджені відомі спряжені ефекти: термоелектричні, п'єзоелектричні, термодифузні, електрокінетичні, магнітострікційні, оптико-акустичні і т. п. [1-3]. Л.Онзагер відкрив загальний принцип, що називається співвідношення взаємності Онзагера, який можна називати четвертим законом ТД [4], за що був удостоєний Нобелівської премії. Він стверджує, що $L_{jk} = L_{kj}$, тобто що в околі стану рівноваги лінійна залежність будь-якого потоку J_j від будь-якої сили X_k співпадає з аналогічною залежністю потоку J_k від сили X_j . Співвідношення взаємності Онзагера дозволяють суттєво скоротити число незалежних коефіцієнтів у системах типу (4). Справедливість співвідношень взаємності Онзагера не обмежується квазірівноважними системами (співвідношення взаємності стосуються перших похідних (5) в точці рівноваги), проте їх сила тим вища, чим система ближча до рівноваги. Для суттєво нерівноважних систем лінійні залежності (4) і співвідношення взаємності часто справджуються завдяки справедливості принципу локальної рівноваги для окремих малих частин, на які розпадається кожна велика система, яка знаходиться під впливом градієнтів ТД-сил [4]. Відповідно до другого закону ТД (1), на допустимі значення кінетичних коефіцієнтів накладаються обмеження – матриця коефіцієнтів L повинна бути невід'ємно визначеною, тобто

$$(L_{io})^2 \leq L_{ii} L_{oo} \quad (6)$$

Якщо всередині ізольованої системи під дією якихось сил проходить перенос маси та енергії, то величина цієї сили зменшується, і система наближається до стану рівноваги, при якому її ентропія має максимальне значення. Ентропія системи в будь-якому її стані є мірою

II міжнародна науково-технічна конференція

наближення системи до рівноваги, а швидкість її зміни в часі (1), або потік ентропії J_S , дає кількісну оцінку результатів переносу, що проходить під дією якихось рушійних сил. Чим менші ці сили, тим менша нерівноважність і тим меншою є дисипація енергії (2) та енерговтрати. Для неізольованих систем, відповідно до принципу мінімуму І.Пригожина, ще одного Нобелівського лауреата в даній царині, потік ентропії буде набувати свого найменшого значення у стаціонарних процесах, причому, зрозуміло, що він буде тим меншим, чим меншою буде швидкість цього процесу [2].

Описані вище результати ТД НП покладені в основу теорії ТД-аналізу ПЕ [4,5].

З аналізу системи (4) зрозуміло, що чим більш від'ємне значення L_{i0} (в порівнянні зі значеннями решти коефіцієнтів L), тим вищий ступінь впливу сили на вході на вихідний потік. Крім того, при більш від'ємних значеннях L_{i0} збільшується ступінь пригнічення вхідного потоку силою на виході. Таким чином, коефіцієнт L_{i0} пов'язаний зі ступенем спряження q між собою вхідного і вихідного процесів у ПЕ. Для уникнення впливу на q величин інших кінетичних коефіцієнтів ступінь спряження був визначений як коефіцієнт L_{i0} , нормований на коефіцієнти L_{ii} і L_{oo} :

$$q = \frac{L_{i0}}{\sqrt{L_{ii}L_{oo}}} . \quad (7)$$

Відповідно до такого визначення, q буде від'ємним і набуватиме, зважаючи на (6), значень від -1 до 0 .

З метою отримання універсальних характеристик ПЕ у відносних одиницях, вводяться ще два показники:

- *відношення сил*

$$\chi = X_o / X_i ; \quad (8)$$

- *феноменологічне співвідношення*

$$Z = \sqrt{L_{oo}/L_{ii}} . \quad (9)$$

Пронормувавши вхідний та вихідний потоки на вихідний потік при нульовій вихідній силі (потік короткого замикання), систему рівнянь (4) можна переписати з використанням введених позначень

$$\begin{cases} \frac{J_i}{L_{ii} X_i} = q \cdot (Z\chi) + 1 \\ \frac{J_o}{ZL_{ii} X_i} = Z\chi + q \end{cases} , \quad (10)$$

а відношення потоків визначити таким чином:

$$\frac{J_o}{J_i} = Z \frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1}. \quad (11)$$

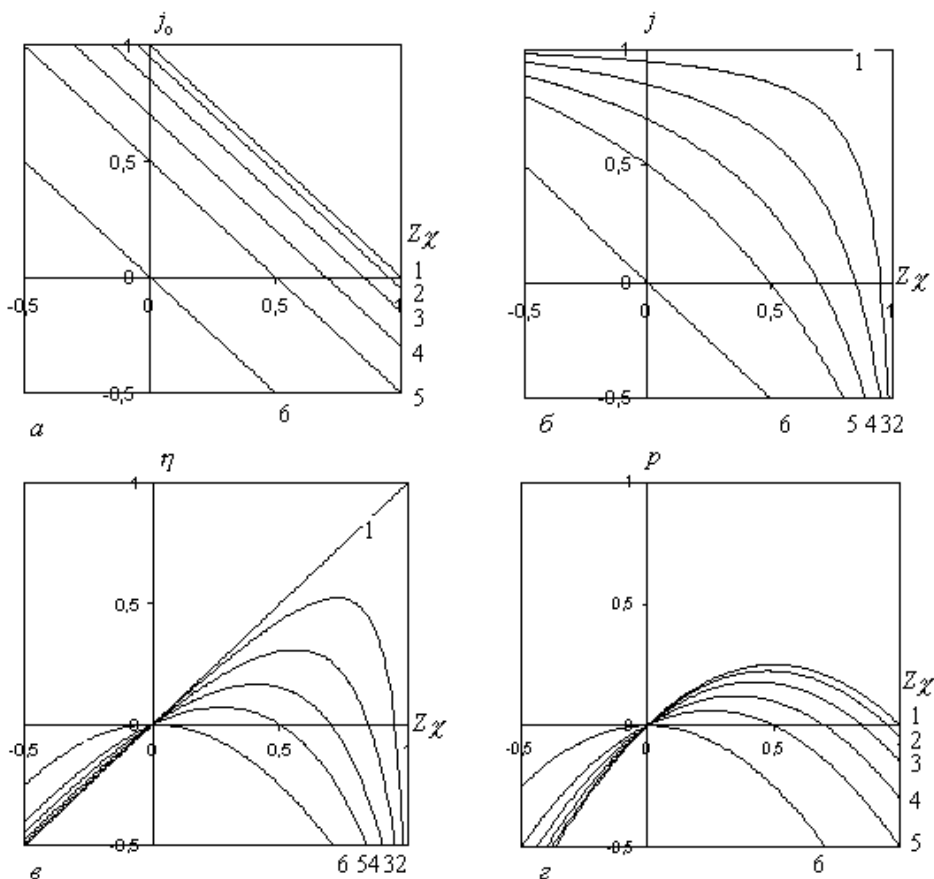


Рис. 1. Залежності нормованого вихідного потоку (а), нормованого відношення потоків (б), термодинамічної ефективності (в) і нормованої вихідної потужності (г) від нормованого відношення сил при різних ступенях спряження q :
 1 – $q=-1,0$; 2 – $q=-0,95$; 3 – $q=-0,85$; 4 – $q=-0,7$; 5 – $q=-0,5$; 6 – $q=0$

У виразах (10) та (11) добуток $(Z\chi)$ є безрозмірною величиною, яка виражає приведені відношення сил. Зміст q також стає зрозумілим: при $q = -1$ вихідний потік відрізняється від вхідного завжди в $-Z$ разів – отже, потоки жорстко (повністю) спряжені. При $q = 0$ вхідний і вихідний потоки викликаються лише своїми силами і протікають в напрямку їх зменшення, тобто потоки зовсім не спряжені. При значеннях q від -1 до 0 вихідний потік підтримується вхідним потоком у напрямку "під гору", проте відношення цих потоків змінюється разом зі зміною $(Z\chi)$, тобто вхідний та вихідний процеси в цьому випадку частково спряжені. На рис. 1,а,б приведені універсальні графічні залежності відповідно приведеного вихідного потоку

II міжнародна науково-технічна конференція

$j_o = -J_o / (ZL_{ii} X_i)$ (друге рівняння в системі (10)) та нормованого відношення потоків $j = -J_o / (ZJ_i)$ від нормованого відношення сил $(Z\chi)$ при різних значеннях ступеня спряження.

Важливою характеристикою ПЕ є ТД-ефективність їх функціонування, тобто відношення швидкості, з якою ПЕ виробляє вихідну вільну енергію, до швидкості, з якою він споживає вхідну вільну енергію:

$$\eta = -\frac{J_o X_o}{J_i X_i} = -j\chi = -(Z\chi) \frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1}. \quad (12)$$

Графічна залежність (12) при різних значеннях q показана на рис. 1, в. З (12) легко знаходиться оптимальне з точки зору ТД-ефективності відношення сил

$$(Z\chi)_{\text{opt-}\eta} = -\frac{q}{1 + \sqrt{1 - q^2}}, \quad (13)$$

при якому ТД-ефективність має максимальне значення, рівне

$$\eta_{\text{max}} = (Z\chi)_{\text{opt-}\eta}^2. \quad (14)$$

Робота ПЕ в точці з максимальною ТД-ефективністю є привабливою на перший погляд, проте при високих ступенях спряження ($|q| \rightarrow 1$) вона може бути недоцільною, оскільки вихідний потік наближається до нуля, тобто вихідний процес протікає з дуже малою швидкістю. Для того, щоб перетворення енергії проходило з більшою швидкістю, необхідно частково пожертвувати ТД-ефективністю.

Одним з доцільних варіантів вибору робочої точки ПЕ може бути режим максимальної вихідної потужності. Нормоване значення вихідної потужності можна виразити наступним чином:

$$p = -\frac{J_o X_o}{L_{ii} X_i^2} = -[(Z\chi) + q] \cdot (Z\chi). \quad (15)$$

Графічна залежність (15) при різних q показана на рис. 1, г. Максимум вихідної потужності $p_{\text{max}} = q^2/4$ досягається при $(Z\chi)_{\text{max}, p} = -q/2$. Однак, як видно з рис. 1, в і г, максимальна вихідна потужність супроводжується досить низькою ТД-ефективністю і може

бути рекомендована хіба що для ПЕ, підключених до дармових джерел енергії, наприклад, природних поновлювальних.

Використовуючи отримані універсальні залежності (10)-(12) і (15), можна шляхом комбінації двох показників легко формувати інші доцільні для конкретних ПЕ критерії оптимальної роботи [4], наприклад: максимальний вихідний потік при оптимальній ТД-ефективності, максимальна вихідна потужність при оптимальній ТД-ефективності, максимум добутку $[J_o/(ZL_i X_i)] \cdot \eta$ (так званий "економічно вигідний вихідний потік"), максимум добутку $p\eta$ (так звана "економічно вигідна вихідна потужність") тощо. Методика забезпечення вказаних оптимальних режимів полягає у такій зміні доступних кінетичних коефіцієнтів вихідної моделі (4), щоб отримати потрібну комбінацію параметрів ($Z\chi$) і q , при якій вибраний критерій досягає свого максимального значення. Наприклад, для критерію максимального вихідного потоку при оптимальній ТД-ефективності оптимальна робоча точка досягається за таких значень параметрів: $(Z\chi)=0,486$; $q=-0,786$; $\eta=0,236$.

Побудована за принципом рівнянь Онзагера лінійна математична модель ПЕ описує стаціонарні режими роботи. Значний практичний інтерес складають нестационарні, динамічні режими роботи ПЕ, у яких, відповідно до принципу мінімуму Пригожина, генерується значно більше ентропії. Проведені дослідження [] показали, що лінійними рівняннями Онзагера аналогічно вищевикладеному, але в операційній формі можна представити динамічну систему. Вона будується для зображень за Лапласом потоків і сил та характеризується змінними у часі кінетичними коефіцієнтами, що пов'язано з наявністю різноманітних сталих часу (фізично – акумуляторів енергії), проте співвідношення взаємності мають місце у будь-який момент часу. За такою динамічною моделлю системи можна будувати аналогічні критерії оптимальності для нестационарних режимів роботи, але відповідні розрахунки слід проводити вже з оригіналами зображень.

Таким чином, на основі викладеного можна запропонувати методику енергетичної оптимізації стаціонарного режиму роботи ПЕ, яка полягає в наступному.

1. На підставі аналізу фізичних процесів, які мають місце в конкретному ПЕ, виходячи із визначеної дисипативної функції, необхідно вибрати пари вхідних та вихідних ТД-сил і потоків. Цей етап є найбільш складним і відповідальним, оскільки потребує певного досвіду. Рекомендації щодо його проведення можна знайти в [1].

2. Для отриманих вхідних і вихідних потоків і сил побудувати математичну модель і скласти лінійні рівняння Онзагера (4), що описують досліджуваний ПЕ, та знайти вирази для його основних

II міжнародна науково-технічна конференція

параметрів: q, Z, χ . Цей етап має свої особливості в залежності від типу системи і її складності:

а) У випадку лінійності системи та можливості її математичного опису за умови правильності вибору потоків і сил виконання цього етапу не складає спеціальних труднощів.

б) У випадку нелінійності системи для кожної робочої точки (X_1, X_0) система характеризується своїми кінетичними коефіцієнтами, значення яких можна знайти за виразами (5). Тому нелінійну математичну модель системи необхідно дослідити для ряду робочих точок, які складають практичний інтерес, і далі за отриманими результатами можна порахувати значення параметрів q, Z, χ .

в) У випадку складності математичного опису системи її можна дослідити експериментально. Правильно вибрати ТД-потоки і сили можна лише після проведення ряду експериментів та математичної обробки їх результатів з метою отримання лінійних залежностей між парами потоків та сил. Далі кінетичні коефіцієнти можна розрахувати з системи рівнянь (4) за результатами дослідів короткого замикання $(X_0 = 0)$ і неробочого ходу $(J_0 = 0)$ або у випадку неможливості їх проведення – за результатами вимірювань у двох точках і обчислень за виразами (5), замінивши диференціали параметрів на відповідні прирости.

3. Обґрунтувати найбільш доцільний критерій енергетичної оптимізації та скласти його математичний вираз.

4. Підставити значення q, Z і χ у вираз критерію оптимізації та дослідити його на максимум почергово за доступними параметрами вихідної математичної моделі.

5. Порівняти між собою отримані результати і вибрати найкращий варіант оптимізації.

Приклад

Як приклад для ілюстрації застосування запропонованого методу візьмемо електромеханічний ПЕ – електропривід постійного струму незалежного збудження за класичною схемою з шунтуванням якоря [7]. Вибір такої схеми зумовлений, перш за все, порівняно низьким спряженням вхідного і вихідного процесів, а також широкими можливостями вибору робочої точки з порівняно важко прогнозованими показниками. Схема електропривода, що живиться від джерела напруги ДН показана на рис.2.

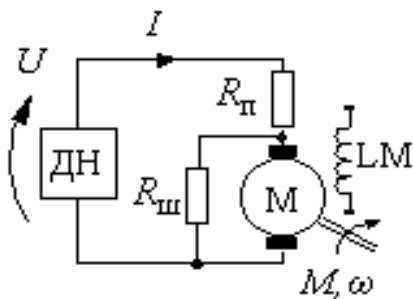


Рис. 2. Схема електро-механічного ПЕ

Аналіз дисипативної функції даного ПЕ показує, що вхідною силою

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

слід вибрати напругу ДН U , вхідним потоком – споживаний струм I , вихідною силою – кутову швидкість обертання двигуна ω , а вихідним потоком – його електромагнітний момент M . З відомих рівнянь для машини постійного струму та рівнянь рівноваги напруги за другим законом Кірхгофа отримана наступна система лінійних рівнянь Онзагера:

$$\begin{cases} I = \frac{\alpha(1+R_{\text{я}}/R_{\text{ш}})}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}U - \frac{\alpha k\Phi}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}\omega \\ -M = -\frac{\alpha k\Phi}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}U + \frac{k^2\Phi^2}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}\omega \end{cases}, \quad (16)$$

де $R_{\text{я}}$ - опір якоря двигуна; k – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік, а відношення додаткових опорів позначено

$$\alpha = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}}. \quad (17)$$

Для подальшого аналізу енергетики цієї схеми доцільно перейти до відносних одиниць, здійснивши нормування на номінальні значення параметрів двигуна $U_{\text{д.н}}$, $I_{\text{д.н}}$, $M_{\text{н}}$, $\omega_{\text{о}} = U_{\text{д.н}}/k\Phi_{\text{н}}$ та ввівши позначення:

$$\begin{aligned} U^* &= \frac{U}{U_{\text{д.н}}}; \\ I^* &= \frac{I}{I_{\text{д.н}}}; \quad M^* = \frac{M}{M_{\text{н}}}; \quad \Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}}; \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{о}}}; \quad R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{д.н}}}{I_{\text{д.н}}}; \\ R^* &= \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}\alpha}{R_{\text{н}}}; \quad \xi = \sqrt{\frac{R_{\text{п}} + R_{\text{ш}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{ш}}}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot (1 + R_{\text{я}}/R_{\text{ш}})}}. \end{aligned}$$

В результаті отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} I^* = \frac{1}{R^*\xi^2}U^* - \frac{\alpha\Phi^*}{R^*}\omega^* \\ -M^* = -\frac{\alpha\Phi^*}{R^*}U^* + \frac{(\Phi^*)^2}{R^*}\omega^* \end{cases}. \quad (18)$$

З системи рівнянь (18) за виразами (7)-(9) легко знаходяться основні параметри досліджуваного ПЕ:

$$q = -\alpha\xi; \quad Z = \Phi^* \xi; \quad \chi = \frac{\omega^*}{U^*}; \quad Z\chi = \frac{\omega^* \Phi^*}{U^*} \xi. \quad (19)$$

З (18) також випливає, що при неробочому ході ($M^* = 0$) відносна кутова швидкість двигуна $\omega^* \Phi^* / U^* = \alpha$. Тому, враховуючи вирази (19), дуже наочним буде поєднання кривих ТД-ефективності (рис. 1, в) з механічними характеристиками привода у відносних одиницях, як показано на рис. 3 (для спрощення прийнято $U^* = 1$; $\Phi^* = 1$). Для будь-

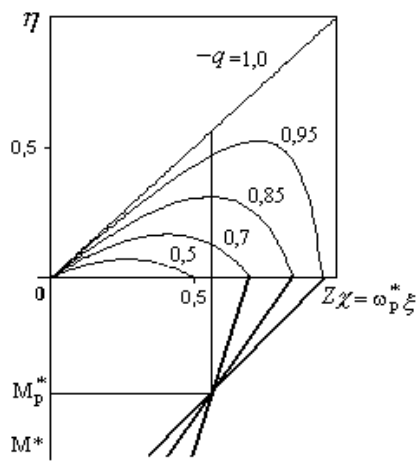


Рис. 3. Зв'язок ТД-ефективності η з механічними характеристиками електропривода при шунтуванні якоря двигуна

яких заданих параметрів робочої точки привода – відносних значень моменту навантаження M_p^* та кутової швидкості ω_p^* – можна легко візуально і аналітично оцінити, як пов'язані між собою такі взаємно суперечливі показники як енергетична ефективність та жорсткість механічної характеристики. При заданій жорсткості можна зразу сказати про ККД такого привода.

За отриманими вище виразами (12)-(15) легко здійснити оптимізацію параметрів даного ПЕ за якимось із критеріїв. У таблиці приведені основні залежності, отримані для двох критеріїв: максимальної енергетичної ефективності та максимальної

вихідної потужності. Крім вказаних виразів, вихідним спільним рівнянням є також рівняння механічної характеристики привода – друге рівняння системи (18). Розв'язок вихідних рівнянь приводить до виразів оптимальних параметрів через координати робочої точки (ω_p^* , M_p^*). У випадках відмінності від одиниці параметрів U^* , Φ^* , що прийнято з метою спрощення виразів у таблиці, замість ω_p^* необхідно підставляти $\omega^* \Phi^* / U^*$, а замість M_p^* – вираз $M_p^* / (U^* \Phi^*)$. Графічне дослідження отриманих виразів α і ξ показало, що при умові $\omega_p^* > 0,2$ вплив множника $M_p^* R^*$ на отримані вирази є незначним, тому ним можна знехтувати і отримати наближені прості результати дослідження, які приведені внизу таблиці. Параметри електричної схеми ПЕ визначаються за отриманими оптимальними значеннями α і ξ з виразів

$$R_{\Pi}^* = R_{\text{я}}^* \frac{(1-\alpha)\xi^2}{1-\alpha\xi^2}; \quad R_{\text{ш}}^* = R_{\text{я}}^* \frac{\alpha\xi^2}{1-\alpha\xi^2}.$$

Таблиця
Основні результати оптимізації електромеханічного ПЕ

	Критерій оптимальності	
	Максимальна енергетична ефективність	Максимальна вихідна потужність
Вихідні рівняння	$\frac{\omega_p^* \Phi^*}{U^*} = \frac{\alpha_{\text{opt-}\eta}}{1 + \sqrt{1 - \alpha_{\text{opt-}\eta}^2 \xi^2}}$	$\frac{\omega_p^* \Phi^*}{U^*} = \frac{\alpha_{\text{opt-}p}}{2}$
	$\frac{\omega_p^* \Phi^*}{U^*} = \alpha_{\text{opt-}\eta} - \frac{R^*}{U^* \Phi^*} M_p^*$	
Вирази для оптимальних параметрів як функцій координат робочої точки (ω_p^* , M_p^*) при $U^* = 1$ і $\Phi^* = 1$	$\alpha_{\text{opt-}\eta} = \frac{\omega_p^* (\omega_p^* + M_p^* R^* - 2)}{M_p^* R^* - 1}$ $\xi = \sqrt{\frac{M_p^* R^* - \omega_p^*}{(\omega_p^*)^2 (\omega_p^* + M_p^* R^* - 1)}}$ $\eta_{\text{max}} = (\omega_p^* \xi)^2$	$\alpha_{\text{opt-}p} = 2\omega_p^*$ $\xi = \frac{1}{\omega_p^*} \sqrt{\frac{\omega_p^* - M_p^* R^*}{2(1 - 2M_p^* R^*)}}$ $P_{\text{max}} = \frac{(\alpha_{\text{opt-}p} \xi)^2}{4}$
Графічне представлення параметрів α і ξ як функцій координат робочої точки (при $R^* = 0,05$)		
Результати досліджень	$\alpha_{\text{opt-}\eta} \approx \omega_p^* (2 - \omega_p^*)$	$\alpha_{\text{opt-}p} = 2\omega_p^*$
	$\xi \approx \frac{1}{\sqrt{\alpha_{\text{opt}}}}; \quad -q \approx \sqrt{\alpha_{\text{opt}}}; \quad Z\chi_{\text{opt}} \approx \frac{\omega_p^*}{\sqrt{\alpha_{\text{opt}}}}$	

Висновок

Використання підходів лінійної ТД НП для моделювання процесів енергоперетворення в об'єктах різної природи відкриває нові можливості їх енергетичного аналізу і оптимізації та забезпечує чіткий,

II міжнародна науково-технічна конференція

наочний математичний апарат, що дає змогу отримувати універсальні практичні результати.

The theoretical foundations of a new scientific direction – energy technology – were developed on the principles of thermodynamics of irreversible processes (energy converters). The advantages of the suggested approach are: unification, visuality and simplicity of forming various criteria of energy efficiency. The example of application of this approach to problems of electric engineering was given.

Література

1. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1964.
2. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
3. Вейник А. Термодинамическая пара. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 384 с.
4. Вестерхоф Х., ван Дам К. Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах: Пер. с англ. М., 1992. – 686 с.
5. Эткин В.А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. – 168 с.
6. Когут А., Щур І.З. Опис динамічних процесів у двигуні постійного струму з точки зору термодинаміки нерівноважних процесів // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – №551. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – С. 40-45.
7. Щур І.З. Моделювання електроприводів постійного струму методами лінійної термодинаміки нерівноважних процесів // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002, №12, т.2. – С.413-416.

УДК 669.041: 536.2.001.573:621.365.3.

И.Труфанов, докт.техн.наук; А.Чубаров;

Е.Ксендзюк; Л.Богданова

Запорізький національний технічний університет

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ГАЗОПЫЛЕУДАЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОАО ЗАПОРОЖАЛЮМИНИЙ

Проводится теоретическое обоснование разработки параметров экстремальной адаптивной системы регулирования координат газопылеудаления алюминиевого производства.

Введение

Современное производство алюминия базируется на технологических процессах, упрощенная технологическая схема которых приведена на рис.1

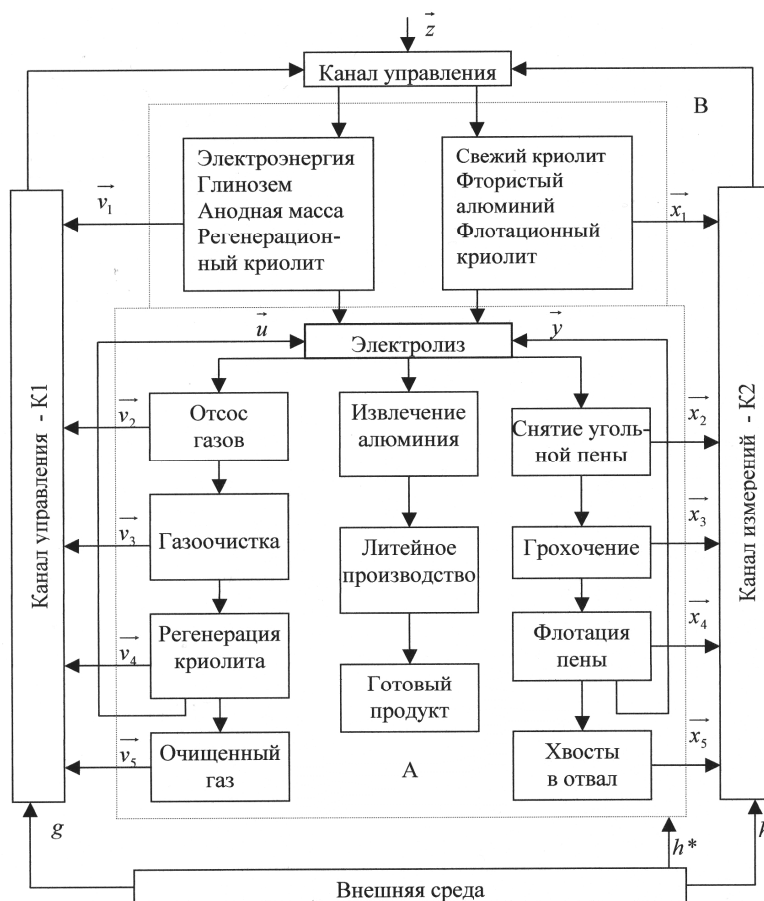


Рисунок 1 – Технология производства алюминия. Схема функциональная

II міжнародна науково-технічна конференція

{B} – объект управления:

$\vec{v} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ - входные параметры (переменные);

$\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - выходные переменные; {A} – управляющая часть системы; $\vec{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ - выходные переменные; $\vec{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ - управляющие воздействия на объект; K_1, K_2 - каналы связи управляющей части с объектом и измерений соответственно;

$\vec{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ - помехи, воздействующие на объект управления;

$\vec{h}^* = \{h_1^*, h_2^*, \dots, h_n^*\}$ - помехи, воздействующие на канал управления.

Данные переменные описывают внутренние шумы системы, неконтролируемые влияния внешней среды: $\vec{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$,

$\vec{h} = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ - помехи, существующие в каналах связи K_1 и K_2 .

Математическое описание электролитического процесса плавления алюминия базируется на основе термохимического дифференциального уравнения [1] вида

$$U_{Al_2O_3} - T \frac{dA_2}{dt} = U_{(Al_2F_4SO_4; NaF, H_2O)} - T \frac{dA_1}{dt} \quad (U - \text{полная энергия по}$$

термомеханическим определениям соответственно глинозема и криолита; A - свободная энергия образования составляющих процесса; T - температурный коэффициент - постоянная времени).

На основе данного уравнения и параметров системы (рис.1) разрабатывается функциональная модель связи выхода \vec{Y} с ее неуправляемыми \vec{X}, \vec{E} и управляемыми \vec{U} входами в моменты времени τ $\vec{Y}(\tau) = F[\vec{X}(t), \vec{U}(\tau), \vec{E}(\tau), \tau]$, а также и набора технологических операций, указывающих, как, располагая информацией о входах X, E и U, определить выход \vec{Y} , не обращаясь к реальной системе [2]. Данный этап связан с определением управления \vec{U} для достижения заданной цели \vec{Z} управления системой с помощью модели F системы. При этом кроме цели \vec{Z} используется информация о состоянии внешней среды \vec{X}, \vec{E} (электроэнергия, глинозем и др.; криолит и др. – рис.1) и выделенных ресурсах управления в виде ограничений, накладываемых на управление \vec{U} . Алгоритм управления отражает алгоритмы коррекции параметров \vec{X}, \vec{E} на различных этапах времени работы системы. Современное электрометаллургическое предприятие по производству алюминия является иерархической системой, поэтому алгоритмы простейшей коррекции, связанной с коррекцией управления и параметров модели, требуют коррекции

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

параметров раздела системы и внешней среды. Современные системы по ряду причин (в т.ч. значительное изменение свойств внешней среды и самой системы, стадии очистки газов, технического обеспечения скрубберов, системы сухой очистки: воздуходувок, аэролифтов, сжатого воздуха, вытяжной системы и др.) образует адаптивную систему экстремального типа. В данном случае должно рассматриваться несколько вариантов объекта управления: $\vec{Y} = F_1^0(\vec{X}_1, \vec{E}_1, \vec{U}_1, \tau)$; $\vec{Y} = F_1^0[F_2^0(\vec{X}_2, \vec{E}_2, \vec{U}_2, \tau), \vec{E}_1, \vec{U}_1, \tau]$ и т.д.

Первый вариант обладает значительным преимуществом в виде всего одного фактора неопределенности \vec{E}_1 , для которого проще найти математическое описание (вид F_1^0) и малое число управлений. Недостатком является малая управляемость, т.к. вход \vec{X}_1 неуправляемый. При втором варианте $\vec{Y} = F_1^0[F_2^0(\cdot)]$ преимуществом является возможность (хотя бы частичная) управления входом \vec{X}_1 , который непосредственно воздействует на состояние \vec{Y} , что достигается с помощью дополнительного канала \vec{U}_2 . Недостатком данного варианта является расширение фактора неопределенности за счет введения дополнительного неконтролируемого возмущения \vec{E}_2 ; усложнение модели системы, т.к. необходимо дополнительно описывать присоединенную часть F_2^0 ; увеличение каналов управления, что расширяет возможности управления, но требует увеличения ресурсов.

С методологической точки зрения используются два основных подхода в математическом моделировании: метод «черного ящика» на локальном уровне АСУТП и *стохастический* (дисперсионный, регрессионный, корреляционный) *метод планирования эксперимента*: $[A][\vec{X}_{ex}(\tau), \vec{Y}(\tau)] = 0$. Данный аналитический метод базируется на основе декомпозиции поставленной задачи. Между моделями $[A][\vec{X}_{ex}(\tau), \tau]$ и $[A][\vec{Y}(\tau), \tau]$ устанавливаются, применительно к условиям верхнего уровня иерархии управления. В данном случае уравнение термодимического уравнения в виде уравнения энергии тепло-массоносителя в форме интегрального уравнения Винера-Хопфа [2,5].

Для обеспечения нормальной работы электролизера необходимо поддерживать технологические параметры электролиза в заданных пределах, для чего проводится ряд технологических операций: пробивка корки электролита, загрузка сырья и материалов; ликвидация анодных эффектов; поддержание уровня электролита и корректировка его состава; перетяжка анодной рамы; загрузка анодной массы; выливка металла; устранение возможных нарушений

II міжнародна науково-технічна конференція

технологического режима. Ниже приводится технологическая схема производства алюминия.

Основным сырьем, используемым при электролитическом производстве алюминия, является: окись алюминия Al_2O_3 (глинозем) марок Г-00, Г-0; фтористые соли Na_3AlF_6 (криолит); AlF_3 (фтористый алюминий) анодная масса. В глиноземе, потребляемом при электролизе алюминия, должно быть минимально возможное содержание окислов железа, кремния и других более электроположительных, чем алюминий элементов, так как, выделяясь вместе с алюминием при электролизе на катоде, эти элементы ухудшают качество алюминия. Нежелательно также присутствие в глиноземе окислов щелочных и щелочноземельных металлов. Повышенное содержание окислов калия отрицательно сказывается и на сроке службы угольных подин электролизеров. Нежелательно присутствие в глиноземе влаги, которую образует AlF_3 , вредные для здоровья HF (фтористый водород), и повышает расход дорогостоящего AlF_3 . Особые требования предъявляются к фазовому составу глинозема. Присутствие в техническом глиноземе 25 – 15 % $\lambda - Al_2O_3$ обуславливает его хорошую устойчивость против насыщения влагой и необходимую скорость растворения его в расплавленном электролите. Растворимость глинозема уменьшается по мере увеличения содержания в нем λ -модификации. При электролизе желателен равномерный по крупности кристаллов. Лучшей растворимостью обладает более мелкий глинозем, однако при электролизе происходит сильное его распыление, что приводит к безвозвратным его потерям. Крупнокристаллический глинозем меньше пылит, однако зачастую медленнее растворяется в электролите, образуя осадки на подине. Расплавленной средой, в которой осуществляется электролиз алюминия, служит криолит Na_3AlF_6 или $3NaF_3 \cdot AlF_3$. Одной из необходимых добавок к криолиту при электролизе алюминия является фтористый алюминий AlF_3 . Чистота криолита и фтористого алюминия имеет большое значение для процесса электролиза. Присутствие окислов элементов с более положительными, чем у алюминия потенциалом (FeO , SiO_2) должно быть минимальным, так как эти элементы выделяются в процессе электролиза на катоде. Присутствие H_2O и анионов SO_4^{2-} тоже должно быть ограничено, так как они разлагают электролит в расплавленном состоянии, нарушая соотношение между фтористым натрием и фтористым алюминием.

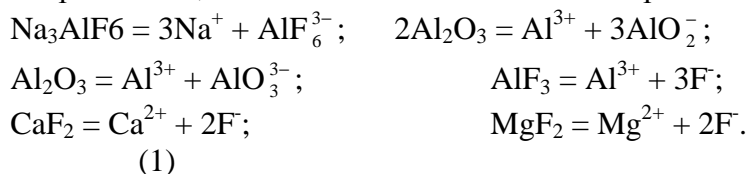
В процессе электролиза алюминия, помимо свежих фтористых солей, широко используются флотационный и регенерированный криолиты, полученные из удаляемой из электролитов при технологическом обслуживании электролизеров угольной пены, и из

растворов, поглощающих в газоочистных сооружениях выделяющиеся в процессе электролиза фтористый водород и соли.

Влияние составных частей анода и его режима работы на процесс электролиза. Анодная масса изготавливается из пекового или нефтяного кокса и каменноугольного пека. К качеству анодной массы предъявляются требования по содержанию золы (не более 1%), серы (не более 1,4%), а также пластичности. При расплавлении в аноде жидкая масса должна хорошо растекаться, но в то же время не образовывать отстоев пека. Анод, сформованный из массы с повышенным содержанием пека, имеет пористую структуру, трещины, выделяет в атмосферу корпуса большое количество смолистых веществ и приводит к повышенному расходу анодной массы. Содержание пека регламентируется пластичностью массы и обычно поддерживается для ванн с боковым токоподводом в пределах 27–29 % [8].

Состав электролита и его влияние на параметры электролиза. Основой электролита электролизеров является раствор глинозема в расплавленном криолите. Растворимость глинозема в криолите при 950°C 15%. Растворение глинозема сопровождается его ионизацией, протекающей с отщеплением иона алюминия Al^{3+} . Криолитоглиноземный расплав не содержит соединений металлов, имеющих меньшее напряжение разложения, чем Al_2O_3 , не взаимодействует химически с углеродистыми материалами, не разлагается при температурах электролиза, обладает хорошей электропроводностью и умеренной летучестью. В состав электролита кроме криолита и глинозема входят AlF_3 (3–6%), CaF_2 (2–4%), MgF_2 (до 5%), иногда $NaCl$ (2–4%) и LiF (до 5%). Эти вещества входят в электролит для улучшения его технологических свойств, т.е. оптимальные условия для высокоэффективного получения алюминия и уменьшения частоты анодных вспышек.

Криолитоглиноземные расплавы состоят в основном из ионов, а не из нейтральных молекул, так как вещества, входящие в состав этих расплавов, в значительной степени ионизированы:



Электролит действующего электролизера всегда содержит примеси Fe_2O_3 , SiO_2 , CuO , V_2O_5 , SO_4^{2-} и др., поступающие с глиноземом, фтористыми солями и анодной массой. Все эти примеси также ионизируются в расплаве и удаляются в процессе электролиза, поэтому они не накапливаются в электролите, и их содержание не превышает десятых и сотых долей процента.

II міжнародна науково-технічна конференція

Криолитовое отношение электролита. Криолит можно рассматривать не только как натриевую соль фторалюминиевой кислоты NaAlF_6 , но и как соединение трех молекул фтористого натрия с одной молекулой фтористого алюминия $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$. Отношение числа молекул фтористого натрия к числу молекул фтористого алюминия в расплаве назовем криолитовым отношением.

Криолитовое отношение электролита один из важных технологических факторов электролизного технологического процесса, влияющих на производительность электролизера, т.к. именно криолит взаимодействует с глиноземом, анодом, катодом и другими примесями, впоследствии чего получается алюминий с определенными свойствами, зависящими от выходных параметров вышеприведенного оборудования электролизера. Без качественного криолита процесс электролиза будет происходить не по нормам, что приведет к снижению производительности электролизера, вследствие чего производительность будет ниже возможной. При отсутствии достаточного количества криолита возникают анодные эффекты, которые приводят к энергетическим потерям и износу оборудования, в частности, анода. В производстве алюминия применяют кислые электролиты, криолитовое отношение которых 2,6 – 2,8, что является оптимальным.

Температура плавления электролита. При нагревании твердого электролита его плавление происходит в том же интервале температур, что и кристаллизация жидкого электролита - в начале плавятся легкоплавкие части, затем, при более высоких температурах, тугоплавкие. Таким образом, температура, при которой твердый электролит полностью превращается в расплав, совпадает с температурой начала кристаллизации этого расплава, откуда следует, что из-за присутствия разнообразных добавок процесс электролиза происходит дольше, хотя некоторые из этих добавок снижают температуру плавления до оптимальной, поэтому необходимо определить процент добавок, который должен содержать электролит. Для нормального протекания процесса электролиза требуется некоторый перегрев электролита относительно его точки кипения. Практика показывает, что для этого достаточно 5 – 10°C, хотя в некоторые периоды работы ванны перегрев может составлять более 100°C. Очевидно, что режим работы электролизера с наименьшим перегревом электролита наиболее экономичен, т.к. чем ниже температура, тем меньше тепла теряет электролизер, меньше фтористых солей улетучивается с поверхности электролита и тем выше производительность электролизера. Если электролизер работает на минимальном перегреве электролита, то температура ванны будет зависеть от температуры его плавления - чем ниже точка плавления электролита, тем при меньшей температуре можно вести процесс при

одном и том же перегреве (температура плавления криолита 1010°C). Добавки глинозема в криолит снижают температуру плавления расплава примерно на 5°C на каждый процент Al_2O_3 . Расплав, содержащий 15% Al_2O_3 , плавится около 935°C. Известно, что содержание глинозема в электролите действующих электролизеров 4 – 8%, поэтому электролиты состоящие только из криолита и глинозема, имеют температуру плавления 970 – 990°C, а температура процесса с такими электролитами при условии, что перегрев минимален, примерно 1000°C. Электролизеры не могут работать экономично при такой температуре, поэтому ее снижают, вводя в электролит добавки различных фтористых солей. Добавки фтористого алюминия понижают температуру плавления расплава примерно на 10°C на каждые 3% AlF_3 к массе криолитоглиноземного расплава, кроме того AlF_3 затрудняет разряд ионов натрия на катоде, что благоприятно сказывается на производительности электролизеров. Однако AlF_3 уменьшает растворимость глинозема в электролите, увеличивает сопротивление электролита и его текучесть, поэтому количество AlF_3 , дополнительно вводимое в криолитоглиноземный расплав, ограничивают 6%, что соответствует криолитовому отношению 2,6.

Фтористый кальций понижает температуру плавления электролита в той же степени, что и AlF_3 : от каждого процента добавленного CaF_2 температура снижается на 3 – 3,5°C. Фтористый кальций редко вводят специально, так как соединения кальция в виде примеси содержится в сырье и материалах, загружаемых в электролизеры.

Эффективность добавки MgF_2 несколько выше, чем CaF_2 : 1% MgF_2 понижает температуру плавления электролита на 5°C. Однако суммарное содержание MgF_2 и CaF_2 не должно превышать 8%, иначе снизится растворимость глинозема и увеличится плотность электролита. Температуру плавления электролита можно снизить также добавками $NaCl$ и LiF , которые пока не получили большого распространения.

Плотность электролита. Так как алюминий в электролизерах накапливается под слоем электролита, разница между плотностями расплавленного алюминия и электролита должна быть как можно больше. Если разница будет невелика, алюминий может всплыть на поверхность электролита и замкнуть катод с анодом накоротко. Плотность алюминия чистоты 99,75% в точке его плавления 659°C составляет 2,382 г/см³, а при более высокой температуре может быть найдена по уравнению

$$P_t = 2,382 - 0,000273(t - 659). \quad (2)$$

Плотность расплавленного электролита зависит от криолитового отношения, содержания Al_2O_3 и солевых добавок.

II міжнародна науково-технічна конференція

Добавки CaF_2 и MgF_2 повышают, а AlF_3 , NaCl и LiF понижают плотность расплавленного электролита. Плотность электролита промышленных электролизеров колеблется в пределах 2,085 – 2,125 г/см³ при рабочих температурах и криолитовом отношении 2,4 – 2,7. Как видно, плотность электролита в действующих электролизерах примерно на 10% ниже плотности алюминия при тех же температурах. Однако плотность электролита изменяется с температурой быстрее, чем плотность расплавленного алюминия: с понижением температуры на 10°C плотность электролита изменяется на 0,01 г/см³, а плотность алюминия только на 0,003 г/см³. Поэтому значительное снижение температуры может привести к выравниванию плотностей и всплыванию алюминия.

Электропроводность электролита. Сопротивление электролита в значительной мере определяет расход электроэнергии в процессе электролиза, т.к. составляет около 1/3 общего сопротивления электролизера. При выборе электролита важно, чтобы он был как можно более электропроводен, однако не любое уменьшение удельного электросопротивления электролита полезно для процесса. Например, с повышением температуры сопротивление электролита уменьшается, но возрастает растворимость алюминия в электролите и скорость его окисления на аноде; с повышением концентрации NaF удельное электросопротивление электролита понижается в ущерб производительности электролизера; добавки AlF_3 , CaF_2 и MgF_2 , наоборот, увеличивают сопротивление электролита, но делают возможной работу при более низкой температуре. Энергетические потери на преодоление добавочного сопротивления в этом случае окупаются ростом производительности электролизеров. Приведенное выше, не означает, что попытка понизить удельное сопротивление электролита обречена на неудачу. Очень перспективны электролиты, содержащие добавки хлористого натрия (NaCl) и особенно фтористого лития (LiF). Удельное сопротивление электролита, чаще всего применяемого в производстве (криолитовое отношение 2,5 – 2,7, содержание CaF_2 4 – 6 %), при 950°C составляет 0,005 – 0,007 Ом·м. С повышением температуры на каждые 10°C удельное сопротивление электролита уменьшается на 2 – 3 %. Каждый процент Al_2O_3 в электролите увеличивает его удельное сопротивление примерно на 1,5 %. [9]

Характеристики электродных процессов при электролизе.

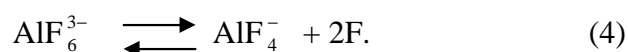
Напряжение разложения. Рассмотрим процессы, протекающие на электродах при электролизе криолитоглиноземного расплава, содержащего добавки AlF_3 , CaF_2 и MgF_2 . Если к электролизеру подвести постоянное напряжение и плавно изменять его от нуля до нескольких вольт, то начиная с 1,3В в электролизере появляются

первые признаки электролитического разложения (выделение газа на аноде, протекание тока через электролит). Минимальное напряжение, при котором происходит электролитическое разложение вещества называется его напряжением разложения (для глинозема - 1,3В). Каждое вещество, входящее в состав электролита NaF или CaF₂ имеет свое значение напряжения разложения, но оно выше, чем напряжение разложения Al₂O₃, этим и объясняется отсутствие кальция в расплавленном алюминии и фтора в анодных газах при нормальном течении электролиза. [10].

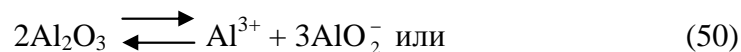
Катодные и анодные процессы на электролизере. При электролитическом получении алюминия электролит состоит в основном из криолита и глинозема. Расплавленный криолит диссоциирует на ионы:



Анион AlF₆³⁻ также частично диссоциирует:



Глинозем при растворении в криолите диссоциирует на ионы:



В электролите присутствуют в основном катионы натрия и алюминия.

Алюминий электроположительнее натрия, поэтому первым выделяется на катоде: $\text{Al}^{3+} + 3 \bar{e} \longrightarrow \text{Al}$. Кроме этого процесса, возможен также неполный разряд Al³⁺ с образованием одновалентного иона алюминия $\text{Al}^{3+} + 2 e \longrightarrow \text{Al}^+$.

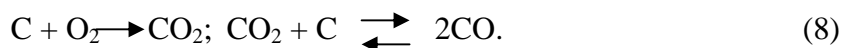
Разряд одновалентного иона на катоде сопровождается выделением металла $\text{Al}^+ + e \longrightarrow \text{Al}$. Вследствии того, что при большой концентрации ионов натрия и высокой температуре разница между напряжением разложения NaF и Al₂O₃ мала, на катоде может выделяться металлический натрий $\text{Na}^+ + e \longrightarrow \text{Na}$. Образование одновалентного алюминия и выделение натрия при электролизе криолитоглиноземных расплавов являются паразитическими процессами, приводящие к потерям металла, т.е. к снижению производительности электролизера.

II міжнародна науково-технічна конференція

На аноде происходит разряд кислородосодержащих анионов:



Кислород взаимодействует с углеродом анода по реакции:



Если суммировать катодные и анодные реакции, протекающие при разложении глинозема, то процесс электролиза можно записать в таком виде:



Вследствие изменения параметров электролиза возникает анодный эффект: при понижении концентрации Al_2O_3 в электролите до 1–1,5% нормальный процесс электролиза прекращается и на электролизере возникает анодный эффект. Проявляется это в резком возрастании напряжения от 4,3–4,5В до 50–60В. На границе анод–электролит возникает микродуговой процесс: ток от анода к электролиту передается в основном через плазму микродуг. Анодный эффект наступает тогда, когда плотность тока на аноде становится выше критической. В процессе электролиза растворенный в электролите глинозем вырабатывается, соответственно снижается концентрация ионов AlO_2^- и Al_3^{3-} , ухудшается смачиваемость анода электролитом, газовые пузырьки труднее отделяются от поверхности анода (прилипают к ней), увеличиваются в размерах, при этом электролит газовыми пузырьками отесняется от поверхности анода, и меньшая его площадь соприкасается с электролитом; анодная плотность тока становится равной критической, газовые пузырьки сливаются, образуя на поверхности анода тонкую пленку; электрическое сопротивление резко возрастает на границе анод–электролит, напряжение на электролизере мгновенно возрастает. При выработке глинозема из электролита снижается и концентрация анионов AlO_2^- и AlO_3^{3-} . Вследствие этого возникает так называемая концентрационная поляризация, вызывающая резкое увеличение потенциала анода относительно расплава. Становится возможным разряд ионов фтора по реакции:

$4\text{F} + \text{C} - 4\bar{e} \longrightarrow \text{CF}_4$. Газообразный четырехфтористый углерод улетучивается из электролизера через твердые промежуточные соединения углерода и фтора, которые имеют очень высокое электрическое сопротивление. Когда такой пленкой покрывается поверхность анода, сопротивление резко возрастает, напряжение

увеличивается. После растворения в электролите новой порции глинозема анодный эффект на электролизере с нормальным ходом прекращается. Часто для ликвидации вспышки после добавления глинозема необходимо кратковременное снижение плотности тока на электролизере. Это достигается замыканием части анода на металл путем взбалтывания катодного алюминия с помощью шумовки или деревянной жерди [8].

Рассматривая поток газомассопереноса как сухой «раствор» [11,12], концентрацию натриевых соединений (3) и углерода анода можно представить

$$C_{Na^-} = \frac{1}{A} C, \quad (10)$$

где $A=const$, равная концентрации активных элементов [11] Al, F, O_2 и др.; C - концентрация Na или F .

Работа, совершаемая разделением активных элементов при движении газомассопотока, будет равна [13]:

$$P = \alpha RT \lg C/x + \alpha RT \lg \frac{C}{X-A} = 0, \quad (11)$$

где RT – тепловая константа; x – путь автономного движения активного элемента; A – концентрация заряженных частиц [12].

Из (11) имеем: $x^2 - Ax - C^2 = 0$ или $x = A/2 + \sqrt{A^2/4 + C^2}$.

Концентрация фтора F будет равна $(X-A) = -A/2 + \sqrt{A^2/4 + C^2}$. В состоянии активного контакта активных соединений по (3)-(9) уравнение (11) принимает вид:

$$P = 2\alpha RT \lg \frac{x}{C} + \alpha RT \lg \frac{C}{y} = 0, \quad (12)$$

где x, y – координаты (x – продольная, y – поперечная массопотока); α – доля (соотношение Na, F). Связь между этими координатами $x^2 / y = C$. Работа, совершаемая при проведении реакций (3)-(9) равна [13]:

$$P = \frac{\alpha}{z_1} RT \lg \frac{a_1}{a_1} + \frac{\alpha}{z_2} RT \lg \frac{a_2}{a_2} = 0, \quad (13)$$

где индексы 1,2 обозначают элементы: 1 – Na , 2 – F , отсюда следует энергетическое соотношение

$$\left(\frac{a_1}{a_1} \right)^{1/z_1} = \left(\frac{a_2}{a_2} \right)^{1/z_2} \quad \text{или} \quad \frac{a_1^{1/z_1}}{a_2^{1/z_2}} = \frac{a_1^{1/z_1}}{a_2^{1/z_2}}, \quad (14)$$

II міжнародна науково-технічна конференція

откуда работа при переведении потока из одного энергетического поля в другое, будет равна [13]:

$$P = \frac{\alpha}{z_+} RT \frac{a_+}{a_+} + \frac{a}{z_-} RT \lg \frac{a_-}{a_-} = 0, \quad (15)$$

откуда следует $a_+^{1/z_+} + a_-^{1/z_-} = a_+^{1/z_+} + a_-^{1/z_-}$, т.е. произведение энергетической активности соединений Na и F является постоянным. Если поток не энергонасыщенный, то

$$x + y = -\left(\frac{A^-}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{A^-}{2}\right)^2 + (C_{Na_+} + C_{F_+})^2}. \quad (16)$$

Если расположить по активности побочные химические соединения в порядке: гидроксил- сульфат- хромат- утрат- тартрат- хлорат- арсенат- фосфат- молибдат- ацетат- хлоридбромид-хлоридйодид, то

$$F^+ = x - B = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + C^2}, \quad (17)$$

где B – концентрация активного элемента в перечисленных химических соединениях. На основании изложенного величина

$$x + y = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + (C_{F_+} + C_{Na_+})^2}. \quad (18)$$

Это соотношение и решение (15) дает уравнение физико-химического равновесия потока газомассопереноса [12]:

$$\frac{x}{m} = Kb_1C_{Na} : (1 + b_1C_F + b_2C_{Na}), \quad (19)$$

где m – масса погонного объема газопылевой смеси; K , b_1 , b_2 – константы. Уравнение (19) дает соотношение, которое является основой графического изображения опытных данных:

$$\frac{C_{Na} / C_F}{x / m} = \frac{b_2}{b_1K} + \frac{C_{Na}}{KC_F}. \quad (20)$$

На границе раздела активной и пассивной зон [13]

$$E = 2,303 \frac{RT}{L_f} \lg \frac{c}{x} \quad (L_f - \text{соотношение энергетических потенциалов } Na)$$

и F . Если данное соотношение подставить в уравнение концентраций x (18), то получим

$$E = \frac{2,303RT}{L_f} \lg \left[\frac{A}{2C} + \sqrt{1 + \frac{A^2}{4C^2}} \right]. \quad (21)$$

Для значений $C > A$ величина $E = 0$, а при $C < A$ величина $dE/d \lg C = 2,303RT/L_f \approx 107$ мВ при 20°C [11]. Данная величина определяет величину регулируемого энергетического воздействия на газомассопоток алюминиевого производства на единичный погонный объем потока газопылевой смеси. Величина $dE/d \lg C = 107$ мВ на единичный поток газопылевой смеси получена для значений следующих нормальных электродных потенциалов активных элементов: $Na = -2,713$; $F = 2,85$; $Al = -1,66$ В.

Выводы

Данная модель и алгоритм управления разрабатываются применительно к следующим условиям [рис.1]: фазовый состав глинозема (25-15)% Al_2O_3 , криолит Na_3AlF_6 или $3NaF_3 \cdot AlF_3$; на 1 т массы расходуется (700-720) кг сухого кокса и (280-300) кг обезвоженного пека; содержание золы не более 1%, соды не более 1,4%; пластичность массы (27-29)%; AlF_3 (3-6)%, CaF_2 (2-4)%; MgF_2 (до 5)%; $NaCl$ (2-4)%; LiF (до 5)%; криолитовое отношение электролита (2,6-2,8); температура плавления электролита (15% Al_2O_3) – около 935°C ; содержание глинозема (4-8)%; перегрев расплава до 1000°C ; добавки AlF_3 - на 10°C на каждые 3% AlF_3 к массе криолитоглиноземного расплава (6% при криолитовом отношении 2,6); степень понижения 1% MgF_2 - на 5°C температуры плавления электролита; плотность алюминия чистоты 99,75% в точке плавления 659°C – $2,382$ г/см³; плотность электролита 2,085-2,125 г/см³; изменение плотности электролита на 0,01 г/см³ при понижении температуры на 10°C , при этом плотность Al понижается на 0,003 г/см³ и др. параметры.

На основании проведенных исследований и анализа результатов получены выводы:

- при понижении концентрации Al_2O_3 в электролите до 1–1,5% нормальный процесс электролиза прекращается и на электролизере возникает анодный эффект, который сопровождается резким повышением напряжения (до 60В), следовательно, выделяется тепло, которое расходуется впустую - износ оборудования, материальные затраты;

II міжнародна науково-технічна конференція

- обеспечение номинальной температуры разложения глинозема в криолите (940-960°C) является главным фактором качественного и эффективного получения алюминия;
- поддерживание номинального напряжения, количества глинозема и состава криолита обеспечивает технологический процесс получения алюминия с нормальными условиями.

Система экстремального адаптивного управления строится в соответствии с достижениями компьютерных систем [6,7] на основе реализации алгоритмов управления, реализуемых микроконтроллерами [3,4].

The theoretical substantiation of gas and dust removal coordinates extreme adaptive regulation system parameters development of aluminium manufacture is carried out.

Литература

1. Федотьев П.П. Электрометаллургия. – Петроград: Научн. хим.-техн. изд-во, 1923. – 164 с.
2. Лисиенко В.Г., Волков В.В., Маликов Ю.К. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. – М.: Металлургия, 1988.– 231с.
3. Предко М. Руководство по микроконтроллерам. Том 1. – М.: Постмаркет, 2001. – 416 с.
4. Предко М. Руководство по микроконтроллерам. Том 2. – М.: Постмаркет, 2001. – 488 с.
5. Боровиков В. СТАТИСТИКА: искусство анализа данных на компьютере. – СПб: Питер, 2001. – 656 с.
6. Все необходимое для автоматизации: решения на базе персональных компьютеров. – ADVANTECH: Русское издание. – ProSoft, 2001. – 356 с.
7. Более 50 лет деятельности в области информационных технологий и автоматизации. – Харьков: АОЗТ Тяжпромавтоматика, 2004. – 96 с.
8. Вольфсон Г. Е., Ланкин В. П. Производство алюминия электролизерах с обожженными анодами. – М.: «Металлургия», 1974. – 136 с.
9. Тарарин С. В. Электролиз расплавленных солей. – М.: «Металлургия», 1982. – 224 с.
10. Кузнецов С. И., Эпштейн А. М. Электролитическое производство алюминия. – М.: 1953.- 300 с.
11. Свойства металлов. В 2-х частях. Ч2. Химические свойства. Справочник/ М.М. Антонова, И.Т. Брахнова, А.Л. Борисова и др. – М.: Металлургия, 1976. – 384с.
12. Лыков А.В. Тория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472с.
13. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320с.
14. Эндрюс К., Дайсон Д., Киоун С. Электронограммы и их интерпретация. – М.: Мир, 1971. – 256с.

УДК 669.041(075): 621.365.2: 621.377-52.

И. Труфанов, докт. техн. наук; Д. Ярымбаш

Запорожский национальный технический университет

СЕНСОРНАЯ ПОДСИСТЕМА ЛОКАЛЬНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Проведено теоретическое описание и математическое исследование процессов формирования качественных характеристик сенсорной подсистемы локальной адаптивной системы автоматизации технологических процессов на базе датчиков больших токов Холла и Роговского. Применительно к условиям металлургических печей графитации графитированных электродов мощностью (6000 - 10000) кВА получены математические модели стохастической погрешности их динамического функционирования в составе командно-информационного комплекса при рабочих токах (10 - 100) кА.

На современном этапе развития науки и практики управления металлургическим предприятием основной задачей является создание высококачественных систем автоматизации технологических процессов и систем организационного регулирования хода производства. Системы локального уровня призваны рационально организовать тепловую работу металлургических печей, которая не только определяет высокую эффективность их работы, но и в значительной мере влияет на качество производимой продукции.

Сенсорно-измерительная подсистема обеспечивает контроль и задание параметров режима работы электротехнологического оборудования.

Ниже проводится анализ состояния и разработка системо- и схмотехнических параметров систем автоматизации электротехнических печей графитации, которые относятся к классу печей с малоокислительными и слабо- или сильновосстановительными атмосферами рабочего пространства. Сенсорная подсистема таких вещей характеризуется: большими токовыми нагрузками (до 10–20 кА); значительным поперечным сечением печи графитового токоподвода (до 160000 мм²); высокими температурами в зоне измерения (до 170 – 250 °С); ограниченным пространством в области токоподводов, где возможно размещение измерительно-информационного оборудования. Указанные факторы обуславливают *новое направление* в области измерений параметров переменного и постоянного тока посредством измерения напряженности магнитного поля на основе эффектов Холла. Точность составляет +/- (1-3)%. Нижняя граница полосы пропускания – постоянный ток; верхняя граница – (2-10) кГц, что вполне обеспечивает высокое качество сенсорной подсистемы на промышленной частоте рабочего тока.

II міжнародна науково-технічна конференція

Токовые датчики имеют электрическую и магнитную совместимость с серийными комплектами интерфейсных приборов (мультиметр, осциллограф, самописец, интерфейсы серий RS-232, RS-485 и др.).

Задачей сенсоной подсистемы локальной адаптивной системы автоматизации рафинировочной печи (как металлургической печи) является обработка и формирование блоков информации, пригодной для использования в исполнительной подсистеме. Вводя обозначения, согласно которым x – сигнал на входе, z – на выходе, k – коэффициент передачи (усиления), имеем для аналоговых каналов линейное преобразование входного сигнала $z = kx + b$ [1] (b – сигнал смещения). Нелинейные преобразователи (функциональные) обычно выполняют преобразование [1] $z = k_1 \ln x$; $z = x^n$; $z = \sqrt[n]{x}$; $z = f(x_1, \dots, x_n)$; $z = p$; $z = p^{-1} x(p) dt$; $z = p^{-1} f(p) dx$; $p \equiv d/dt$ – оператор непрерывного линейного дифференцирования Лапласа.

Нами разработана функциональная структура командно-информационного комплекса локальной системы автоматизации печи графитации как обобщенного объекта автоматизации (металлургической печи) (рис. 1).

Электрические нагрузки и пропорциональные им сигналы являются математической базой построения системы автоматизации, где сигналы являются статически детерминированными или стохастическими. В общем случае выходная величина $v(t) = x(t)$ с некоторой стохастической моделью [2] погрешности измерения и отработки сигналов: $v(t) = Au([x(t)])$; ($[x(t)]$ – матрица сигналов; Au – идеализированный оператор обработки (модели) сигнала).

Для реализации системы автоматизации технологических процессов графитации применяются непрерывные или дискретные величины [2], где при разработке математических моделей используются следующие математические координаты и функции: $X(t)$ – измеряемая величина; $F(x, t)$ – одномерный закон распределения; плотность вероятности $w(x, t)$, на основании которых принимаются следующие центральные моменты [3]: $\bar{X}(t)$ – математическое ожидание; $D[X(t)] = \sigma_x^2(t)$ – дисперсия (σ_x – среднеквадратическое отклонение – СКО); $R_x(t_1, t_2)$ – автокорреляционная функция, где $R_x(t_1, t_2) = [X(t_1) - \bar{X}(t_1)][X(t_2) - \bar{X}(t_2)]$.

$w(t) = \frac{\lambda (\lambda x)^k}{k!} \exp(-\lambda x)$ при $x > 0$; $w(t) = 0$ при $x \leq 0$; интегральный закон распределения

$$F(t) = \frac{\exp(-\lambda x)}{k!} \left[-(\lambda x)^k + \sum_{i=1}^k (-1)^{i+1} \cdot k(k-1)\dots(k-i+1) (\lambda x)^{k-i} \right];$$

математическое ожидание $\bar{X}(t) = \frac{k+1}{\lambda}$; дисперсия $\sigma_x^2 = \frac{k+1}{\lambda^2}$. Из

этого следует, что поток событий (дискретных процессов опроса датчиков) по Эрлангу k -го порядка реализуется из простейшего (равномерного или нормального) при исключении $\{k\}$ следующих друг за другом по времени значений $x(t)$ и оставлении (проведении) $(k+1)$ -го, для которого $w_k = (T) = \lambda (\lambda T)^k (k!)^{-1} \exp(-\lambda T)$ при $T > 0$.

Основной характеристикой печи графитации является характеристика энергетического потока (основного параметра адсорбции), являющийся стохастическим параметром: $G_x(\omega)$ -энергетический спектр (спектральная плотность энергии) случайного процесса $X(t)$. Это неотрицательная вещественная функция частоты. Величина $G_x(\omega)d\omega/2\pi$ - мощность спектральных составляющих процесса $X(t)$ в диапазоне $\omega - (\omega + d\omega)$; $R_x(t + \tau, t)$ -автокорреляционная функция стационарного случайного процесса $X(t)$ для моментов времени $t_i, t_i + \tau$ [2] (по А.Н. Колмогорову) будет равен

$$C_x(\tau, t_i) = [X(t_i) - X(t_i - \tau)]^2 = \sigma_x^2(t_i) + \sigma_x^2(t_i - \tau) - 2R_x(t_i, t_i - \tau) + [\bar{X}(t_i)]^2 + [\bar{X}(t_i - \tau)]^2 - 2\bar{x}(t_i)\bar{x}(t_i - \tau) \quad (1)$$

Для стационарного процесса $X(t)$ уравнение (1) принимает вид:

$$C_x(\tau) = 2\sigma_x^2 [1 - \rho_x(\tau)] = 2\sigma_x^2 [1 - \rho_x(\tau)], \quad (2)$$

где $\rho_x(\tau) = R_x(\tau)\sigma_x^{-2}$ - нормированная автокорреляционная функция.

Наряду с данными динамическими характеристиками применяются другие качественные характеристики: интервал корреляции, положение и значение максимума энергетического спектра, ширина спектра случайного процесса, граничные частоты. Последние две характеристики задаются при определенном уровне отсечки (ограничении) спектра, т.е. $G_x(\omega_c) = k_I \sup[G_x(\omega)]$, где $k \approx 0,05$ (в пределах 5%). В соответствии с [2,3] энергетический спектр и автокорреляционная функция связаны соотношениями Винера-Хинчина (для $G_x(\omega) = \sigma_x(-\omega)$) для стационарного процесса:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_x(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \sigma_x(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega; \quad (3)$$

$$G_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau. \quad (4)$$

Для $\omega = 2\pi f$ соотношения (3) и (4) принимают вид:

$$R_x(\tau) = \int_0^{\infty} G(f) \cos(2\pi f\tau) df; \quad (5)$$

$$G_x(f) = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau. \quad (6)$$

Для систем электрооборудования как комплекса управляющей электротехники входная информация $x_i(t)$ для УВВ_i (рис. 1) является несингулярным процессом, полученным при прохождении сигнала равномерной плотности через колебательный контур, для которого: автокорреляционная функция $R_x(\tau) = C^2 \cos \beta\tau \cdot \exp(-\lambda/\tau)$; дисперсия $D[X] = \sigma_x^2 = C^2$; энергетический спектр (величина энергетического потока)

$$G_x(\omega) = C^2 \lambda \left[\frac{1}{\alpha^2 + (\beta + \omega)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (\beta - \omega)^2} \right].$$

Отсюда следует, что

для разработки алгоритма обработки информации и построения модели случайного процесса, реализуемого системой (рис. 1), как сенсорной подсистемой локальной адаптивной системы автоматизации печи графитации для обработки графитированных электродов, применяемых в электрометаллургии, будет необходима следующая последовательность математических операций:

- 1) Исходный статистический материал (информация $x_i(t)$) сводится в таблицы, где каждая строка соответствует одной реализации $x_i(t)$ (измеряемого процесса), а каждый столбец – значениям процесса, имевшим место во всех реализациях в данный отрезок времени измерения.
- 2) Вычисляется эмпирическая плотность вероятности в форме гистограммы или полигона в тех временных диапазонах, где объем выборки позволяет это сделать.
- 3) Строится временной ряд выборочных оценок первых двух моментов распределения на всем протяжении реализаций.
- 4) Для одномерных законов распределения, близких к нормальному, вычисляются значения функций (5) и (6) по соотношениям (с помощью рядов) Лагерра или Эджворта [3] и по ним строятся эмпирические законы распределения в аналитической форме.
- 5) На основе проверки параметрических и непараметрических гипотез [4] проверяется правильность выбора и группирования исходного статистического материала $x_i(t)$. Если в системе (рис. 1)

II міжнародна науково-технічна конференція

применено детерминированное (принудительное) разбиение реализаций $x_i(t)$, то законность такой процедуры также должно быть проверена с помощью критерия Аббе [3]. Если исходный материал $\{x_i(t)\}$ был выбран из нескольких произвольных замеров, то проверка проводится с помощью критерия Н.В. Смирнова [4].

б) Производится проверка соблюдения гипотез об эргодичности и статической стационарности исследуемого процесса $\{x_i(t)\}$.

7) Вычисляются выборочные оценки автокорреляции, структурной функции (1) и текущего спектра (4).

Исследуемый объект является энергонагруженным (на токи до 12 кА), поэтому применяются датчики больших токов, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Датчики больших токов на основе датчиков Холла различных модификаций

Системная характеристика	Тип датчика			
	ДБТ-10	ДБТ-25	ДБТ-50	ДБТ-100
Номинальный измеряемый ток, кА	10	25	50	100
Величина выходного сигнала, А	1,0	2,5	5	10
Приведенная погрешность, %	0,5			
Масса измерительного блока, кг	50			
Масса блока питания, кг	50			
Диапазон рабочих температур, °С	-50...+50			
Напряжение источника питания, В	220(50 Гц)			
Цена одного образца, долл. США	от 1000			

«Короткие сети» электрических металлургических печей имеют широкий класс схемотехнических решений, основными признаками которых являются конструктивные воплощения триангуляции ее элементов: компенсаторов, шинных пакетов, неподвижных «башмаков», пакетов гибких проводников, подвижных «башмаков», проводников и токопроводящих конструкций электродержателей, контактных щек, электродов. Параметры этих элементов оказывают основное влияние на активное и индуктивное сопротивление, поверхностный эффект, эффект близости, внешний поверхностный

эффект, перенос мощности между фазами, потери энергии в металлических конструкциях и др.

Для работы с шинами большого размера и сложной формы используется «пояс Роговского», представляющий собой электрическую вторичную обмотку намотанную на немагнитном сердечнике (соленоид на немагнитном шнуре) и замыкаемую вокруг рабочей шины с током. При замыкании обмотки соленоида на рабочее сопротивление нагрузки дифференциальное уравнение электрического равновесия будет иметь вид

$$L \frac{dI}{dt} + (r + R_n) I = \frac{L}{N} \frac{dI_0}{dt}; I = \mu \mu_0 S N^2 / \ell, \quad (7)$$

где L, r – индуктивность и сопротивление «пояса»; N – число витков обмотки «пояса»; μ, μ_0 – магнитная проницаемость сердечника «пояса» и вакуума; S, ℓ – площадь сечения и длина сердечника; I_0 – рабочий (измеряемый) ток.

Решение дифференциального уравнения позволяет определить время изменения тока и режим работы датчика («пояса Роговского»). Если постоянные времени датчика больше постоянной времени измерительной цепи, то датчик Роговского работает в режиме трансформатора тока, т.е. реализуется режим интегрирования сигнала на собственной индуктивности «пояса» и рекомендуется к использованию на практике электрометаллургии.

Процесс, описываемый системой (7), подразумевает стационарность процесса Эрланга и его линейность. В реальной системе (рис. 1) место нелинейности. Рассматривая каждый блок УУВ_{*i*} (рис. 1) как нелинейный блок с одним входом и одним выходом. Желательная функция v_i может быть записана в виде ряда (степенного

[1]): $v_i = \sum_{i=1}^{\ell} a_i x^i$, где реальная функция v_i описывается с учетом

искажения (ошибки) V_{ex} соотношением $Z_{вых} = \sum_{j=0}^n b_j (x + V_{ex})^j; n \neq \ell$.

Дисперсия погрешности на выходе будет равна $\bar{V} = \sum_{i=0}^{\ell} a_i \bar{X}^i$;

$\sigma_v^2 = \sum_{i=0}^{\ell} \sum_{j=0}^{\ell} a_i a_j [\overline{X^{i+j}} - (\bar{X}^i)(\bar{X}^j)]$. Для стационарного нормального

закона распределения $X(t)$ при $\bar{X}(t) = 0$ величина дисперсии равна

$$\sigma_v^2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^{\ell} a_i a_j [\overline{X^{i+j}} - (\bar{X}^i)(\bar{X}^j)] & \text{при четной сумме } i + j \\ 0 & \text{при нечетной сумме } i + j \end{cases} \quad (8)$$

II міжнародна науково-технічна конференція

Для печных трансформаторов со «звездой» на трансформаторе или «треугольником на подвижном башмаке» при числе элементов $\ell = 7$ для системы (рис.1) величина дисперсии σ_v^2 для элементной базы на основе датчиков Холла (табл.1) и величине токов 50 – 100 кА по (8) будет иметь вид ряда Лагерра [3]:

$$\sigma_v^2 = a_1^2 \sigma_x^2 + 2a_2^2 \sigma_x^4 + 3a_3 \sigma_x^4 (2a_1 + 5a_3 \sigma_x^2) + 24a_4 \sigma_x^6 (a_2 + 3a_4 \sigma_x^2) + 15a_5 \sigma_x^6 (2a_1 + 14a_3 \sigma_x^2 + 63a_5 \sigma_x^4) + 20a_6 \sigma_x^8 (6a_2 + 90a_4 \sigma_x^2 + 509a_6 \sigma_x^4) + 210a_7 \sigma_x^8 (a_1 + 9a_3 \sigma_x^2 + 99a_5 \sigma_x^4), \quad (9)$$

где a_i – текущее значение выходного сигнала датчика Холла (табл. 1).

Выражение (9) имеет то достоинство, что при условии раскрытия скобок в (9) и $\ell < 7$ пренебрегается соответствующим числом последних слагаемых.

Для оценки $\sigma_{z_{\text{вх}}}^2$ принимаются выражения (3),(4),(8) в виде:

$$\sigma_{z_{\text{вх}}}^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_j b_k \left[\sum_{m=0}^{j+k} C_{j+k}^m R_{x^{j+k-m} y_{\text{вх}}^m} - \left(\sum_{m=0}^j C_j^m R_{x^{j-m} y_{\text{вх}}^m} \right) \left(\sum_{m=0}^k C_k^m R_{x^{k-m} y_{\text{вх}}^m} \right) \right];$$

$$R_{vz_{\text{вх}}} = a_1 \sum_{m=0}^j b_j \sum_{m=0}^j C_j^m [\overline{X^{j-m+1} Y_{\text{вх}}^m} - \bar{X} (\overline{X^{j-m} Y_{\text{вх}}^m})], \text{ откуда}$$

$$R_{vz_{\text{вх}}} = \sum_{i=0}^{\ell} b_j \sum_{j=0}^{\ell} a_i b_j \left[\sum_{m=0}^j C_j^m (\overline{X^{i+j-m}}) - (\bar{X}^i) \sum_{m=0}^j C_j^m (\overline{X^{j-m} Y_{\text{вх}}^m}) \right].$$

В частности при $\ell = n = 2$ имеем:

$$R_{vz_{\text{вх}}} = a_1 b_1 [\overline{X^2} + R_{xy_{\text{вх}}} - \bar{X} (\bar{X} + \bar{Y}_{\text{вх}})] + a_1 b_2 [\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{\text{вх}}} + \overline{X Y_{\text{вх}}^2} - \bar{X} (X^2 + 2R_{xy_{\text{вх}}} + Y_{\text{вх}}^2)] + a_2 b_1 [\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{\text{вх}}} - X^2 (\bar{X} + \bar{Y}_{\text{вх}})] + a_2 b_2 [\overline{X^4} + 2 \overline{X^3 Y_{\text{вх}}} + \overline{X^2 Y_{\text{вх}}^2} - X^2 (X^2 + 2R_{xy_{\text{вх}}} + Y_{\text{вх}}^2)]. \quad (10)$$

Если в (10) $\bar{X} = \bar{Y} = 0$, то

$$R_{vz_{\text{вх}}} = a_1 b_1 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{вх}}}) + a_1 b_2 (\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{\text{вх}}} + \overline{X Y_{\text{вх}}^2}) + a_2 b_1 (\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{\text{вх}}}) + a_2 b_2 [\overline{X^4} + 2 \overline{X^3 Y_{\text{вх}}} + \overline{X^2 Y_{\text{вх}}^2} - \sigma_x^2 (\sigma_x^2 + 2R_{xy_{\text{вх}}} + \sigma_{y_{\text{вх}}}^2)].$$

Если законы распределения $X, Y_{\text{вх}}$ – нормальные, то $R_{vz_{\text{вх}}}$ будет иметь вид:

$$R_{y_{z\text{vblx}}} = a_1 b_1 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{vex}}}) + a_2 b_2 [3\sigma_x^4 + 6\sigma_x^2 2R_{xy_{\text{vex}}} + \sigma_x^2 \sigma_{y_{\text{vex}}}^2 + 2R_{xy_{\text{vex}}}^2 - \sigma_x^2 (\sigma_x^2 + 2R_{xy_{\text{vex}}} + \sigma_{y_{\text{vex}}}^2)] = a_1 b_1 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{vex}}}) + 2a_2 b_2 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{vex}}})^2.$$

Для $\ell = n = 2$, $\bar{X} = \bar{Y} = 0$ и условия независимости X и $Y_{\text{вх}}$ имеем выражение для дисперсии выходного сигнала датчика Холла:

$$\sigma_{y_{\text{vblx}}}^2 = \sigma_x^2 (a_1 - b_1)^2 + 2\sigma_x^4 (a_2 - b_2)^2 + \sigma_{y_{\text{vex}}}^2 [b_1^2 + 2b_2^2 (2\sigma_x^2 + \sigma_{y_{\text{vex}}}^2)];$$

$$R_{y_{\text{vblx}}} = (a_0 + a_1 \bar{X})^2 + a_2 \sigma_x^4 (3a_2 - 2b_2) + \sigma_x^4 [a_1 (a_1 - b_1) + 2a_2 (a_0 + a_1)],$$

где $j = 1, 2, \dots, n$; $a_1 = b_1$; $a_2 = b_2$; $\sigma_{b_1}^2 = \sigma_{b_2}^2$.

В данном случае будем иметь модель датчика Холла как одноканального звена с «гладкой» характеристикой (без тренда), приводимой к полиномиальной форме (8). Во всех вышеприведенных соотношениях a_i – величина входного сигнала датчика Холла; b_i – выходного сигнала при соответствующих $k_1(k+1)_i$ - измерениях.

При использовании соотношения (10) на практике следует провести оценку точностных параметров датчиков в динамике. В этом случае датчик, в первом приближении, рассматривается как блок с одним входом и одним выходом, работа которого описывается с помощью линейного оператора (2). В соответствии с данными табл. 1 погрешность на выходе датчика в любой момент времени t зависит не только от $x(t) + Y_{\text{вх}}(t)$, но и от предшествующих значений сигнала на выходе при условии, что случайные процессы $X(t)$ и $Y_{\text{вх}}(t)$ являются непрерывными и стационарными. Это условие позволяет использовать математический аппарат операционного исчисления в виде операторной передаточной функции [5]. Обозначая идеальную $W_u(j\omega)$ и реальную $W_p(j\omega)$ (ω - круговая частота) частотную передаточную функцию при $\bar{X} = 0$ и $\bar{Y}_{\text{вх}} = 0$, $\bar{Y}_{\text{vblx}}(t) = 0$ для значения сигнала (8), дисперсия на выходе будет иметь вид:

$$\sigma_{y_{\text{vblx}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_y(\omega) d\omega, \quad (11)$$

где $G_{y_{\text{vblx}}}(\omega)$ - энергетический спектр случайного процесса $Y_{\text{vblx}}(t)$.

Этот спектр выражается через характеристики сигнала на входе и реальную и идеальную передаточные функции. Из определения корреляционной функции (3) будем иметь [5]:

$$R_{y_{\text{вблх}}}(\tau) = R_{z_{\text{вблх}}}(\tau) + R_v(\tau) - R_{z_{\text{вблх}}v}(\tau) - R_{vz_{\text{вблх}}}(\tau). \quad (12)$$

Применяя теорему Винера – Хинчина [5] для левой и правой части равенства (12), имеем:

$$G_{y_{\text{вблх}}}(\omega) = G_{z_{\text{вблх}}}(\omega) + G_v(\omega) - G_{z_{\text{вблх}}v}(\omega) - G_{vz_{\text{вблх}}}(\omega), \quad (13)$$

где $G_{z_{\text{вблх}}v}(\omega)$ - взаимный энергетический спектр процессов $Z_{\text{вблх}}(t)$ и $V(t)$.

Процессы $Z_{\text{вблх}}(t)$ и $V(t)$ - стационарно связанные процессы. Согласно [5] имеем:

$$\begin{aligned} G_{z_{\text{вблх}}}(\omega) &= |W_p(j\omega)|^2 [G_x(\omega) + G_{y_{\text{вблх}}}(\omega) + G_{xy_{\text{вблх}}}(\omega) + G_{y_{\text{вблх}}x}(\omega)]; G_v(\omega) = \\ &= |W_u(j\omega)|^2 G_x(\omega); G_{vz_{\text{вблх}}}(\omega) = W_u(j\omega)W_p(-j\omega)[G_x(\omega) + G_{xy_{\text{вблх}}}(\omega)]; \\ G_{z_{\text{вблх}}v}(\omega) &= W_p(j\omega)W_u(-j\omega)[G_x(\omega) + G_{y_{\text{вблх}}x}(\omega)]. \end{aligned} \quad (14)$$

При подстановке (13) и (14) в (11) вычисляется выражение для дисперсии ошибки (погрешности) на выходе датчика.

Для датчиков серии ДБТ (табл. 1) величина $R_x(\tau)$ равна [2]:

$$R_x(\tau) = \sigma_x^2 \exp(-\alpha|\tau|) \quad (15)$$

и аддитивная погрешность, накопленная на предыдущих элементах (звеньях системы управления) $Y_{\text{вблх}}(t)$ с автокорреляционной функцией

$$R_{y_{\text{вблх}}}(\tau) = C^2 \delta(\tau), \quad (16)$$

где $\delta(\tau)$ - дельта-функция Дирака [5].

Идеальная передаточная функция $W_u(j\omega) = K_u$. Реальный датчик обладает инерционностью, поэтому он представляется аperiодическим звеном первого порядка $W_p(j\omega) = K_p / (1 + T_p j\omega)$. Из условия аддитивности процессов $X(t)$ и $Y_{\text{вблх}}(t)$ следует $R_{xy_{\text{вблх}}}(\tau) = R_{y_{\text{вблх}}}(\tau) = 0$ [2]. Косинус-преобразование Фурье [5] от R_x и $R_{y_{\text{вблх}}}$ определяет следующие значения параметров системы (T_p – постоянная времени):

$$\begin{aligned}
 G_x(\omega) &= \frac{2\alpha\sigma_x^2}{\alpha^2 + \omega^2}; G_{y_{ex}}(\omega) = C^2; \\
 \sigma_{y_{вых}}^2 &= \frac{\alpha\sigma_x^2 K_p^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(1 + \omega^2 T_p^2)(\alpha^2 + \omega^2)} + \frac{C^2 K_p^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(1 + \omega^2 T_p^2)} + \\
 &+ \frac{\alpha^2 \sigma_x^2 K_u^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{2\alpha\sigma_x^2 K_p K_u}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)(1 + \omega^2 T_p^2)} = \\
 &= \frac{\sigma_x^2 K_p (K_p - 2K_u)}{1 + \alpha T_p} + \frac{C^2 K_p^2}{2T_p} + \sigma_x^2 K_u^2.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Из (17) следует, что дисперсия погрешности возрастает с ростом величин σ_x^2 и C^2 , которые характеризуют мощность процессов $X(t)$ и $Y_{ex}(t)$. Дисперсия погрешности на выходе датчика растет с ростом дисперсий истинного значения $X(t)$ и $Y_{ex}(t)$. При $K_u = K_p$ и $T_p = 0$ (в случае идеального датчика) дисперсия погрешности на выходе равна $C^2 = K^2 \sigma_{y_{ex}}^2$.

Оптимальное значение реального коэффициента усиления датчика серии ДБТ, обеспечивающее минимум дисперсии погрешности на выходе датчика при фиксированном значении T_p :

$$K_{p.opt} = \frac{K_u \sigma_x^2}{1 + \alpha T_p} \left(\frac{\sigma_x^2}{1 + \alpha T_p} + \frac{C^2}{2T_p} \right)^{-1}. \tag{18}$$

Если дисперсия погрешности на входе стремится к нулю $C^2 \rightarrow 0$, то $K_{p.opt} = K_u$. В реальных условиях $C^2 \neq 0$ и $T_p \neq 0$ оптимальное значение K_p реализуется только при условии $K_p > 2K_u$.

Для практических расчетов (в соответствии данными табл. 1 и [1,2]) принимаются значения $C^2 \approx (5-10) \text{ кА}^2$; $\alpha = 0,05$; $T_p = 0,001 \text{ с}$; $\sigma_x^2 \approx 0,5 \%$; $K_u = 10$.

В заключение следует отметить: 1) на основе существующей приборной базы для измерения сильных токов рекомендуются информационно-сенсорные подсистемы на датчиках Холла и Роговского; 2) применение датчиков Холла и Роговского позволяет реализовать дифференциальные режимы сильноточных измерений по сравнению с существующими системами интегрального типа; для верификации информационной стохастической картины «короткой

II міжнародна науково-технічна конференція

сети» следует проводить измерения во всех токоподводах одновременно (по 18 каналам).

The theoretical description and mathematical research of the processes of qualitative characteristic formation of a touch subsystem of local adaptive system of automation of technological processes on the basis of greater current gauges by Hall and Rogovsky is lead. With the reference to conditions of metallurgical graphitization furnaces of graphitated electrodes with the capacity of (6000 - 10000) kVA mathematical models of a stochastic error of their dynamic functioning in the structure of a command-information at working currents (10 - 100) kA are received.

Литература

1. Расщепляев Ю.С., Фандиенко В.Н. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления. – М.: Энергия, 1981. – 144 с.
2. Четвериков В.Н., Баканович Э.А. Стохастические вычислительные устройства систем моделирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
3. Боровиков В.П. СТАТИСТИКА: искусство анализа данных на компьютере. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.
4. Дьяконов В.П. МATHCAD 8/2000 : Специальный справочник. – СПб.: 2001. – 592 с.
5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1967. – 780 с.

Р.Пилипчук¹; В.Щиренко²

¹*Тернопільський Державний технічний університет
імені Івана Пулюя*

²*ОСП Корпорація "Ватра", Тернопіль*

ПРОБЛЕМА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

Розглянуто проблеми енергозбереження в освітлювальних установках та методи їх вирішення.

Проблема енергозбереження в освітлювальних установках всіх країн світу, не тільки передових, але й таких, що розвиваються, набула за останні роки особливого значення. При цьому від успіхів у вирішенні цієї проблеми багато в чому залежить майбутнє людської цивілізації не тільки в зв'язку з поступовим вичерпуванням горючих копалин, які ідуть на вироблення електроенергії, але й із-за швидкого забруднення навколишнього середовища і викидами в атмосферу шкідливих речовин (диоксидів вуглецю і сірки, а також ртуті), утворених в результаті згоряння палива при виробленні електроенергії. Відомо, що при виробленні на теплових електростанціях (працюючих на вугіллі) 1 кВт год. електроенергії в атмосферу викидається біля 1 кг CO₂. Проблема в значній мірі пов'язана також з неперервним збільшенням масштабів освітлювальних установок (ОУ) і використанням в них електроенергії.

Доля електроенергії, яка витрачається в ОУ різних країнах світу, показана в таблиці 1. Як видно на освітлення направляється до 20% всієї електроенергії.

Таблиця 1

Країна	E_Σ	E_{пром.}	E_{житл.}	E_{адм.}
Україна	15	33	32	35
США	20	11	23	66
Німеччина	10	32	25	43
Японія	15	55	27	18
Індія	17	9	28	60
Бразилія	17	2	25	44

По оцінках метеорологів, глобальне потепління на нашій планеті розпочалось приблизно в 1978 р. і викликане так званим "парниковим ефектом" - накопиченням в атмосфері "парникових" газів, в першу чергу двоокису вуглецю (CO₂). Основний вклад в загальний об'єм викидів CO₂ припадає на частку вугілля і інших видів палива, які згоряють на теплових електростанціях (ТЕС). Світові

II міжнародна науково-технічна конференція

витрати електроенергії на штучне освітлення на початку 2002 року спричиняють щорічні викиди в атмосферу до 300 млн. тон CO₂. По прогнозах американського Worldwatch Institute, до 2010 р. ця цифра може збільшитись до 450 млн. т/рік.

Стабільність температури навколишнього середовища є одним із основних умов існування життя. Головними механізмами, які забезпечують стабільність температури на поверхні Землі, є випромінювання Сонця і парниковий ефект.

Явище “парникового ефекту” заключається в тому, що після відбивання від поверхні Землі частина сонячної енергії не повністю розсіюється в космічному просторі. Значна частина теплового випромінювання утримується парниковими газами, які входять в склад атмосфери Землі. Завдяки цьому температура підвищується на 33°C. Без парникового ефекту температура біля поверхні Землі не перевищувала б -18°C, а це означає відсутність умов для життя, тому що вода на земній поверхні існувала б тільки у вигляді льоду.

Багаторічний моніторинг виявив яскраво виражену тенденцію до підвищення середньорічної температури. Більшість спеціалістів зв'язують це явище з підвищенням концентрації газів, яке прийнято називати парниковими. Антропогенні викиди CO₂, CH₄ і N₂O, які відносяться до групи парникових газів, здатні в значній степені збільшити парниковий ефект. Результатом цього може бути підвищення середньорічної температури на протязі XXI століття на 2...5°C. Цей процес буде здійснюватися рівномірно. В одних регіонах температура буде мінятися швидше, в інших – повільніше. Результатом цього буде зміна циркуляції вітрів і перерозподіл опадів. Це, в свою чергу, приведе до збільшення вологості в одних регіонах і до засух в інших. Зміна температури, кількості опадів і рівня моря відобразиться на життєдіяльності людей. Особливо суттєво вплив глобального потепління буде відчуватися в прибережних зонах. Деякі з них просто зникнуть. Значно збільшиться ерозія ґрунту, більш частішими стануть повені, затоплення прибережних територій, збільшиться кількість зволжених земель. В сільському господарстві виникне необхідність в іригаційних міроприємствах, зміниться врожайність і кількісний склад культур, а це, в свою чергу, відобразиться на тваринництві. В енергетичному секторі найбільш вразливою буде гідроенергетика.

Шляхи вирішення проблем: зменшення викидів і збільшення поглинання парникових газів.

Відповідні міжнародні і національні організації розробили цілий ряд заходів, направлених на запровадження енергоефективних технологій, в тому числі реалізацію першечергових кроків по економії електроенергії в установках внутрішнього і зовнішнього освітлення.

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Міжнародне енергетичне агенство (IEA) і Товариство економічного співпраці і розвитку (OECD), разом з міжурядовим договором на Всесвітній конференції Earth Summit про різке скорочення забруднення атмосфери, разом з Європейським міністерством навколишнього середовища запропонували програму, здійснення якої може знизити витрати електроенергії на освітлення в середньому на 60%. До числа реальних заходів підвищення енергоефективності ОУ і, відповідно, зниження викидів CO₂ під час роботи теплоелектростанцій відносяться перш за все:

1) широке впровадження в ОУ житлових і громадських споруд КЛЛ шляхом прямої заміни ними ЛР;

2) перехід в ОУ промислових і громадських споруд на ОП з лінійними ЛЛ нового покоління з високою світловіддачею (≥ 100 лм/Вт);

3) використання електронних ПРА замість електромагнітних в світильниках з ЛЛ і КЛЛ;

4) автоматизований контроль і керування освітленням в залежності від інтенсивності природнього світла і за допомогою датчиків присутності;

5) більш ефективне використання природнього світла в світлий час доби за рахунок застосування активних світло-перерозподіляючих елементів на світлопройомах (як бокових, так і стельових).

Ось деякі, досить цікаві результати розрахункових прогнозів про економічні і екологічні вигоди масового застосування КЛЛ в побуті країн Західної Європи (по даних Philips Lighting и Osram). Якщо в кожному із – 145 млн. одиниць домашніх господарств країн Європейського Союзу 3 шт. ЛР по 60 Вт будуть замінені еквівалентними по світловому потоку трьома КЛЛ по 11 Вт з вмонтованими електронними ПРА, то при середньому напрацюванні 4 г/добу можна отримати річну економію електроенергії, еквівалентну ліквідації на європейському континенті десяти теплоелектростанціям потужністю 600 МВт кожна. По розрахунках фірми Osram, заміна - 35 млн. домашніх господарств Німеччини тільки однієї ЛР 60 Вт на КЛЛ 11 Вт дозволила б за строк служби в 10 тис. год зекономити близько 17,5 млн. кВт·год., що рівнозначне зниженню в ТЕС витрат кам'яного вугілля на 5 млн. т/рік і, відповідно, скороченню викидів CO₂.

Заслужують уваги і оцінки спеціалістів Siemens AG відносно перспективних результатів широкого впровадження високочастотних електронних ПРА при реконструкції старих і облаштуванні нових внутрішніх ОУ з ЛЛ. Якщо б всі ЛЛ, які експлуатуються в спорудах Німеччини (більше 300 млн. шт.), працювали з електронним ПРА (замість електромагнітних), то економія електроенергії склала приблизно 6,5 млрд. кВт·год./рік. Цей потенціал еквівалентний річному

II міжнародна науково-технічна конференція

споживанню 2 млн. т вугілля в звичайних ТЕС або річному виробленню електроенергії на німецькій АЕС Isar I. Така економія електроенергії дозволила б зменшити викид CO₂ орієнтовно на 6 млн. т щорічно! Це послужило б суттєвим вкладом в справу захисту навколишнього середовища, якщо врахувати, що в Німеччині на освітлення витрачається близько 50 млрд. кВт·год./рік (9 – 10% від загального об'єму виробленої електроенергії), а ТЕС, які виробляють електроенергію, викидають в атмосферу більше 27 млн. т CO₂ в рік.

В рамках здійснення енергозберігаючої програми SAVE Європейська енергетична комісія провела дослідження по виявленню першочергових заходів по економії електроенергії на штучне освітлення. При цьому було виявлено, що всі ОУ з ЛЛ в Західній Європі споживають щорічно 10 млрд. кВт·год (тВт·год), що рівне загальній річній витраті електроенергії в Бельгії і Португалії на всі промислові і господарські потреби.

Переважні області застосування освітлювальних приладів з ЛЛ – це виробничі, адміністративно-управлінські, учбові, лікувальні заклади, музеї і ряд інших об'єктів. Звичайно, що зниження власних витрат ПРА в світильниках, які застосовуються в великих кількостях для загального освітлення приміщень, створює оптимістичні передумови для зменшення витрат електроенергії в ОУ з ЛЛ.

Енергетична комісія внесла в Європейський парламент пропозиції по регламентації вимог до підвищення енергоефективності ПРА для ЛЛ на базі класифікації, розробленої CELMA – Європейської асоціації виробників освітлювальних приладів. Метою цієї акції є поетапне, протягом декількох років, скорочення обсягів випуску і застосування електромагнітних ПРА (як зі стандартним, так і з пониженим рівнем витрат) і широкомасштабне впровадження в нові і системи освітлення світильників, що модернізуються, оснащеними енергоекономічними електронними ПРА. Якщо ці пропозиції будуть реалізовані, то до 2020 р. в регіоні Європейського Союзу в установках внутрішнього освітлення з ЛЛ можна буде розраховувати на економію до 12 млрд. кВт·год/рік і зниження емісії CO₂ на ТЕС в атмосферу приблизно на 6 млн.т/рік. Розрахунки показали, що реально економія електроенергії, яка досягається в установках внутрішнього освітлення при широкому використанні нових світильників з ЛЛ високої світловіддачі і електронних ПРА, світло регулюючих систем і ефективних методів природнього освітлення може скласти 75%; це відповідно обумовить зниження емісії CO₂ в 2 рази.

Експерти фірми Philips Licht переконливо довели, що при реконструкції всіх ОУ промислових і громадських споруд в Німеччині з використанням ЛЛ з підвищеною світловіддачею (90 – 100 лм/Вт) і електронних ПРА, а також ОП з ККД \geq 70% можна в середньому добитися зниження питомої потужності освітлення з 25 до 10 Вт/м² без

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

погіршення його кількісних і якісних світлотехнічних параметрів. Це дозволило б реально розраховувати на економію електроенергії більше 2 млрд. Євро (діючий в Німеччині тариф на промислову електроенергію рівний 0,078 Євро/кВт год). Кількість щорічно зекономленого кам'яного вугілля на ТЕС при цьому склало б 8,5 млн. т, а це значить, що при економії, яку отримуємо від скорочення питомої потужності ОУ в 2,5 рази об'єм викидів CO₂ в атмосферу знижується на 25,4 млн. т/рік.

Характерно, що в Україні, на відміну від промислово розвинутих країн Заходу, має місце надмірне споживання електроенергії у промисловості і водночас зниження її норми на освітлення квартир. Останній фактор, зумовлений не достатньою поки що забезпеченістю населення житловою площею та відносно низькими доходами населення. І все ж соціальна невлаштованість, хочеться вірити, явище швидкоминуче, не настільки принципове, щоб стримувати поступ світлотехніки. Тим паче, що саме такий прогрес обіцяє народному господарству неабиякий економічний вигравш. Судіть самі. Перехід від світильників із традиційними лампами розжарювання (середня потужність кожного 120 Вт) на енергоекономні дасть можливість знизити встановлену потужність і споживану електроенергію не менше, як на 70 (!) процентів. При оновленні хоча б п'ятої частини світильників із лампами розжарювання до 2006 року, що цілком реально, сумарне зниження потужності становитиме більше 3 млн. кВт. Таким чином щорічна економія енергії сягатиме понад 6 млрд. кВт/год.

На даний час стан освітлення в Україні може бути розцінений як критичний. Ось, що, на підтвердження сказаного, говорить всезнаюча статистика. Системи освітлювальних установок в понад 60% виробничих площ промислових будівель, 75% приміщень адміністративних закладів, у тому числі понад три четверті шкіл та інших навчальних приміщень, біля дев'яносто відсотків зовнішнього освітлення взагалі не відповідають нормативним вимогам. Основними причинами такого становища є дефіцитність економних джерел світла та освітлювальних приладів, експлуатація фізично застарілих виробів. Крім цього більшість вітчизняних аналогів за своїм технічним рівнем ще поступаються виробам передових закордонних фірм.

Нині для потреб освітлення в народногосподарському комплексі України використовується понад 260 млн. штук приладів, які споживають електроенергії приблизно 14% від загального виробництва. Парк світильників України (в шт.) приведений на рис. 1. Парк світильників з різними джерелами світла в Україні і за кордоном приведений на рис. 2. Однак ці цифри аж ніяк не свідчать про максимальну ефективність освітлення. Швидше - навпаки.

II міжнародна науково-технічна конференція

Через низьку ефективність джерел світла і світлових приладів питома вага витрат електроенергії на виготовлення світлової енергії в 1,5 раза вища, ніж у західних країнах.

Структура парку світильників з різними джерелами світла в Західній Європі (в %) приведена на рис. 3.

Парк світильників в різних галузях народного господарства приведений на рис. 4.

Основними причинами такого стану є:

1) використання малоєфективних світильників оснащених високовитратними лампами розжарення;

2) експлуатація фізично зношених приладів, в яких відбивачі та розсіювачі понизили свої оптичні характеристики.

Нераціональність використання електроенергії пов'язана насамперед із тим, що велика група світильників для промислового освітлення має низький коефіцієнт корисної дії і малоєфективний розподіл сили світла. Для вирішення енергетичних і екологічних проблем пов'язаних з електричним освітленням, необхідно значно підвищити ефективність використання електроенергії в ОУ.

Рішення цих проблем, на наш погляд зводиться до вирішення чотирьох основних задач.

1. Удосконалення засобів освітлення за рахунок застосування прогресивних СП.

2. Удосконалення способів освітлення за рахунок впровадження нових принципів проектування й нормування освітлення.

3. Покращення експлуатації ОУ.

4. Стимулювання споживачів електроенергії за використання енергозберігаючих джерел світла.

З наведених вище проблем з економії електроенергії перша є найважливіша, яка створює базу для вирішення всіх інших. Вирішувати цю задачу необхідно двома шляхами, або точніше у два етапи.

Перший етап - заміна в освітлювальних установках світильників із лампами розжарювання (ЛР) на світильники з газорозрядними лампами, в першу чергу на люмінесцентні (ЛЛ) і газорозрядні лампи високого тиску (ГЛВТ, ДРЛ, ДРІ, ДНаТ). Адже, середня економія електроенергії, при заміні ЛР на ЛЛ складає - 64%, а ЛР на ГЛВТ складає - 70%. Тому при проектуванні нових ОУ, або реконструкції діючих, вибір джерел світла повинен здійснюватись, як правило, на основі техніко-економічного порівняння варіантів освітлення конкретного об'єкта з урахуванням всіх капітальних та експлуатаційних затрат.

Проте, враховуючи стійку тенденцію випереджуючого зростання ціни на електроенергію в порівнянні з ростом цін на

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

світлотехнічні вироби, можна сміливо сказати, що економія електроенергії буде вирішальним фактором у визначенні ефективності ОУ. Оскільки світловіддача газорозрядних ламп в 3-6 разів вища ніж ЛР, а строк служби в 8-10 разів, то проектним організаціям необхідно розширювати й впроваджувати нові зони використання газорозрядних ламп високого тиску. Заміна світильників із ЛР на світильники з ЛЛ і ГЛВТ при наших умовах окупить себе на протязі року, при цьому значно збільшиться освітленість робочих місць. Економія електричної енергії за рахунок заміни джерел світла приведена на рис. 5.

Другий етап - це розробка, освоєння та застосування в ОУ нових СП з високо інтенсивними енергоекономними лампами, ефективним світлорозподіленням, ПРА з пониженими втратами і з електронним ВЧ ПРА.

При використанні ефективних засобів освітлення витрати електроенергії можна знизити майже вдвічі. Основні напрями вирішення цього важливого завдання полягатимуть у вдосконаленні засобів і методів освітлення та покращенні експлуатації освітлювальних приладів.

Удосконалення засобів освітлення включає передусім роботу над такими важливими проблемами, як:

- 1) підвищення коефіцієнта корисної дії;
- 2) стабілізація світлового потоку джерел світла в процесі служби;
- 3) розробка, виробництво і використання світлових приладів з ефективним світлорозподілом;
- 4) стабілізація характеристик освітлювальних приладів під час експлуатації.

Світильники, які виготовляються, класифікуються за світлотехнічними параметрами і конструктивними характеристиками. Вибираючи виріб, необхідно врахувати його конструктивне виконання, світлорозподіл, яскравість та економію. Від правильного вибору світильника та його розміщення залежить якість освітлення у приміщенні: його рівномірність, розподіл яскравості по внутрішніх поверхнях, ступінь прямого й відбитого блиску та затінення робочого місця, оптимальне тінеутворення.

Правильний вибір освітлювальних приладів за світлорозподілом дає мінімальні затрати електроенергії. Можлива її економія внаслідок використання світильників з ефективним для заданих умов світлорозподілом складає 15–20 відсотків при малих висотах приміщення і 20 - 40 відсотків - при високих. Так, при заміні дифузних люмінесцентних світильників на дзеркальні, можна зекономити до 30% електроенергії. Економія електроенергії при використанні ОП з ефективними КСС приведена на рис. 6/

II міжнародна науково-технічна конференція

Згідно результатів аналізу проведених на замовлення Департаменту енергетики США випливає, що від 64 до 71% електроенергії, яка споживається ОП громадських будівель можна зекономити, якщо використати всі відомі сучасні технології підвищення ефективності освітлення.

Важливим завданням є законодавче закріплення енергозберігаючих вимог до світлотехнічних виробів в стандартах, нормах і правилах.

Крім норм штучного освітлення з традиційною регламентацією освітленості стандартами DIN (Німеччина), ANSI/IESRPS3, ASHRAE/IES 90/1-89 (США) діють стандарти з енергозбереження, де критерієм оцінки раціонального енергоспоживання є гранично допустима питома потужність ОП (Вт/м²).

Максимально допустима потужність, що споживається внутрішнім освітленням, визначається двома методами:

1. Метод обліку площі будинку. Обчислюється потужність, що споживається ОП всього будинку. Для кожної категорії будинків (адміністративних, торгових, житлових):

$$P_{гр.б} = S(m^2) \times \lambda_б(Вт/м^2),$$

де $\lambda_б$ – гранично допустима питома потужність ОП для даної категорії будинків;

S – площа будинку.

2. Метод обліку окремих приміщень.

Гранично споживана ОП будинку потужність обчислюється з використанням індивідуальних значень $\lambda_{пр}$ для кожного приміщення всередині будинку:

$$P_{гр.пр.} = S(m^2) \lambda_{пр.} (Вт/м^2)$$

де $P_{гр.пр.}$ – гранично допустима потужність, що споживається ОП приміщення;

$\lambda_{пр.}$ – гранично допустима питома потужність для даного типу приміщень.

Значення $\lambda_{пр.}$ нормується для кожного типу приміщення. Для одержання гранично допустимої потужності ОП будинку сумується $P_{гр.пр.}$ всіх його приміщень.

$$P_{гр.б} = \sum P_{гр.пр.}$$

Законодавче введення обмежень максимальних значень питомої потужності стимулює використання найбільш ефективних джерел світла, світлових приладів і методів освітлення.

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

При цьому, оскільки збережені вимоги до нормованої освітленості, неминучою є регламентація світлової віддачі джерел світла, які використовуються, коефіцієнта корисної дії світильника, ефективності комплексу джерело світла - ПРА.

Так в діючому в США стандарті ASHRAE/IES90.1 з ефективного використання електроенергії на освітлення, крім питомих встановлених потужностей для різних приміщень приведені рекомендації щодо способів освітлення і типів самих освітлювальних приладів. Все це дозволяє здійснювати контроль енергозатрат в освітлювальних установках вже на стадії експертизи проектів.

Необхідно запровадити систему оцінки світильників за їх енергетичною ефективністю. Для цього потрібно ввести коефіцієнт енергетичної ефективності $K_{\text{еф.с.}}$, який визначається відношенням повного світлового потоку світильника до споживаної потужності. Цей показник враховує всі елементи системи: арматуру, джерело світла, ПРА.

Коефіцієнт енергетичної ефективності оцінюється за наступним співвідношенням:

$$K_{\text{еф.с.}} = \frac{\Phi_{\text{л}} * K_{\text{еф.б}} * \text{ККД}}{P_{\text{с}}},$$

де $\Phi_{\text{л}}$ – світловий потік ламп,
 $K_{\text{еф.б}}$ – коефіцієнт ефективності ПРА,
ККД – коефіцієнт корисної дії,
 $P_{\text{с}}$ – споживана потужність.
 $K_{\text{еф.с.}}$ на відміну від ККД враховує ефективність комплексу “лампа-ПРА” і має розмірність лм/Вт.

Коефіцієнт ефективності ПРА $K_{\text{еф.б}}$ знаходиться, як відношення світлового потоку контрольної люмінесцентної лампи з дослідним баластом до світлового потоку цієї ж лампи із взірцевим баластом.

ККД світильника вимірюється у фотометричній кулі згідно п.4.9.4 ГОСТ 17677.

Споживана потужність світильника вимірюється безпосередньо ватметром або методом ватметра-амперметра.

Тоді

$$P_{\text{с}} = U * I * \cos\phi,$$

де U – напруга мережі живлення,
 I – струм, що споживається від мережі,
 $\cos\phi$ – коефіцієнт потужності світильника.

Для класифікації по значеннях $K_{\text{еф.с.}}$ світильники випробовуються стандартними фотометричними процедурами в акредитованих лабораторіях.

II міжнародна науково-технічна конференція

Введення в рекомендації класифікацій світильників за їх $K_{\text{еф.с.}}$ дозволить відсікти найбільш неефективні світильники від широкого використання в ОУ.

Законодавче введення обмежень максимальних значень питомої потужності стимулює використання найбільш ефективних джерел світла, світлових приладів і методів освітлення. Це дозволить зекономити до 60 % електроенергії, що використовується на освітлення.

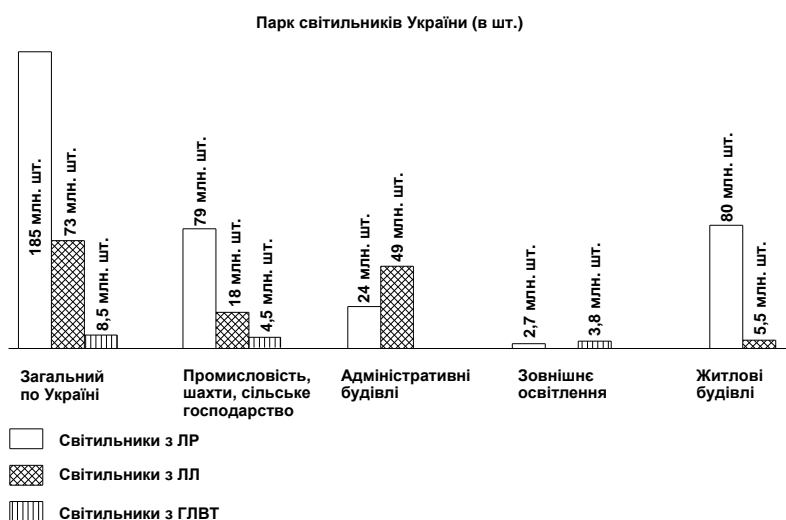


Рисунок 1

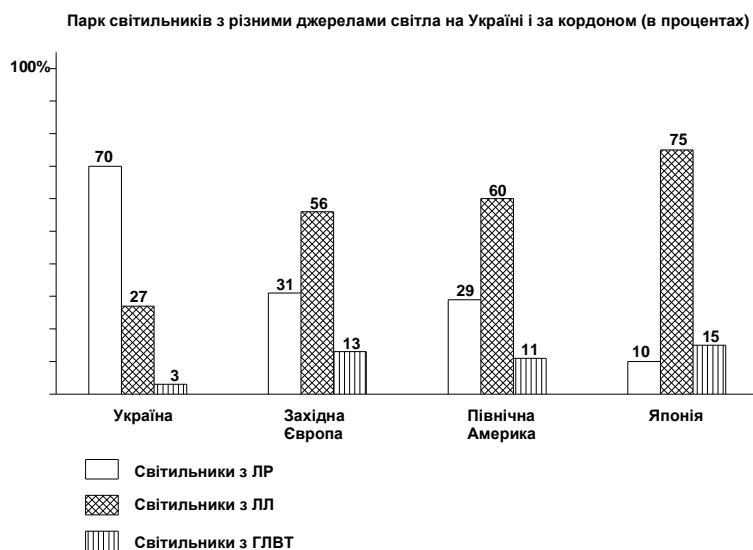


Рисунок 2

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"



Рисунок 3



Рисунок 4

II міжнародна науково-технічна конференція

Економія електроенергії за рахунок переходу на більш ефективні джерела світла

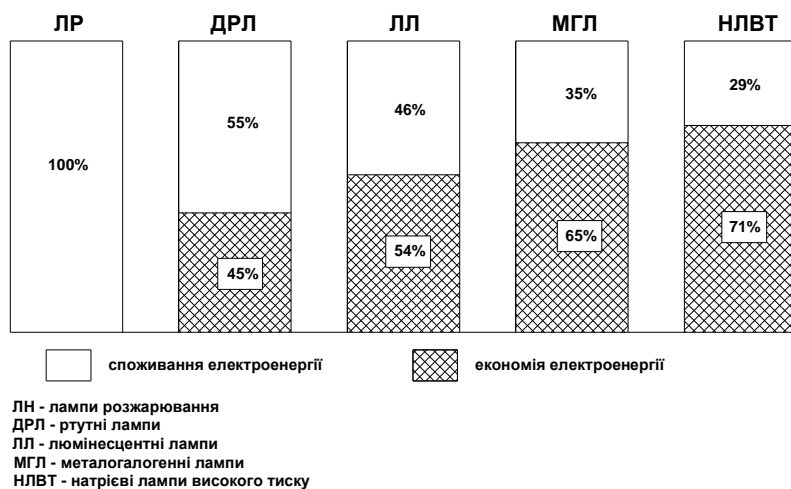


Рисунок 5

Економія електроенергії при використанні освітлювальних приладів з ефективними КСС

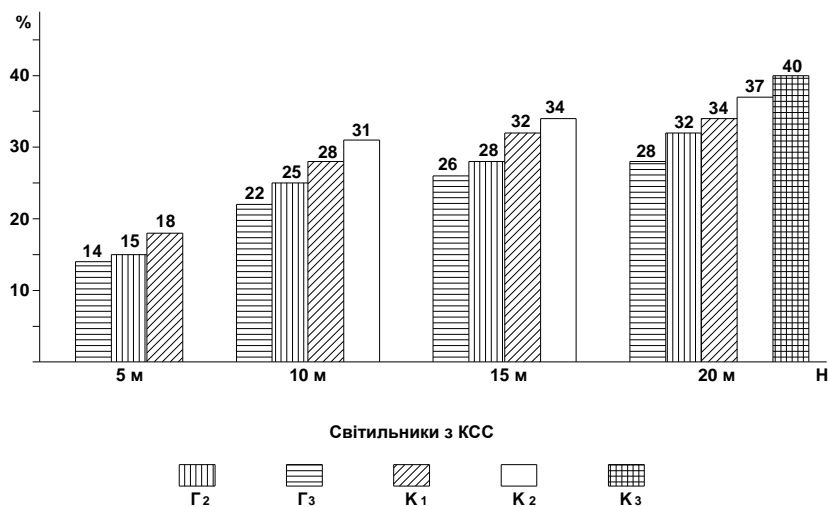


Рисунок 6

Я.Довгий, І.Маньковська, С.Тернавська

Львівський державний університет ім. Івана Франка

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ “ЗЕЛЕНОГО” GaP - СВІТЛОДІОДА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КРАЙОВОГО ПОГЛИНАННЯ ТА ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДБИВАННЯ

При температурі 77.4 К проведено вимірювання спектра рекомбінаційного випромінювання “зелених” GaP-світлодіодів. Послаблення світлового потоку внаслідок крайового поглинання всередині діода, яке у зеленій ділянці спектра є для легованого фосфіду галію досить великим, а також з причини повного внутрішнього відбивання, зумовленого великим показником заломлення GaP, призводять до суттєвого спотворення спектра при виході з випромінювача. Редукція до неспотвореного (тобто власного або внутрішнього) рекомбінаційного спектра, проведена з урахуванням зазначених факторів, дає змогу визначити реальні параметри відповідних квантових переходів та більш адекватно з’ясувати механізми рекомбінації.

Вступ

Рекомбінаційні спектри люмінесценції світлодіодів (S-діодів) та лазерних діодів (L-діодів) зазнають суттєвих трансформацій перед виходом випромінювання назовні діода. У зв’язку з цим відтворення (редукування) неспотворених спектрів внутрішнього (власного) рекомбінаційного випромінювання з урахуванням багатьох, як фізичних, так і конструктивно-технологічних факторів є актуальною задачею.

У даній праці зроблено спробу редукції спектра випромінювання “зеленого” (тобто такого, що випромінює в зеленій ділянці спектра) GaP-світлодіода з метою більш точного з’ясування механізмів рекомбінації носіїв в області *p-n*-переходу та визначення відповідних параметрів квантових переходів.

Досліджувані світлодіоди характеризуються спектром випромінювання, основний максимум якого близький до максимуму функції чутливості людського ока. Тому, окрім широких застосувань у пристроях оптичної індикації, світлотехніки та електроніки, ці мініатюрні випромінювачі мають перспективу і для метрології як тестові джерела випромінювання видимого діапазону. Останнім часом спеціалістам фірми Nichia Chemical (Японія), які спиралися на результати досліджень та розробок професора Миколи Голоняка (Іллінойський університет, США), вдалося розробити новий тип ефективних “зелених” світлодіодів на основі гетероструктурних композицій $A^{III}B^V$ з квантовими ямами [1].

Експеримент

Випромінювачем був “зелений” GaP – світлодіод напівсферичної конфігурації (див. рис.1) з порівняно високим зовнішнім коефіцієнтом виходу випромінювання (~0,6%) та світловіддачею близько 0,6 лм/мВт. Товщина шару p - n -переходу становила $h \cong 250$ мкм. Вихід випромінювання – через n -область. Площина p - n -переходу паралельна до кристалографічної площини (111). Омічні контакти мали діаметр $d \cong 120$ мкм і покривали близько 15% поверхні p - n -структури. Концентрація основної легуючої домішки азоту в епітаксіальних шарах $n_n \cong 1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, дифузійна довжина неосновних носіїв $L \cong 7$ мкм. Показник заломлення GaP у спектральній області основного піка випромінювання ($\lambda \cong 570$ нм) $n_2 \cong 3,44$, а показник заломлення епоксидного покриття $n_1 \cong 1,56$. Коефіцієнт пропускання поверхні з епоксидним покриттям $T \cong 0,86$.

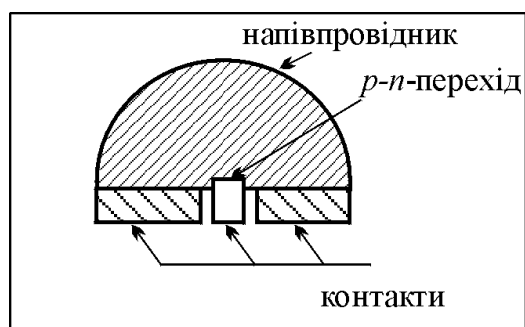


Рис.1. Конфігурація досліджуваного S-діода.

Потужність S-діода при кімнатній температурі дорівнювала $2,5 \cdot 10^{-5}$ Вт, сила світла близько 0,4 кд.

Спектри випромінювання при різних величинах струму інжекції (~2...20 мА) записували на автоматизованій спектрофотометричній установці КСВУ-12 (рис.2), при тому використовували стабілізований блок живлення типу Б5-47. Пряма напруга – від 1,2 до 2,0 В.

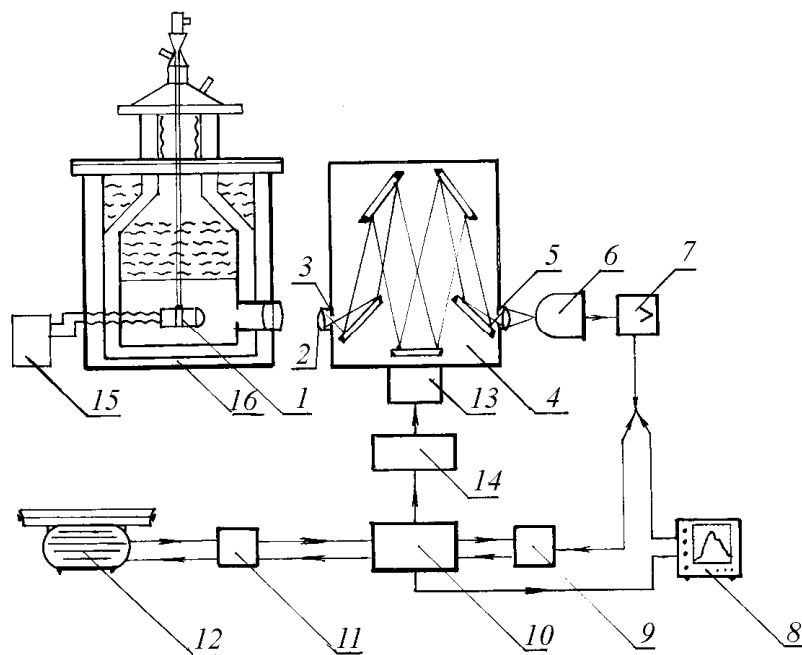


Рис.2. Схема автоматизованої спектрофотометричної установки: 1 – S-діод; 2 – вхідна лінза; 3 – вхідна щілина монохроматора; 4 – монохроматор; 5 – вихідна щілина монохроматора; 6 – фотокатод приймача світла; 7 – підсилювач постійного струму; 8 – самописець; 9 – цифровий вольтметр; 10 – пристрій вводу-виводу; 11 – обчислювальний пристрій; 12 – записуючий пристрій; 13 – кроковий двигун; 14 – блок управління; 15 – стабілізований блок постійного струму Б5-47; 16 – криостат.

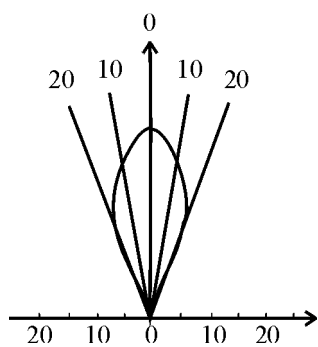


Рис.3. Індикатриса випромінювання "зеленого" GaP-світлодіода.

S-діод прикріплювали до штока азотного криостата, у верхній частині якого був лімб для кутових відліків. Типова індикатриса випромінювання досліджуваних світлодіодів напівсферичної конфігурації показана на рис.3. Спектри записували в геометрії досліду, коли реєстрований світловий потік був максимальним. Режим запису для кожного циклу вимірювань (наприклад, струмові залежності при $T=77,4$ К) був фіксований: ширина щілини монохроматора – 0,05 мм; дифракційна ґратка – 1200 штр./мм; фотопомножувач – ФЕП-100, напруга на фотопомножувачі – $U=1,2$ кВ; швидкість сканування – 100 нм/хв.; крок сканування – 0,1 нм.

При повторних вимірюваннях результати добре відтворювалися.

**Рекомбінаційний спектр при 77,4 К
та енергетична структура GaP**

Спектр випромінювання легованих азотом GaP-світлодіодів, вимірний нами при азотній температурі, зображено на рис.4. Основна його структура пов'язується з домішкою азоту. Найбільш інтенсивним є вузький А-пік з фононними повтореннями.

Як відомо [2], випромінювальна рекомбінація носіїв, близька до міжзонної, подібно до крайового поглинання у напівпровідниках, суттєво залежить від характеру зонної структури кристала, предусім від того, як взаємно розташовані екстремуми актуальних зон у **k**-просторі. Детальні оптико-спектральні дослідження показали, що фосфід галію є непрямоzonним напівпровідником (див. рис.5). Саме у цьому кристалі в

Структура спотережуваного спектра “зеленого” GaP-світлодіода при
T=77,4 К

λ , нм	E, eV	$E_A - E$, меВ	Інтерпретація
573.1	2.1634	0	безфононна А-смуга
581.5	2.1322	31.2	А- ТА
587.0	2.1121	51.1	А-LO
593.9	2.0876	75.8	А-(LO+ТА)
600.4	2.0650	98.4	А-2LO

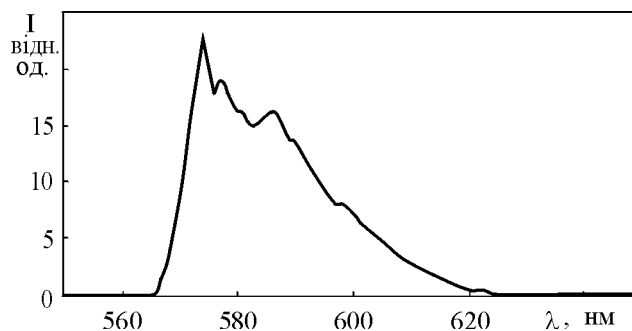


Рис.4. Спектр випромінювання “зеленого” GaP-світлодіода при 77,4 К.

1965 р. вперше було виявлено так звані ізоелектронні екситонно-домішкові пастки [3], що мають незрівнянні переваги як активатори люмінесценції у непрямоzonних матеріалах. Таким активатором у випадку кристала GaP є домішка азоту.

У разі легування фосфіду галію ізоелектронною домішкою азоту маємо унікальний збіг декількох сприятливих обставин: велика сила осцилятора f та мала глибина залягання домішкового рівня E_x . Крім

того, є можливість досягти високих концентрацій активатора ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) без суттєвих структурних порушень ґратки та зміни концентрації носіїв. Цей збіг заслуговує детального обговорення.

На сьогодні достеменно експериментально встановлено, що симетрія мінімуму зони провідності в GaP залежить від того, в якому вузлі (Ga чи P) знаходиться донорна домішка. Азотна домішка в ґратці GaP заміщує фосфор, тобто відповідний донорний рівень, локалізований біля найнижчого мінімуму зони провідності, що відповідає точці X зони Бріллюена.

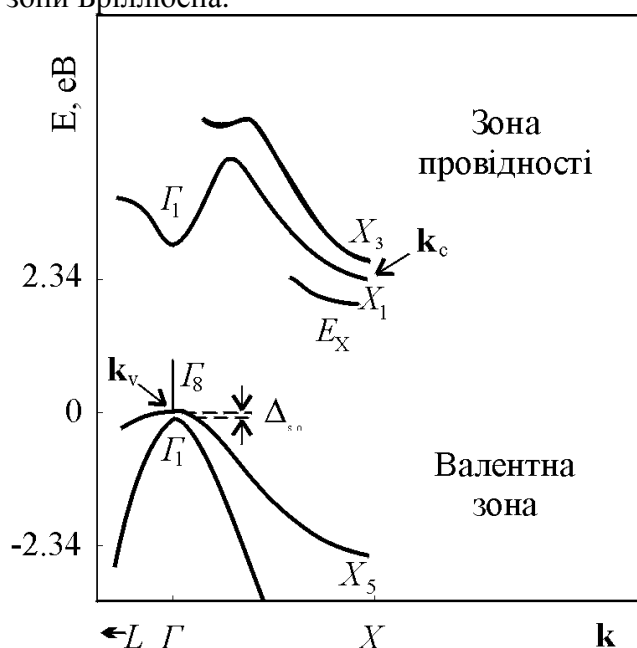


Рис.5. Зонна структура GaP.

Чому в GaP:N уможливується інтенсивна випромінювальна рекомбінація при $h\nu \sim E_g$ (тобто в зеленій ділянці спектра) не лише при низьких, але й при кімнатній температурі? (На рис.6 показано записаний нами спектр випромінювання досліджуваного S-діода при кімнатній температурі). Адаже жодна інша домішка в цьому матеріалі (GaP) у зеленій ділянці спектра не випромінює. Саме у зв'язку з цією специфікою S-діодів на структурі GaP:N, а також з причини визначальної ролі екситонних процесів (непрямі екситонно-домішкові комплекси), що актуальні навіть при кімнатній температурі, дані випромінювачі привертають увагу дослідників.

Енергія іонізації донорної домішки азоту, що локалізована біля X - мінімуму (позначимо її E_x), на порядок менша від величини E_T в околі Γ - мінімуму для сірки як донора в GaP. Якщо $E_T \cong 100 \text{ меВ}$, то $E_x \cong 10 \text{ меВ}$. [4]. Зумовлено це двома взаємопов'язаними причинами:

II міжнародна науково-технічна конференція

відмінність ефективних мас електронів у Γ - та X - точках ($m_{\Gamma}^* < m_X^*$), а також різними міжзонними інтервалами ($E_{g\Gamma} > E_{gX}$).

За умови термодинамічної рівноваги швидкість випромінювальної рекомбінації R можна виразити через коефіцієнт міжзонного поглинання α :

$$R = \frac{8\pi\Gamma^3 k^3}{c^2 h^3} \int_0^{\infty} \frac{\alpha n^2 u^2 du}{e^u - 1}, \quad (1)$$

де n – концентрація електронів; $u = h\nu/kT$.

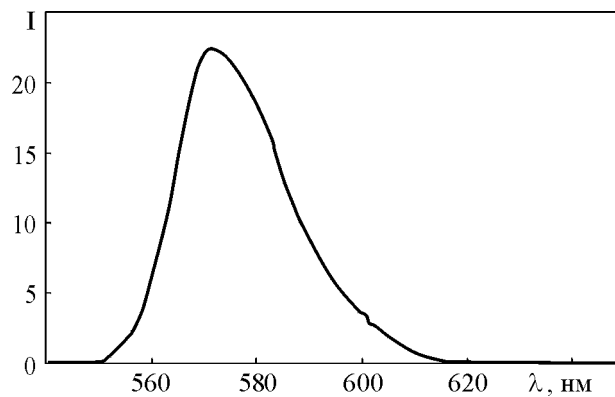


Рис.6. Спектр випромінювання S-діода при кімнатній температурі.

Вираз (1) використовують для розрахунків форми спектра рекомбінаційної люмінесценції при даній температурі, якщо відома експериментальна функція $\alpha(h\nu)$. Для прямих дозволених зона-зонних переходів

$$\alpha(h\nu) = A\pi\Delta e^{\pi\Delta} (h\nu - E_g)^{1/2} / \sinh\pi\Delta, \quad (2)$$

де

$$A = \frac{e^2 (2\mu)^{3/2}}{\epsilon^{1/2} m c h^2} f; \quad (3)$$

$$\Delta = \left(\frac{E_g - E_{ex}}{h\nu - E_g} \right)^{1/2}; \quad (4)$$

$$\mu = m_e^* m_h^* / (m_e^* + m_h^*); \quad (5)$$

E_g – ширина забороненої зони; $(E_g - E_{ex})$ – енергія зв'язку екситона; ϵ – діелектрична стала.

Сила осцилятора у рамках моделі Кейна дорівнює

$$f=1/12[(m-m_e^*)/m_e^*][(E_g+\Delta_{s-o})/(E_g+2/3\Delta_{s-o})], \quad (6)$$

де m – маса вільного електрона; Δ_{s-o} – спин-орбітальне розщеплення валентної зони. Експериментально f можна визначити за інтегральним поглинанням, використовуючи формулу Смакули. Для лоренцівського контура смуги

$$f=1.29 \cdot 10^{17} \frac{1}{n_N} \frac{n_2}{(n_2^2+2)^2} \alpha_m H, \quad (7)$$

де α_m виражено в см^{-1} , а напівширина смуги H – в еВ [5].

У випадку непрямозонних напівпровідників, до яких належить GaP, характерною є мала ймовірність випромінювальної рекомбінації носіїв в області $p-n$ – переходу, тим більше, при випромінюванні у зеленій ділянці спектра. Це зумовлено малими силами осциляторів для непрямих переходів. Якщо ж наявні азотні донорні центри, ситуація кардинально змінюється: неглибокі рівні рекомбінації, нижчі від абсолютного мінімуму зони провідності, збільшують ймовірність процесу на декілька порядків. Це чітко спостерігається як у спектрі поглинання, так і люмінесценції (див. рис.9 і 10).

Протяжність хвильової функції електрона на ізоелектронній пастці N у GaP можна оцінити в наближенні Слетера-Костера для короткодіючого потенціалу:

$$\Psi_x(r) \sim (1/r) \exp(-2m_x^* E_x)^{1/2} r/h). \quad (8)$$

Для донора S у GaP визначальним є кулонівський потенціал, тому

$$\Psi_r(r) \sim \exp((-2m_r^* E_r)^{1/2} r/h). \quad (9)$$

На рис.7 показані результати обчислювань величин Ψ^2 , що пропорційні силам осцилятора. Для зручності зіставлення цих даних зі схемою на рис.5, подано залежності $\Psi^2(\mathbf{k})$, тобто результати зображені у бріллюенівському просторі, причому шкала по осі ординат (дані у відносних одиницях) – логарифмічна. Якщо перейти від прямого до \mathbf{k} -простору, то співвідношення (8) і (9) набирають вигляду:

$$\Psi_x(\mathbf{k}) \sim [E_x + \hbar^2(\mathbf{k}-x)^2/2m_x^*]^{-1}, \quad (8a)$$

$$\Psi_r(\mathbf{k}) \sim [E_r + \hbar^2 \mathbf{k}^2/2m_r^*]^{-2}. \quad (9a)$$

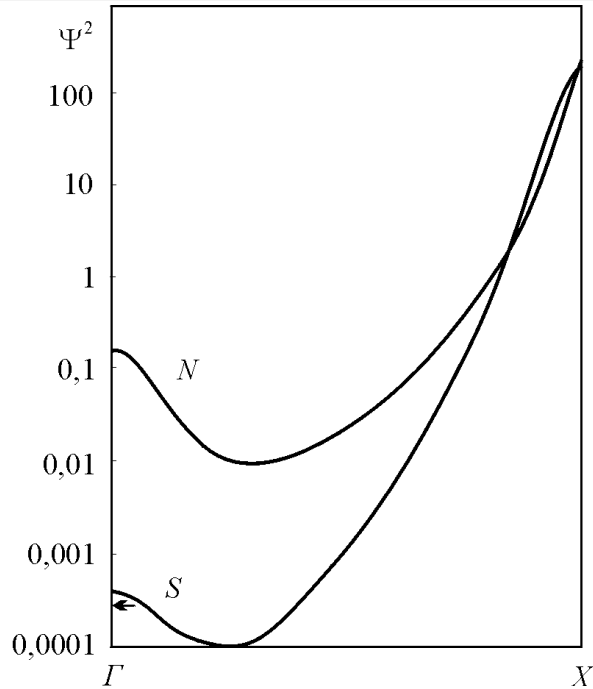


Рис.7. Залежність Ψ^2 (К) електрона на ізоелектронній пастці азоту (N) та на донорі сірки (S) в GaP.

Як бачимо з рис. 7, сила осцилятора та ймовірність випромінювальної рекомбінації на мілкому донорному центрі ізоелектронної домішки азоту в GaP зростає приблизно на два порядки величини.

Встановлено [3,6–7], що для концентрації азоту $n_N \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ спектр випромінювання GaP:N пов'язаний з рекомбінацією на екситонно-домішкових комплексах (екситони, локалізовані на нейтральних донорах). За участю екситонів форма краю (рис.8), а саме – нижче від краю поглинання, з'являється інтенсивна безфононна смуга. (На рис.8 енергія по осі абсцис виражена у рідбергах для екситонів Ван'є-Мотта

$$R_y = \frac{\mu e^4}{2h^2 \epsilon^2} \text{).}$$

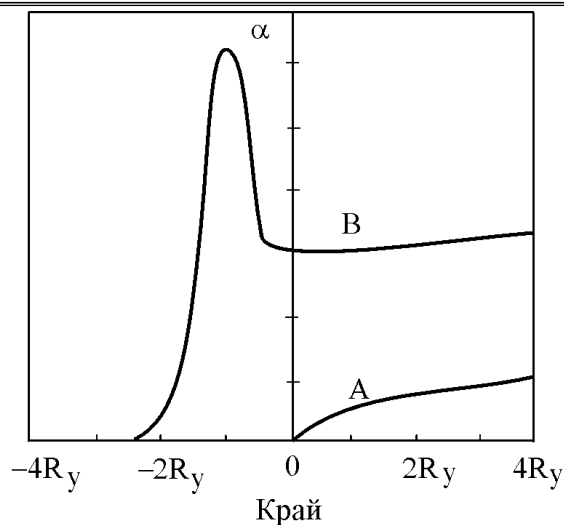


Рис.8. Форма краю власного поглинання напівпровідника без участі (А) та з участю екситонів (В).

У GaP ця смуга проявляється у випадку значного легування азотом ($n_N \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Томас і Гопфільд [3] при дуже низькій температурі (2К) виявили чітку тонку структуру спектра екситонно-домішкових комплексних центрів у GaP:N (рис.9). Цей результат був підтверджений в інших лабораторіях.

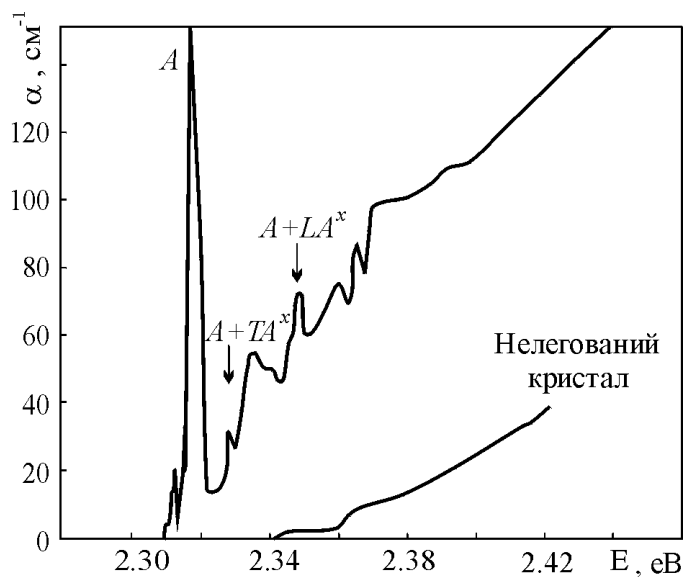


Рис.9. Край поглинання легуваного азотом ($n_N \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) та нелегованого GaP при 2 К.

Редукція спектра внутрішньої рекомбінації “зелених” GaP-світлодіодів

Задача відтворення внутрішнього спектра рекомбінаційної люмінесценції актуальна саме для “зелених” GaP-світлодіодів, оскільки в зеленій ділянці спектра ($h\nu \geq 2,18\text{eV}$ або $\lambda \leq 570\text{ нм}$) система GaP:N при $n_N \sim 10^{19}\text{ см}^{-3}$ характеризується сильним зона-зонним та екситонним поглинанням. Це крайове поглинання настільки велике ($\alpha > 10^2\text{ см}^{-1}$), що світловий потік, виходячи назовні з S-діода, виявляється помітно ослабленим. Прикрайова реабсорбція видозмінює спектр рекомбінаційної люмінесценції, що ясно видно з рис.10. Крім того, впливають й інші чинники, що пов’язані з технологічними особливостями та конфігурацією випромінювачів. Тому для коректного визначення їх фізичних параметрів необхідно спостережуваний (зовнішній) спектр редукувати з урахуванням зазначених факторів. Щоб мати уявлення, як у цьому випадку трансформується спектр, на рис.11 проілюстровано відповідний редукований спектр (масштаб по осі ординат – логарифмічний).

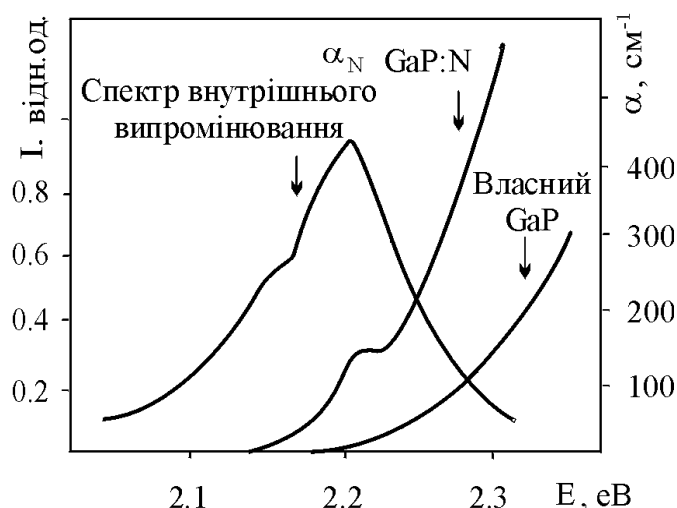


Рис.10. Порівняння спектрів поглинання, внутрішнього випромінювання GaP:N; $T=300\text{ К}$, $n_N=10^{19}\text{ см}^{-3}$ та поглинання нелегованого GaP.

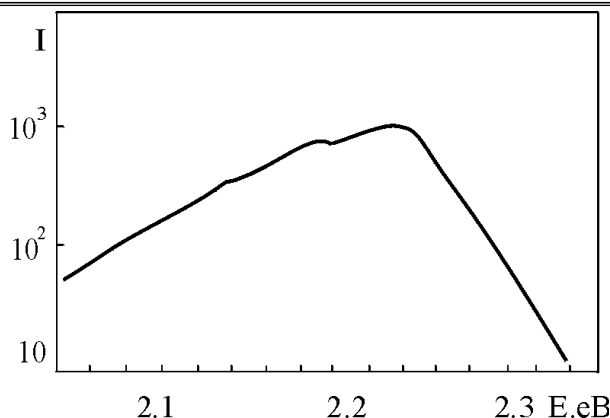


Рис.11 Редукований спектр рекомбінаційного свічення GaP:N при $T=300$ К.

Величину зовнішнього квантового виходу люмінесценції виразимо через внутрішній квантовий вихід $\eta_{\text{вн}}$ та ефективний коефіцієнт пропускання $\eta_{\text{еф}}$. Це є функції енергії фотона $E=h\nu$:

$$\eta_{\text{зовн}}(E)=\eta_{\text{вн}}(E)\eta_{\text{еф}}(E). \quad (10)$$

Функції $\eta_{\text{вн}}(E)$ та $\eta_{\text{еф}}(E)$ залежать від багатьох параметрів (концентрація домішки, технологія $p-n$ – переходу, густина інжекційного струму, форма випромінювача, наявність чи відсутність просвітлюючих покриттів, омичні контакти, дифузійна довжина неосновних носіїв, робоча температура випромінювача, товщина епітаксіальних шарів тощо), тому відповідні модельні комп'ютерні обчислення можуть займати чимало машинного часу. Однак задачу можна до певної міри спростити, взявши до уваги лише найголовніші фактори. Нами враховувалися: реабсорбція, френелеве відбивання та вплив омичних контактів.

Щодо внутрішнього квантового виходу $\eta_{\text{вн}}$, то цей параметр найперше залежить від густини J струму інжекції та від температури. Типові залежності $\eta_{\text{вн}}(J)$ та $\eta_{\text{вн}}(T)$ для $p-n$ –переходу в GaP показані на рис.12. Остання апроксимується емпіричним співвідношенням:

$$\eta_{\text{вн}}(T)=\eta_{\text{вн}}(T_0)e^{\frac{E_a}{k}(T-T_0)}, \quad (11)$$

де енергія активації для GaP дорівнює $E_a \cong 0,05$ eV. В околі кімнатної температури ($T_0=T_{\text{кім}}$) одержуємо:

$$\frac{1}{\eta_{\text{вн}}(T_0)} \frac{\Delta \eta_{\text{вн}}}{\Delta T} \cong 1 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}. \quad (12)$$

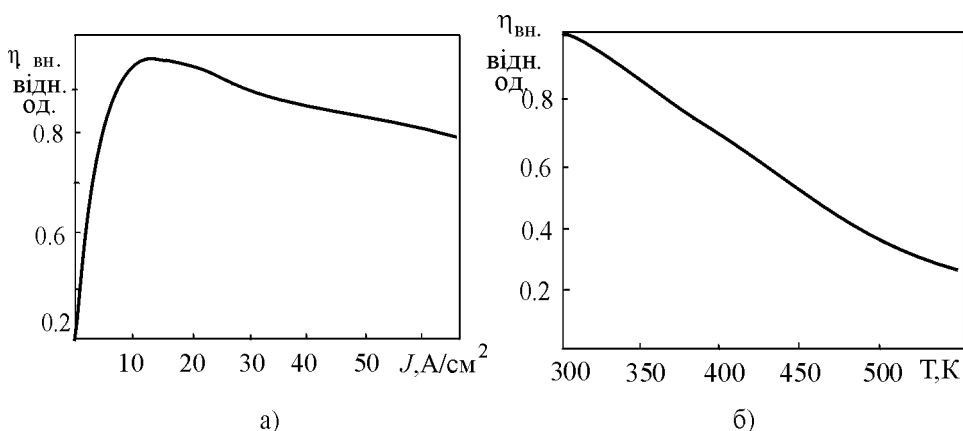


Рис.12. Залежність $\eta_{\text{вн.}}(J)$ (а) та $\eta_{\text{вн.}}(T)$ (б).

Досліджуваний “зелений” GaP-світлодіод виготовляли таким способом, що на тонкій підкладці (0,2 мм) *n*-GaP методом рідинної епітаксії створювали два шари, кожен товщиною $t=25$ мкм. Площа омічного контакту нижньої поверхні (*p*-область) становила близько 15%. Середня величина коефіцієнта відбивання світла на контакті обчислюється за співвідношенням:

$$\bar{R} = \int_{E_2}^{E_1} R_M(E) I_L(E) dE / \int_{E_1}^{E_2} I_L(E) dE, \quad (13)$$

де $R_M(E)$ – спектр відбивання матеріалу напиленого електрода; $I_L(E)$ – спектр люмінес-ценції, формою якого визначаються межі числового інтегрування. У випадку типових металічних контактів (наприклад, Au) для зеленої ділянки спектра $\bar{R} \cong 0,85$. Цей параметр беруть до уваги (з урахуванням площі контакту) в низькоенергетичній ділянці спектра, коли поглинання слабе і світло багатократно проходить через кристал без помітного послаблення.

Іншим фактором, що впливає на вихід випромінювання із світлодіода, є повне внутрішнє відбивання внаслідок великого показника заломлення GaP (рис.13). Світло, випромінене у деякій точці *p-n*-переходу, поширюється ізотропно у тілесному куті 4π стер-радіанів. Однак через високу різницю показників заломлення GaP та епоксидної плівки конус виходу світлового потоку обмежується критичним кутом

$$\Theta_k = \arcsin(n_1/n_2), \quad (14)$$

де n_1 – показник заломлення епоксидної плівки; n_2 – показник заломлення кристала GaP. Для $\Theta > \Theta_k$ випромінювання зазнає повного внутрішнього відбивання.

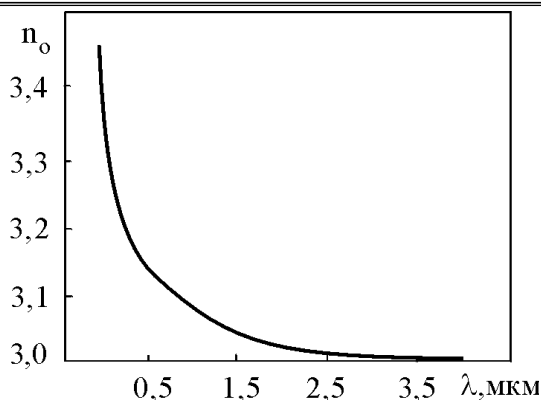


Рис.13. Дисперсія показника заломлення GaP.

При нормальному падінні світла на вихідну поверхню світлодіода коефіцієнт пропускання дорівнює

$$T = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (15)$$

Якщо знехтувати поглинанням всередині діода (низькоенергетична межа), то частина світлового потоку, що може вийти через верхню грань, дорівнюватиме

$$\eta_0 = T \sin^2(\Theta_k/2) \quad (16)$$

Для $n_1=1,56$ (епоксидна плівка) і $n_2=3,44$ одержуємо: $\Theta_k = 27^\circ$, $T=0,86$ і $\eta_0=0,047$, тобто коефіцієнт пропускання 4,7%.

Враховується також поглинання світла на омичних контактах, у зв'язку з чим намагаються зменшити площу контактів до технологічно припустимого мінімуму.

На закінчення розглянемо найголовніший канал втрат потужності внутрішньої люмінесценції, пов'язаний з поглинанням ізоелектронною домішкою азоту в GaP (див. рис.10). (Рекомбінація, пов'язана з поглинанням вільних носіїв, у зеленій ділянці спектра може вважатися несуттєвою. Впливом розсіювання світла на неконтрольованих домішках та дефектах також ігноруватимемо). Легко зрозуміти, що ці втрати можна було б знизити, зменшивши концентрацію азоту в епітаксіальних шарах або зменшивши товщину цих шарів. Однак зі зменшенням n_N стрімко спадає ефективність рекомбінації. Коли ж товщина шарів t менша, ніж приблизно три дифузійні довжини неосновних носіїв ($t \leq 3L$), вірогіднішим стає механізм безвипромінювальної рекомбінації. Тому в GaP-світлодіодах параметр t не може бути меншим ніж ~ 20 мкм, оскільки $L \cong 7$ мкм.

Функцію $\eta_{\text{еф}}(E)$ не можна зобразити загальним аналітичним виразом, тому для розв'язування задачі

$$\eta_{\text{вн}}(E) = \eta_{\text{еф}}^{-1}(E) \eta_{\text{зовн}}(E) \quad (17)$$

II міжнародна науково-технічна конференція

доводиться обґрунтовувати певні емпіричні підходи. Ідея запропонованого нами підходу полягає в тому, що функцію $\eta_{\text{ef}}(E)$ виражемо через парціальні фактори:

$$\eta_{\text{ef}}(E) = \eta_0 \eta_{\bar{r}} \eta_p \eta_{\alpha}(E), \quad (18)$$

де η_0 – фактор втрат за рахунок френелевого відбивання; $\eta_{\bar{r}}$ – фактор втрат на омичних контактах; η_p – фактор пов'язаний з розсіюванням світла; $\eta_{\alpha}(E)$ – фактор реабсорбції. Три перші фактори майже бездисперсійні. Тому їх можна замінити усередненими по ширині спектра випромінювання параметрами, сукупний вплив яких виразимо ефективним коефіцієнтом F :

$$\eta_{\text{ef}}(E) = F \eta_{\alpha}(E). \quad (19)$$

Далі F визначаємо на довгохвильовій межі спектра (при $E \cong E_1$), коли реабсорбція не проявляється:

$$F = \eta_{\text{зовн}}(E_1) / \eta_{\text{вн}}(E_1). \quad (20)$$

З рівнянь (17) і (19) видно, що деформація внутрішнього спектра зумовлюється головно фактором реабсорбції.

Маючи функції $\eta_{\alpha}(E)$ (тобто спектр поглинання легованого зразка) і $\eta_{\text{зовн}}(E)$ (тобто вимірний спектр люмінесценції) та здійснивши їх розклад за багатоосциляторною моделлю (тобто знайшовши параметри фур'є-гармонік), неважко відтворити структуру внутрішнього спектра.

It has been measured the recombination radiation spectrum of green emitting GaP diode at the temperature of 77.4K. The relaxation of light flux because of edge absorption within the diode bulk, which for doped GaP is very large in the green part of the spectrum, and also total internal reflection, induced by the big refractive index of GaP, leads to essential distortion of the spectrum on the exit from the radiator. The reduction of recombination spectrum to undistortion kind (that is to intrinsic or internal spectrum), which is carried out in this work, allows to determine the true parameters of corresponding quantum transition and to find out the mechanisms of recombination more adequately.

Література

1. Nakamura S., Senoch M., Iwasa N. et al. // Jap. J. Appl. Phys.-1995. - 34, part 2, №10B. -P.L1332.
2. Bardeen J., Blatt F., Hill L. // Proc. Atlantic City Conf. on Photoconductivity. New York - London, 1956, - P.146.
3. Thomas D., Hopfield // J. Phys. Rev. - 1969.- 150, № 2. - P.680.
4. Берг А., Дин П. Светодиоды. Пер. с англ. - М.:Мир, 1979. -686 с.
5. Довгий Я.О. // Фізичний збірник НТШ. - 1997. – 2. – С.41.
6. Дин П., Берг А. // ТИИЭР. – 1972. - 60, № 2, - С.156.
7. Пихтин А.Н., Яськов Д.А. // ФТТ. – 1968. – 10. – С.1660.

УДК 62-504.462

**С. Мовчан, канд.техн.наук; Л. Мовчан, канд.техн.наук;
Я. Проць, канд.техн.наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені
Івана Пулюя*

ПОБУДОВА ОБЛАСТІ СТІЙКОСТІ ЛІНІЙНИХ НЕПЕРЕРВНИХ СИСТЕМ В ПРОСТОРІ ДВОХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО НЕЛІНІЙНО ВПЛИВАЮТЬ НА КОЕФІЦІЄНТИ ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО РІВНЯННЯ

Розглянуто питання побудови областей стійкості лінійних неперервних систем в просторі двох параметрів, обидва з яких нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння. Запропоновано алгоритм знаходження точок границі області стійкості шляхом перебору тільки одного параметру, без перевірки на стійкість чи нестійкість системи в цих точках. Коректність результату гарантована застосуванням методу D-розбиття.

Вступ. Важливою задачею дослідження стійкості лінійних неперервних систем є побудова області стійкості системи в площині її параметрів. В реальних системах автоматичного керування вплив параметрів системи на коефіцієнти характеристичного рівняння є нелінійним і таким, що не дозволяє звести визначення області стійкості системи в просторі двох, а тим більше трьох параметрів тільки до лінійної задачі. Для такого випадку загальновідом є застосування чисельних методів перебору точок в просторі параметрів із використанням ЕОМ [1, 2, 3]. Очевидно, що метод перебору параметрів, являючись найбільш загальним, неекономічний з точки зору кількості обчислень при збільшенні точності визначення границі області стійкості (ГОС) і не гарантує коректності результату. Іншим підходом є отримання нелінійних рівнянь границь областей стійкості та розробка спеціальних чисельних методів їх розв'язання [4, 5] для систем із постійним запізненням.

Дана робота є продовженням роботи [6], в якій авторами запропоновано загальний підхід до побудови областей стійкості лінійних неперервних систем в площині параметрів, що нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння. Отримано вирази, з допомогою яких побудовано область стійкості (ОС) системи в площині двох параметрів, один із яких лінійно, а другий – нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння, та зазначено, що аналогічно можна побудувати області стійкості в просторі двох параметрів, обидва із яких нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння.

В даній роботі пропонується конкретний алгоритм побудови області стійкості лінійних неперервних систем в просторі двох параметрів, обидва із яких нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння.

Постановка задачі. Розглядається задача побудови області стійкості лінійних неперервних систем в просторі двох параметрів, від яких нелінійно залежать коефіцієнти характеристичного рівняння

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0.$$

Значення параметра k на границі області стійкості в площині параметрів k і V , перший із яких лінійно, а другий – нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння, визначаються згідно із системою рівнянь, отриманих з допомогою методу Д-розбивання [6]

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\sum_{i=0}^r c_{2i} \sum_{k=0}^r d_{2k} \omega^{2(k+i)} + \sum_{i=0}^l c_{2i+1} \sum_{k=0}^l d_{2k+1} \omega^{2(k+i+1)}}{\sum_{i=0}^n d_i^2 \omega^{2i} + \sum_{i=0}^{n-2} d_i \sum_{k=1}^l d_{2k+i} \omega^{2(k+i)}}, \quad (1) \\ \sum_{i=0}^l c_{2i+1} \sum_{k=0}^r d_{2k} \omega^{2(k+i)+1} + \sum_{i=0}^r c_{2i} \sum_{k=0}^l d_{2k+1} \omega^{2(k+i)+1} = 0 \end{array} \right.$$

де c_{ji} і d_{mk} є алгебраїчно залежними від значень параметрів характеристичного рівняння (в т.ч. від V).

Далі, в роботі [6], значення нелінійного параметра V змінювали від V_{\min} до V_{\max} із заданим кроком ΔV і використовуючи рівняння (1), отримували сукупність граничних точок відрізків стійкості параметра k , які в площині параметрів V і k , сумісно із відповідними значеннями $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$, визначають точну границю області стійкості.

Розглянемо побудову ОС в площині двох параметрів, обидва із яких нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння, використовуючи запропонований в роботі [6] підхід.

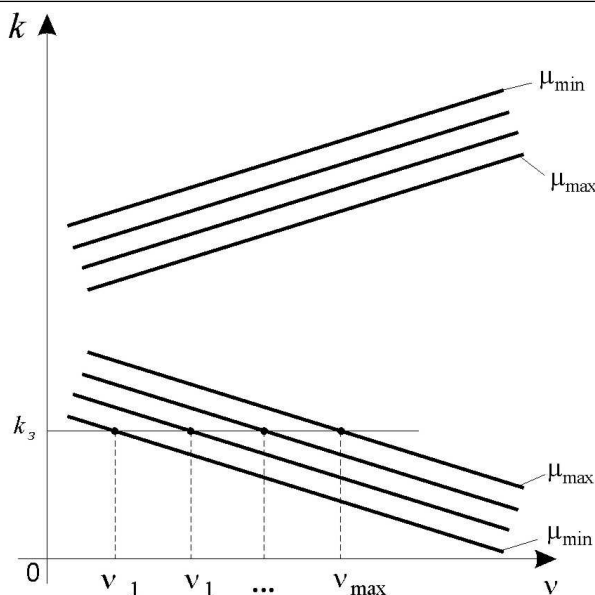


Рис. 1 Множина ГОС в площині параметрів k, V

Розв'язок поставленої задачі. Визначаючи області стійкості в площині параметрів $[k, V]$ отримуємо множину ГОС при зміні із заданим кроком $\Delta\mu$ в заданих межах $\mu_{\min} \leq \mu \leq \mu_{\max}$ іншого параметра μ , що як і V нелінійно входить в коефіцієнти рівняння досліджуваної системи (рис. 1).

Очевидно, що сукупність значень нелінійних параметрів, які відповідають одному і тому ж значенню лінійного параметра k , отриманого з рівнянь (1), визначає точки границі області стійкості в площині цих параметрів.

Розглянемо метод побудови границі області стійкості в просторі параметрів V і μ , який не вимагає побудови множини ГОС, дозволяє зменшити кількість точок перебору, не вимагає дослідження стійкості системи в цих точках і підвищує точність побудови області стійкості. Цей метод полягає в тому, що для конкретного значення параметра V границі ОС, який змінюється з кроком ΔV в межах $V_0 = V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$, визначаємо таке значення μ , при якому значення k , визначене з формул (1) задовольняло б умові

$$|k_3 - k| \leq \Delta k, \quad (2)$$

де Δk – наперед задане значення точності побудови ОС.

II міжнародна науково-технічна конференція

Визначення границі області стійкості в площині параметрів V і μ для заданого значення k_3 , починаємо з обчислення початкового значення μ_0 границі ОС при $V_0 = V_{\min}$. Для наступного значення $V = V_0 + \Delta V$ ГОС, шляхом перебору параметра μ із змінним кроком $\Delta\mu$ в напрямку, що визначається характером зміни параметра k ГОС при зміні параметра μ , визначаємо таке значення μ , при якому виконується співвідношення (2).

Для визначення характеру зміни параметра k на границі ОС при зміні параметра μ з використанням формул (1), визначаємо значення лінійного параметра k при значеннях нелінійних параметрів $V_0, \mu_0 + \Delta\mu$ і $V_0 + \Delta V, \mu_0$ і порівнюємо їх із заданим значенням k_3 . Якщо одночасно виконуються нерівність $k(V_0 + \Delta V, \mu_0) > k_3$, що відповідає збільшенню значення параметра k при зростанні значення параметра V і фіксованому μ , і нерівність $k(V_0, \mu_0 + \Delta\mu) > k_3$, що відповідає збільшенню значення параметра k при зростанні значення параметра μ і фіксованому V , то це означає, що для фіксованого значення параметра k , збільшенню значення V відповідає зменшення значення μ (рис. 2, а). Отже, наступне значення k , при збільшенні V на крок ΔV ($V = V_0 + \Delta V$) і $|k(V_0 + \Delta V, \mu_0) - k_3| > \Delta k$, визначаємо з (1), змінюючи μ , згідно з вищевикладеним, наступним чином: $\mu = \mu_0 - \Delta\mu$. У випадку, якщо $k(V_0 + \Delta V, \mu_0 - \Delta\mu) > k_3$ і $|k(V_0 + \Delta V, \mu_0 - \Delta\mu) - k_3| > \Delta k$, алгоритм зміни μ не міняється, тобто наступне значення $\mu = \mu_0 - 2\Delta\mu$ і т.д., поки не виконається нерівність $|k(V_0 + \Delta V, \mu_0 - n\Delta\mu) - k_3| \leq \Delta k$ або $k(V_0 + \Delta V, \mu_0 - \Delta\mu) < k_3$ при $|k(V_0 + \Delta V, \mu_0 - \Delta\mu) - k_3| > \Delta k$. В першому випадку перебір значень параметра μ припиняється і значення $\mu = \mu_0 - n\Delta\mu$, сумісно із значенням параметра $V = V_0 + \Delta V$, є точкою границі області стійкості в площині нелінійних параметрів (V, μ) . В другому випадку крок зміни параметра μ зменшується $\Delta\mu = \Delta\mu / 2$, а алгоритм зміни міняє вигляд на $\mu = \mu_0 - n\Delta\mu + \Delta\mu / 2$. У випадку, коли $|k(V_0 + \Delta V, \mu_0 - n\Delta\mu + \Delta\mu / 2) - k_3| \leq \Delta k$, перебір значень параметра припиняється і параметри $\mu = \mu_0 - n\Delta\mu + \Delta\mu / 2$ і $V = V_0 + \Delta V$ відповідають точці границі ОС. При умові,

$$\text{якщо } k(v_0 + \Delta v, \mu_0 - n\Delta\mu + \Delta\mu/2) > k_3$$

$$\text{або } k(v_0 + \Delta v, \mu_0 - n\Delta\mu + \Delta\mu/2) < k_3,$$

при $|k(v_0 + \Delta v, \mu_0 - n\Delta\mu + \Delta\mu/2) - k_3| > \Delta k$, перебір μ

продовжуємо. При цьому, крок $\Delta\mu$ кожного разу зменшується в два рази, а знак перед кроком визначається, як було описано вище,

співвідношенням між k і k_3 : якщо $k > k_3$, то знак перед $\Delta\mu$

від'ємний, а при $k < k_3$ – додатний. Перебір значень μ завершується

при виконанні умови $|k - k_3| \leq \Delta k$.

Аналогічно, одночасне виконання нерівності

$k(v_0 + \Delta v, \mu_0) < k_3$, що відповідає зменшенню значення параметра

k на ГОС при зростанні значення параметра v і фіксованому μ , і

нерівності $k(v_0, \mu_0 + \Delta\mu) < k_3$, що відповідає зменшенню значення

параметра k при збільшенні значення параметра μ і фіксованому v ,

означає, що для фіксованого значення параметра k , збільшенню

значення v відповідає зменшення значення μ (рис. 2, б). Отже,

наступне значення k , при збільшенні v на крок Δv ($v = v_0 + \Delta v$),

визначаємо з (1), також приймаючи $\mu = \mu_0 - \Delta\mu$.

У випадку одночасного виконання нерівності

$k(v_0 + \Delta v, \mu_0) < k_3$, що відповідає зменшенню значення параметра

k на ГОС при зростанні значення параметра v і фіксованому μ , і

нерівності $k(v_0, \mu_0 + \Delta\mu) > k_3$, що відповідає збільшенню значення

параметра k при зростанні значення параметра μ і фіксованому v , це

означає, що для фіксованого значення параметра k , збільшенню

значення v відповідає збільшення значення μ (рис. 2, в).

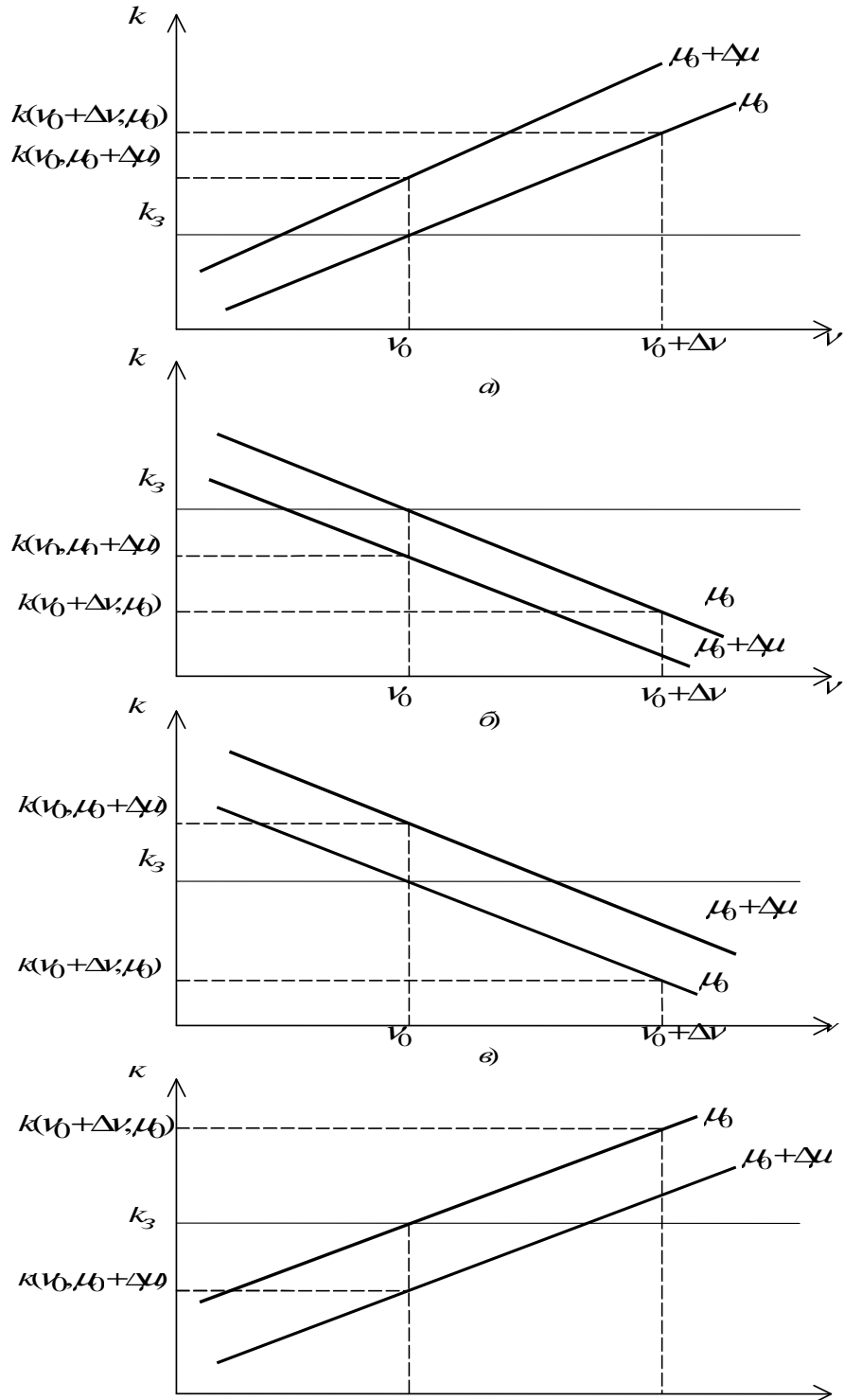
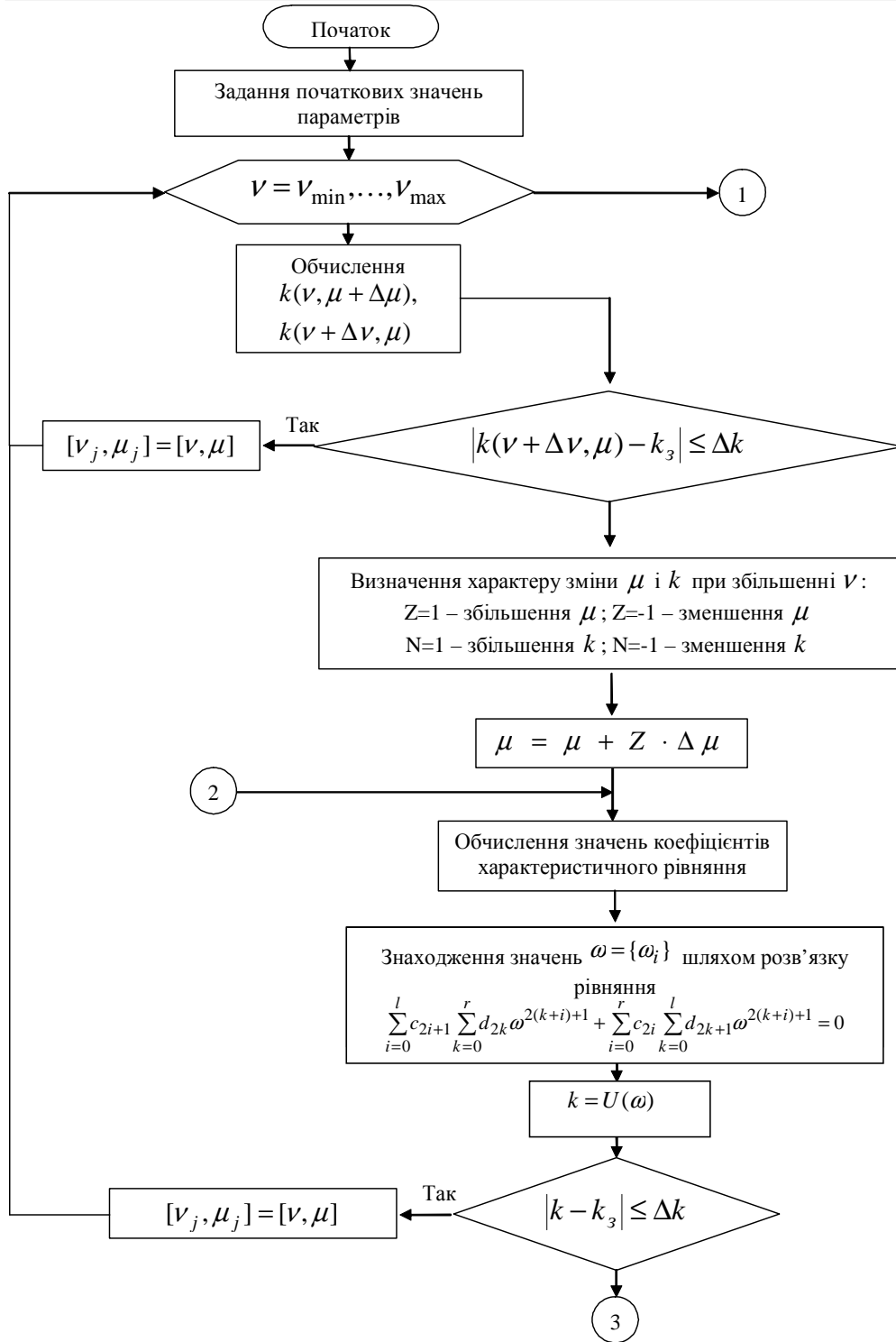


Рис. 2 Визначення характеру зміни параметрів μ і V , при фіксованому k :
 а), б) – збільшенню значення V відповідає зменшення значення μ ;
 в), г) – збільшенню значення V відповідає збільшення значення μ .

Отже, наступне значення k , при збільшенні V на крок ΔV ($V = V_0 + \Delta V$), визначаємо з (1), змінюючи μ , згідно з вищевикладеним, наступним чином: $\mu = \mu_0 + \Delta\mu$. Аналогічно, якщо одночасно виконуються нерівність $k(V_0 + \Delta V, \mu_0) > k_3$, що відповідає збільшенню значення параметра k при зростанні значення параметра V і фіксованому μ , і $k(V_0, \mu_0 + \Delta\mu) < k_3$, що відповідає зменшенню значення параметра k при зростанні значення параметра μ і фіксованому V , це означає, що для фіксованого значення параметра k , збільшенню значення V відповідає збільшення значення μ (рис. 2, з). Отже, наступне значення k , при збільшенні V на крок ΔV ($V = V_0 + \Delta V$), визначаємо з (1), приймаючи $\mu = \mu_0 + \Delta\mu$.

Для випадків, наведених на рис. 2 б), в), з), алгоритм визначення граничного значення параметра μ аналогічний випадку рис. 2 а). Знак вибору кроку $\Delta\mu$ визначається характером зміни параметра k і змінюється на протилежний одночасно із зменшенням в два рази кроку параметра μ в випадку зміни знаку різниці поточного значення параметра k і заданого k_3 , тобто зміни знаку різниці $k - k_3$. Перебір завершується, коли $|k - k_3| \leq \Delta k$, що є умовою належності одержаного значення μ до границі області стійкості при $V = V_0 + \Delta V$ і при $k = k_3$ з похибкою Δk .

Аналогічно визначаємо значення параметрів μ при $|k - k_3| \leq \Delta k$ для всіх заданих значень параметра V ($V_0 \leq V \leq V_{\max}$), що змінюються з наперед вибраним кроком ΔV . При цьому, для кожного наступного значення параметра $V = V_0 + \Delta V$, початкове значення кроку $\Delta\mu$ параметра вибираємо рівним кінцевому значенню кроку $\Delta\mu$ для попереднього значення параметра V , що суттєво зменшує час визначення точок границі області стійкості. В результаті проведення таких обчислень, сукупність отриманих значень μ сумісно із відповідними їм значеннями V відповідають значенням точок границі ОС в площині параметрів $[V, \mu]$ при фіксованих інших параметрах системи. Чим менший крок зміни ΔV параметра V , тим менше кроків в циклі визначення відповідного параметра μ , але збільшується кількість самих циклів визначення даного параметра. Блок-схему алгоритму визначення точок границі ОС в площині параметрів $[V, \mu]$ наведено на рис. 3.



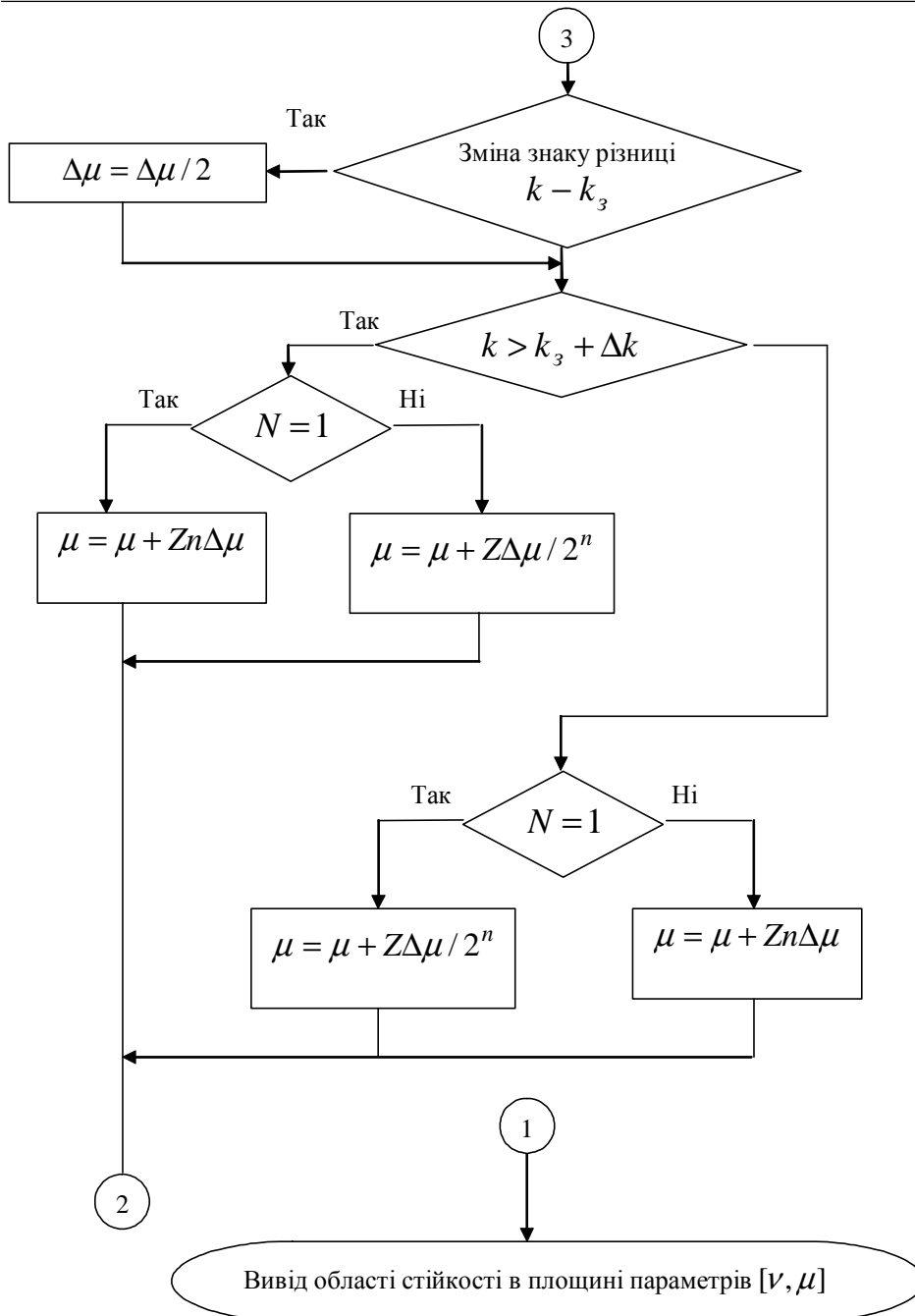


Рис.3. Блок-схема алгоритму визначення точок границі ОС в площині параметрів $[\nu, \mu]$

Висновок. Очевидно, що даний підхід, на відміну від відомих методів перебору, дозволяє визначити границю області стійкості в площині параметрів, які нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння, шляхом перебору тільки одного параметра, всі значення якого відповідають точкам ГОС. Тому відпадає потреба перевірки стійкості чи нестійкості системи на кожному кроці перебору, що суттєво зменшує час визначення значень нелінійного параметра на границі стійкості. Крім того, точність побудови ГОС визначається відхиленням значень лінійного параметра від наперед заданого, для якого визначаємо область стійкості в площині двох нелінійних параметрів, що дозволяє одержати границю цієї області із найменшим відхиленням від реальної області.

Так як при побудові області стійкості в площині двох параметрів, обидва із яких нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння, використано метод D-розбивання, то даний підхід гарантує коректність результату одержання границі ОС.

The problems of construction of stability regions of linear continuous systems in space of two parameters both of them nonlinearly go into coefficients of a secular equation are considered. The algorithm of determination a stability boundary points is proposed. It's not required to control a stability of system in these points and correctness of results is guaranteed by using of D-partition method.

Література

1. Гостев В.Н., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровым регулятором. – К.: «Радиоаматор», 1998. – 704 с.
2. Дидук Г.А. Машинные методы исследования автоматических систем. Л: 1983. – 242 с.
3. Топчеев Ю.И., Потемкин В.Г., Иваненко В.Г. Системы стабилизации. М.: «Машиностроение», 1974. – 248 с.
4. Пряшников Ф.Д. Метод построения областей заданных свойств в пространстве параметров систем автоматического управления // Вестник Севастопольского ГТУ. Автоматизация процессов и управления. – Севастополь, 1997. – С.3-8.
5. Пряшнікова П.Ф. Побудова областей стійкості і якості систем автоматичного керування з запізнюваннями. Спеціальність 05.13.03.- Системи і процеси керування // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – Севастополь, 2002. – 19 с.
6. Проць Я.І., Мовчан С.Л. Побудова області стійкості лінійних неперервних систем в площині параметрів, які нелінійно входять в коефіцієнти характеристичного рівняння // Вісник ТДТУ. – Тернопіль, 2004. – т.9, №2 – С.103-108.

УДК 621.327.534

А. Лупенко, канд. техн. наук

*Тернопільський державний технічний університет
імені Івана Пулюя*

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННОГО ПУСКОРЕГУЛЮЮЧОГО АПАРАТА ДЛЯ НАТРІЄВИХ ЛАМП ВИСОКОГО ТИСКУ

Проаналізовано однокаскадний високочастотний електронний пускорегулюючий апарат, який складається з двох по чергово працюючих підвищувальних перетворювачів постійної напруги в режимі переривчастих струмів та мостового інвертора з послідовним резонансним контуром. Оптимізовано робочу частоту апарата для підтримання потужності лампи в області допустимих значень у процесі її старіння. Встановлено умову мінімізації реактивної потужності вихідного каскаду апарата.

Вступ

Натрієві лампи високого тиску (НЛВТ) мають широке застосування для зовнішнього освітлення у зв'язку із їх високою світловою віддачею (до 160 люмен на ват), доброю кольоропередачею, зумовленою різними складовими в спектрі їх випромінювання, невеликими габаритами.

Для їх живлення все частіше використовують електронні пускорегулюючі апарати (ЕПРА), що працюють на частотах вищих 20 кГц. Головними перевагами високочастотного (ВЧ) живлення є збільшення світлової віддачі ламп, покращення якості світла, відсутність акустичних шумів, малі вага і габарити ЕПРА, можливість інтегрування комплектів НЛВТ-ЕПРА в системи автоматизованого керування освітленням.

Таким чином, крім своїх основних функцій (запалювання, розігрівання лампи, підтримання її робочого струму) ЕПРА повинен забезпечити роботу НЛВТ в області її допустимих значень напруги та потужності. Крім того, ЕПРА повинен задовільняти вимоги стандартів якості споживаної енергії, тому до його складу повинен входити коректор коефіцієнта потужності (ККП).

На відміну від ртутних ламп, які працюють при майже незмінній напрузі в процесі їх експлуатації, напруга розряду натрієвої лампи в процесі її старіння змінюється в широких межах (до 160%) [1]. Оскільки розрядна лампа живиться від генератора струму, то зростання напруги на ній збільшує потужність, споживану лампою. Область допустимих значень електричного режиму в координатах "напруга-потужність" для НЛВТ має трапецієподібний характер (рис.1) [2]. У цій області лампа працює з прийнятними характеристиками впродовж усього терміну її експлуатації. Верхня і нижня границі визначають

II міжнародна науково-технічна конференція

максимальну і мінімальну допустимі потужності лампи. Ліва і права границі співвідносять потужність лампи і напругу на ній відповідно для нової лампи і для лампи в кінці терміну експлуатації. Перевищення допустимої потужності лампи скорочує термін її служби. Перевищення допустимої напруги на ній призводить до циклічного погасання, наступного охолодження та перезапалювання лампи, що також прискорює процес її старіння.

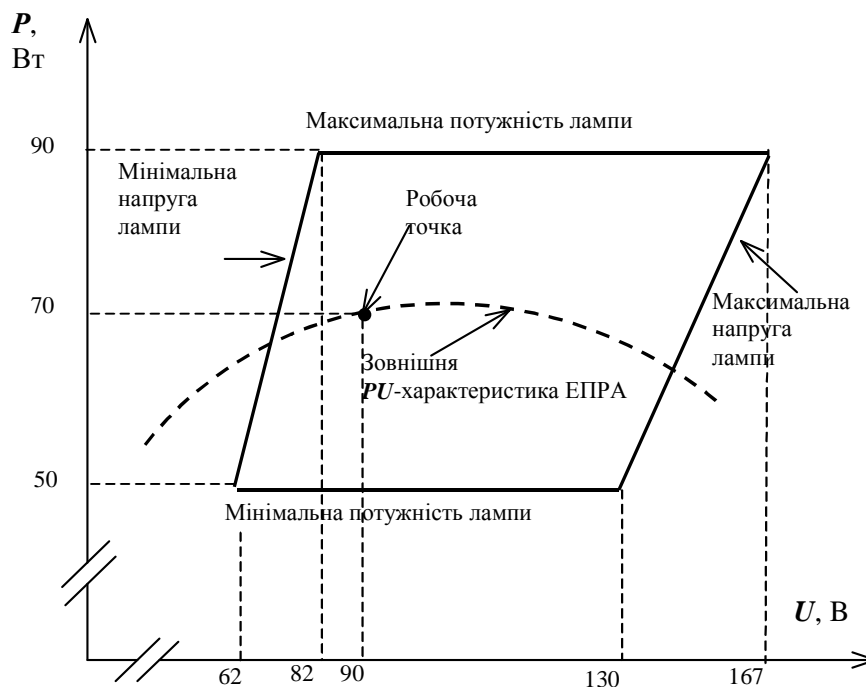


Рис.1. Узгодження електричного режиму лампи типу HPS-70 з ЕПРА

В роботі розглядається ЕПРА [3], який задовільняє вказані вимоги до нього. Він виконаний за однокаскадною розімкненою структурою, в якій ККП об'єднаний в одне ціле з ВЧ інвертором, що суттєво зменшує його вартісні та масогабаритні показники. Шляхом аналізу схеми ЕПРА одержано аналітичні вирази, які описують його характеристики, на основі яких проводиться вибір оптимальних параметрів його схеми стосовно підтримання потужності лампи в допустимих межах протягом всього терміну її експлуатації та мінімізації реактивної потужності вихідного каскаду ЕПРА.

Принцип роботи ЕПРА

Принцип роботи ЕПРА полягає у формуванні ВЧ прямокутних імпульсів з регульованим коефіцієнтом заповнення, які подаються на

послідовний резонансний контур, навантажений на НЛВТ. Для формування майже синусоїдного споживаного від мережі струму використовуються два почерговопрацюючі підвищувальні перетворювачі напруги (ППН) у режимі переривчастих струмів (РПС). Як відомо, РПС у таких перетворювачах дозволяє природне формування (без активних схем із зворотним зв'язком) майже синусоїдного споживаного струму [4].

Комутуючі транзистори ППН є одночасно і "нижніми" транзисторами схеми мостового інвертора ЕПРА. Почерговість їх роботи дозволяє розподілити середній за період високочастотної комутації струм між транзисторами рівномірно, що вдвоє зменшує кондуктивні втрати в них у порівнянні з відомими схеми. Крім того, запропонований алгоритм комутації мостового інвертора дозволяє незалежно регулювати (стабілізувати) напругу живлення інвертора та вихідну потужність НЛВТ.

Схема ЕПРА, наведена на рис.2 має три основні функціональні вузли: 1) ВЧ мостовий інвертор, утворений транзисторами $VT1 \div VT4$ та діодами $VD1 \div VD4$; 2) резонансний $LC_s C_p$ -контур, навантажений на лампу; 3) ККП на базі двох ВЧ ППН, які мають спільні дросель L_0 та вихідний накопичувальний конденсатор C_0 , напруга якого живить мостовий інвертор. До першого перетворювача належать діод $VD5$, транзистор $VT2$ та діод $VD1$, а до другого – діод $VD6$, транзистор $VT4$ та діод $VD3$. Мостовий інвертор формує ВЧ прямокутні різнополярні імпульси u_{ab} , прикладені до $LC_s C_p$ -контур (рис.3). ЕПРА живиться від мережі через фільтр і випрямляч, а роботою ЕПРА керує блок керування. Цей блок здійснює формування послідовності керуючих імпульсів $u_{361} \div u_{364}$, що діють між затворами і витоками відповідних транзисторів. В результаті в діагоналі ab почергово формуються прямокутні різнополярні імпульси u_{a6} з амплітудою U_0 та коефіцієнтом заповнення $DT/2$, який визначається регульованою тривалістю імпульсів u_{361} і u_{364} . Одночасно відбувається регулювання амплітуди струму в дроселі L_0 , тобто рівень енергії, накопичуваної в ньому. Після закривання транзисторів $VT2$ та $VT4$ в момент t_1 та відповідно t_5 , енергія дроселя передається в накопичувальний конденсатор C_0 через діоди відповідно $VD1$ та $VD3$. Такий алгоритм роботи забезпечує узгоджене регулювання напруги конденсатора C_0 та коефіцієнта заповнення $DT/2$. Тому напруга конденсатора C_0 підтримується практично постійною, незалежно від потужності лампи.

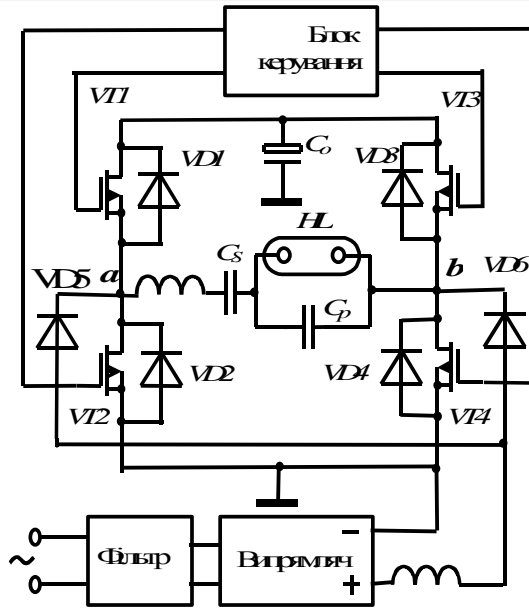


Рис.2 Схеми ФІРА

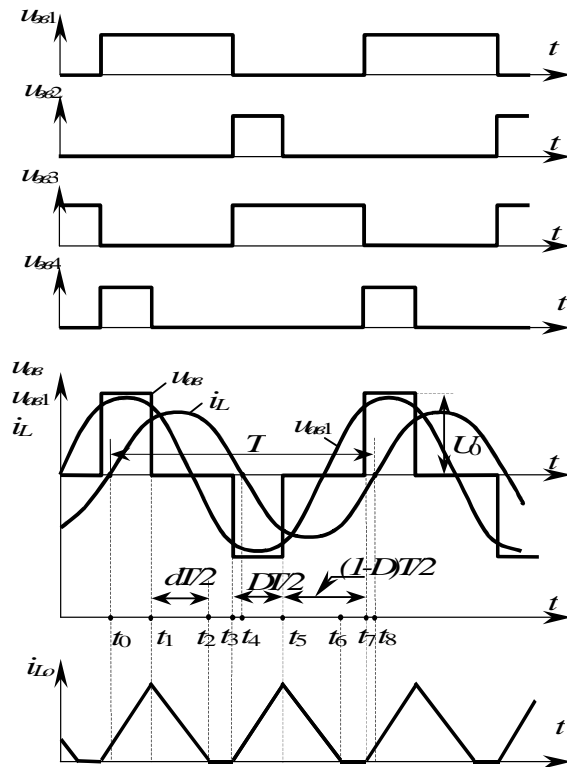


Рис.3 Часові діаграми роботи ФІРА

Аналіз та оптимізація ЕПРА

Аналіз схеми виконано методом основної гармоніки [11], зважаючи на те, що форма напруги і струму розрядної лампи є близькою до синусоїдної, оскільки резонансний контур має властивості фільтра, який відфільтровує вищі гармонічні складові. Для цього

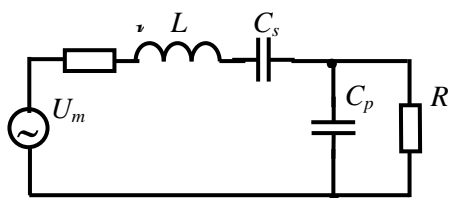


Рис.4. Еквівалентна схема ЕПРА

перейдемо до еквівалентної схеми рис.4, де позначено: R – опір лампи в робочому режимі; r – опір, що враховує кондуктивні втрати в коливній системі; U_m – еквівалентний генератор синусоїдної напруги, що живить контур. Амплітуда U_m синусоїдних коливань цього

генератора визначається із розкладу в ряд Фур'є прямокутних імпульсів з амплітудою, що дорівнює напрузі U_0 на конденсаторі C_0 :

$$U_m = \frac{4U_0}{\pi} \sin \frac{\pi D}{2}. \quad (1)$$

Введемо позначення, зведені в таблиці 1: ω_p, ω_s – частоти паралельного та послідовного резонансів, Ω – відносна частота, σ – відносна розстройка, Z_p – аналог характеристичного опору; Q_p – „добротність” паралельно навантаженого контура, Q_s – „добротність” послідовно навантаженого контура, α – відносний опір втрат.

Таблиця 1

$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_p}}$	$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}$	$\Omega = \frac{\omega}{\omega_p}$	$\sigma = \frac{\omega_s}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_s}$
$Z_p = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C_p}$	$Q_p = \frac{Z_p}{R}$	$Q_s = \frac{1}{\omega_s C_s R}$	$\alpha = \frac{r}{R}$

Модуль вхідного комплексного опору коливної системи ЕПРА:

$$\frac{|Z_{ex}|}{Z_p} = Q_p \sqrt{\frac{(1 + \alpha - \frac{\omega}{\omega_p} \sigma Q_p Q_s)^2 + (\sigma Q_s + \alpha Q_p \frac{\omega}{\omega_p})^2}{1 + (\frac{\omega}{\omega_p} Q_p)^2}}. \quad (2)$$

Фазовий зсув коливної системи:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\sigma Q_s \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p} Q_p \right)^2 \right] - \frac{\omega}{\omega_p} Q_p}{1 + \alpha \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p} Q_p \right)^2 \right]}. \quad (3)$$

У результаті аналізу отримано вирази для амплітуди напруги на лампі U_m та потужності в лампі P :

$$U_m = \frac{\frac{4U_0}{\pi} \sin \frac{\pi D}{2} \sin \omega t}{\sqrt{\left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{C_s} \right)^2 + \frac{1}{Q_p^2} \left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s} \right)^2}}, \quad (4)$$

$$P = \frac{8U_0}{\pi^2 Z_p} \frac{Q_p}{Q_p^2 \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{C_s} \right)^2 + \left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s} \right)^2}. \quad (5)$$

Користуючись таблицею 1, можна показати:

$$\frac{\omega}{\omega_p} \sigma Q_s Q_p = \left[\left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 - 1 \right] \frac{C_p}{C_s}. \quad (6)$$

Коефіцієнт передачі $LC_s C_p$ -контура за напругою:

$$\frac{U_{nm}}{U_m} = \frac{1}{\sqrt{\left\{ 1 + \alpha - \left[\left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 - 1 \right] \frac{C_p}{C_s} \right\}^2 + \left(\sigma Q_s + \alpha Q_p \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2}}. \quad (7)$$

Відносна чутливість потужності лампи до опору лампи:

$$S = \frac{\partial P}{\partial Q_p} \frac{Q_p}{P} = \frac{\left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2 - Q_p^2 \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2}{\left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2 + Q_p^2 \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2}. \quad (8)$$

Прирівнявши вираз (8) до нуля, знаходимо значення "паралельного" параметра якості контура, при якому потужність лампи досягає свого максимального значення:

$$Q_{p \text{ макс}} = \frac{\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}}{1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}}. \quad (9)$$

Підставивши (9) в (5), знаходимо максимальну потужність на лампі:

$$P_{\text{макс}} = \frac{4U_0 \sin^2 \frac{\pi D}{2}}{\pi^2 Z_p \left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}\right) \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)}. \quad (10)$$

Відносна зміна потужності лампи в процесі її експлуатації:

$$\delta P = \frac{P_{\text{макс}} - P}{P} = \frac{Q_p^2 \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2 + \left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2}{2Q_p \left(\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}\right) \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)}. \quad (11)$$

З виразу (7) знаходимо параметр якості Q_{p0} на початку експлуатації лампи, підставивши в (7) номінальне значення амплітуди напруги $U_{\text{лном}}$ лампи та знехтувавши членом $\alpha Q_p \frac{\omega}{\omega_p} \ll 1$:

$$Q_{p0} = \frac{\Omega - \frac{C_p}{\Omega C_s}}{\sqrt{\left(\frac{4U_0}{\pi U_{\text{лном}}}\right)^2 \sin^2 \frac{\pi D}{2} - \left(1 - \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{\Omega C_s}\right)^2}}. \quad (12)$$

II міжнародна науково-технічна конференція

Підставивши (12) у вираз (11), можна отримати рівняння щодо відносної робочої частоти Ω :

$$A^4 - A^2 \left(\frac{4U_0}{\pi U_{\text{лном}}} \sin \frac{\pi D}{2} \right)^2 + \left(\frac{4U_0}{\pi U_{\text{лном}}} \sin \frac{\pi D}{2} \right)^4 \frac{1}{4(\delta P + 1)^2} = 0, \quad (13)$$

де $A = 1 + \alpha - \Omega + C_p/C_s$, розв'язок якого визначає оптимальну відносну частоту, при якій забезпечується зміна потужності в заданих межах δP в процесі експлуатації лампи:

$$\Omega_{\text{опт}} = \sqrt{1 + \alpha + \frac{C_p}{C_s} + \frac{4U_0}{\pi U_{\text{лном}}} \left(\sin \frac{\pi D}{2} \right)} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{(\delta P)^2 + 2\delta P}{2(\delta P + 1)}}. \quad (14)$$

Для зменшення реактивної складової ВЧ потужності ЕПРА необхідно узгодити між собою коефіцієнт заповнення D і кут зсуву фаз між напругою та струмом першої гармоніки резонансного контура. Як видно з рис.3, на інтервалі $(t_3 \div t_4)$ полярності прикладеної прямокутної напруги $u_{ав}$ і першої гармоніки струму i_1 є протилежними, тому потужність передається від контура до конденсатора C_0 , тобто потужність є реактивною. А це погіршує енергетичні показники каскаду. Проаналізувавши рис.3, можна знайти реактивну потужність Q :

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_{(1-D)\pi/2}^{\varphi} U_0 I_m \sin(\omega t - \varphi) d(\omega t) = \frac{U_0 I_m}{\pi} \left\{ \cos \left[\frac{(1-D)}{2} \pi - \varphi \right] - 1 \right\}. \quad (15)$$

Якщо зменшити інтервал $(t_3 \div t_4)$, відповідно підбравши коефіцієнт заповнення D , то реактивна потужність може бути зменшена до нуля. Але, враховуючи розкид параметрів схеми та зміну опору лампи в процесі експлуатації, необхідно передбачити запас ΔD , щоб гарантувати умову комутації транзисторів при нульовій напрузі.

Тому мінімальне значення $D_{\text{мін}}$ коефіцієнта заповнення (без запасу ΔD) можна визначити з виразу (15):

$$\varphi = \frac{1 - D_{\text{мін}}}{2} \pi, \quad (16)$$

звідки витікає вираз для коефіцієнта заповнення:

$$D_{\text{мін}} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \varphi = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{2 \left(1 + \alpha - \Omega^2 + \frac{C_p}{C_s} \right) - (1 + \alpha)}{1 + \alpha}, \quad (17)$$

де арктангенс наведено для кута зсуву фаз, визначеного в результаті перетворень виразу (3).

Підставивши значення оптимальної відносної частоти (14) у вираз (17) можна одержати значення коефіцієнта заповнення, при якому реактивна потужність вихідного каскаду ЕПРА буде дорівнювати нулю:

$$D_{\min} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \left[\frac{8U_0 \sin \frac{\pi D}{2}}{(1+\alpha)\pi U_{\text{лн.ом}}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{(\delta P)^2 + 2\delta P}}{2(\delta P + 1)}} - 1 \right]. \quad (18)$$

Одержані вирази дозволяють розрахувати оптимальні значення параметрів Ω_{opt} і D_{\min} , які гарантують роботу НЛВТ у допустимих межах за потужністю та при мінімальній реактивній потужності в мостовому інверторі. При цьому забезпечується умова комутації транзисторів при нульовій напрузі на них.

Висновки

Аналіз високочастотного електронного пускорегулюючого апарата, який складається з двох почергово працюючих підвищувальних перетворювачів постійної напруги в режимі переривчастих струмів та мостового інвертора з послідовним резонансним контуром, показує можливість оптимального вибору робочої частоти апарата, при якій резонансний контур апарата забезпечує підтримання потужності лампи в області допустимих значень у процесі її старіння. Встановлено умову мінімізації реактивної потужності вихідного каскаду апарата. Такий підхід дозволить збільшити термін експлуатації натрієвої лампи та підвищити коефіцієнт корисної дії апарата. Вирази, отримані на основі оптимізації каскаду за потужністю та коефіцієнтом заповнення, служать основою для розробки методики вибору параметрів схеми ЕПРА.

The high-frequency single-stage electronic ballast is analyzed. The ballast consist of the integration of two interleaving boost converters in discontinuous conduction mode and full-bridge series resonant inverter. The ballast operating frequency is optimized for lamp power maintaining in permitted bound area during its aging. The condition of ballast output stage reactive voltamperes minimum is established.

Література

1. C.Branas, F.I.Azcondo, S.Bracho. Contributions to the Design and Control of LCsCp Resonant Inverters to Drive High-Power HPS Lamps.// IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 47, No. 4, 2000, pp.796÷808.
2. W. Kaiser. Hibrid Electronic Ballast Operating the HPS Lamp at Constant Power.//IEEE Transactions on Industry Applications Vol.34, No.2, 1998, pp.319-324.
3. А.М. Лупенко. Електронний пускорегулюючий апарат. Деклараційний патент України на корисну модель. №7819. Опубл. бюл. №7 від 15.07.2005.
4. С.К.Тse. Circuit theory of power factor correction in switching converters. // International Journal of Circuit theory and Application. Vol.31, No.2, 2003, pp.157÷198.

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКТИВНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ ДРОСЕЛІВ ДЛЯ РОЗРЯДНИХ ЛАМП

В статті описано метод розрахунку оптимальних баластних дроселів для розрядних ламп низького та високого тиску з виведенням оригінальних формул, відтворенням характеристик, пов'язаних із температурними режимами дроселів (робочим і аварійним), і залежностей безрозмірних коефіцієнтів від заданого параметра мінімізації. Описано методику розрахунку при заданих розмірах пластин магнітопроводу та при наявності обмежень поперечного перерізу.

Умовні позначення

- a*** – ширина осердя магнітопроводу, см;
b – товщина набору пластин магнітопроводу, см;
c – ширина вікна магнітопроводу, см;
h – висота вікна магнітопроводу, см;
L₁ – ширина дроселя, см;
L₂ – висота дроселя, см;
V – об'єм активних матеріалів, см³;
X – параметр мінімізації;
m, n, ε – безрозмірні геометричні коефіцієнти;
K_m – коефіцієнт заповнення вікна магнітопроводу міддю;
K_з – коефіцієнт заповнення пакета магнітопроводу сталлю;
j – густина струму в обмотці, А/мм²;
d, d_{із} – діаметр проводу обмотки без ізоляції і з ізоляцією відповідно, мм;
W – кількість витків обмотки;
B_m, B_{m ав} – магнітна індукція в осерді магнітопроводу в робочому і аварійному режимах відповідно, Тл;
H_m, H_{m ав} – напруженість магнітного поля в осерді магнітопроводу в робочому і аварійному режимах відповідно, А/м;
H_{др} – напруженість магнітного поля в дроселі, А/м;
G_{др} – маса активних матеріалів дроселя, кг;
G_{ств} G_{об} – маса магнітопроводу та обмотки котушки дроселя відповідно, кг;
P_{др} – потужність втрат у дроселі, Вт;
P_{ств} P_{об} – втрати потужності в магнітопроводі та обмотці котушки дроселя відповідно, Вт;
P_{др доп} – допустима потужність втрат у дроселі, Вт;
P_{1,0f} – питомі втрати потужності в сталі при індуктивності 1 Тл і на заданій частоті *f*, Вт;
p_{об} – питомі втрати потужності в обмотці котушки дроселя, Вт;
p_{об роб} – питомі втрати потужності в обмотці котушки дроселя в робочому режимі, Вт;
P_л – потужність лампи, Вт;
Z_б – вартість активних матеріалів без урахування відходів при штампуванні, грн/кг;

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Z_c	– вартість активних матеріалів з урахуванням відходів при штампуванні, грн/кг;
$Z_{ст}, Z_{об}$	– питома вартість сталі та матеріалу обмотки відповідно, грн/кг;
$l_{нов}$	– довжина повітряного зазору, см;
$l_{ст}$	– довжина середньої силової лінії магнітопроводу, см;
l_m	– довжина середнього витка обмотки котушки, см;
$S_{відкр}$	– величина площі відкритої поверхні, з якої відбувається охолодження дроселя, см ² ;
α_{ef}	– ефективний коефіцієнт тепловіддачі при вільній конвекції, Вт/(см ² ·°C);
K_T	– коефіцієнт, який характеризує перепад температури від внутрішніх шарів обмотки до поверхні котушки;
$\Delta T_{об}$	– температура перегрівання обмотки котушки, °C;
$\Delta T_{ст}$	– температура перегрівання сталі, °C;
$U_{др}$	– напруга на дроселі, В;
I	– струм дроселя, А;
K_I, K_U	– коефіцієнти кратності струму і напруги відповідно;
$K_{I ав}, K_{U ав}$	– коефіцієнти кратності струму і напруги відповідно в аварійному режимі;
K_ϕ	– коефіцієнт форми кривої напруги;
f	– частота живлення, Гц;
$g_{об}, g_{ст}$	– коефіцієнти, які залежать лише від безрозмірних коефіцієнтів m, n, ϵ ;
$\gamma_{ст}, \gamma_{об}$	– густина сталі і матеріалу обмотки, г/см ³ .

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Останнім часом однією з основних проблем у нашій країні і взагалі у світі є проблема економії енергетичних ресурсів, у тому числі й електроенергії [1]. З огляду на це, перед ученими постала задача створення енергоекономічних споживачів, зокрема освітлювальних установок, досягти чого можна, використовуючи високоефективні розрядні джерела світла. Для стабілізації роботи таких джерел необхідні пускорегулюючі апарати (ПРА), обов'язковою складовою яких є баластний дросель (БД).

Розробка методу розрахунку оптимальних БД є складною і на сьогоднішній день до кінця не вирішеною проблемою.

Постановка проблеми полягає в створенні економічних БД для розрядних ламп (освітлювальних установок). Проблема ця очевидна і в теперішній час її намагаються вирішити шляхом розробки електронних ПРА, невід'ємним елементом яких є знову ж таки баластний дросель, магнітопровід якого виготовляють не з електротехнічних сталей, а з феритів, пермалоїв і т.п.

Основні втрати потужності, які визначають ККД світлових приладів, в схемах з розрядними лампами зосереджені в баластних дроселях, тому створення оптимальних (енергоекономічних) БД – це складне теоретичне питання, яке безумовно потребує свого вирішення.

Проектування дроселів з оптимальними конструктивними параметрами, які б задовольняли вимогам [2, 3], дозволить заощадити магнітні і провідникові матеріали, електроенергію та скоротити час на

II міжнародна науково-технічна конференція

розробку й впровадження виробу у виробництво, що допоможе динамічно реагувати на потреби ринку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні існує два основних методи конструктивного розрахунку БД, які дозволяють проектувати як оптимальні дроселі, так і дроселі з певними обмеженнями геометричних розмірів. Ці методи детально описані в [4,5].

Метод, запропонований в [4], не дозволяє врахувати специфічні умови роботи дроселів в колах з розрядними лампами, які є нелінійними елементами і характеризуються не тільки робочим режимом, але і пусковим, БД також повинні витримувати тривалий час такі аварійні режими, як тривалий пусковий та випрямляючий.

В [5] описана методика розрахунку БД, яка розроблена з врахуванням всіх можливих режимів роботи розрядних ламп. Однак похибки при використанні цього методу розрахунку досить значні і в окремих випадках сягають 20 %. Тому розраховані дроселі мають помітно збільшену масу і невідповідні розміри, що добре видно з табл. 1, де наведені результати розрахунків при заданих розмірах пластин магнітопроводу a , c , h (пояснення до позначень див. рис. 1–3). Це, в свою чергу, збільшує трудомісткість експериментального доведення параметрів БД до вимог [2, 3] перед впровадженням їх у серійне виробництво.

Таблиця 1

Конструктивні параметри дроселя для люмінесцентної лампи потужністю 40 Вт, розрахованого при заданих розмірах пластин магнітопроводу

Параметр	a, см	b, см	c, см	h, см	K_m	$j, A/m^2$	d, м	W, шт	$V_m, Tл$	$G_{др}, кг$	$P_{др}, Вт$
Випускається на ВАТ «Ватра»	1,28	5,4	0,66	1,7	0,53	5,94	0,30	835	1,397	0,4459	9,50
Отриманий у результаті розрахунку за [4]	1,33	12,27	0,68	1,76	0,53	2,64	0,45	399	1,24	1,061	7,46
Розрахований за новою методикою	1,28	5,63	0,66	1,7	0,53	5,94	0,30	835	1,34	0,464	9,47

Постановка завдання. Розробити більш досконалий метод розрахунку оптимальних БД з виводом оригінальних формул, відтворенням характеристик, пов'язаних з температурними режимами дроселів, і залежностей безрозмірних коефіцієнтів від заданого параметра мінімізації, створити методику розрахунку при заданих розмірах пластин магнітопроводу та при наявності обмеження поперечного перерізу, які б з більш високою точністю дозволяли

розраховувати конструктивні параметри БД. На основі розробленого методу створити алгоритм розрахунку та відповідне програмне забезпечення.

Виклад основного матеріалу. Оскільки для виготовлення дроселів останнім часом використовуються матеріали з покращеним ефективним коефіцієнтом тепловіддачі при вільній конвекції α_{ef} , то його слід розраховувати в залежності від потужності лампи P_d і допустимої температури перегрівання ΔT у робочому й аварійному режимах за такими формулами:

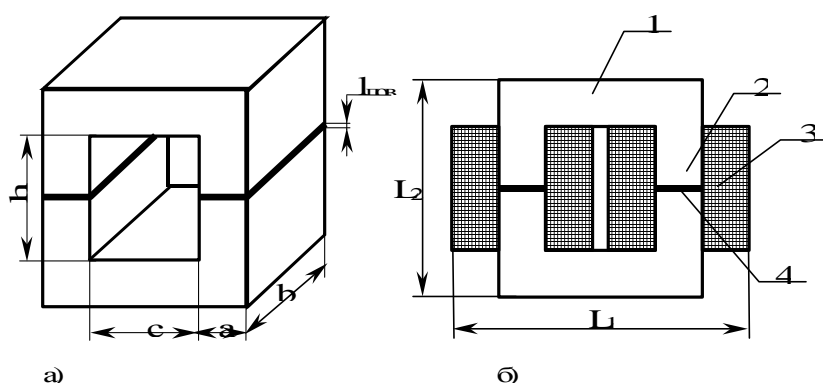


Рис. 1. Магнітопровід (а) і поперечний переріз дроселя серцевої магнітної системи з двома кошками (б): 1—ядро магнітопроводу; 2—серця магнітопроводу; 3—кошка; 4—повітряний зазор

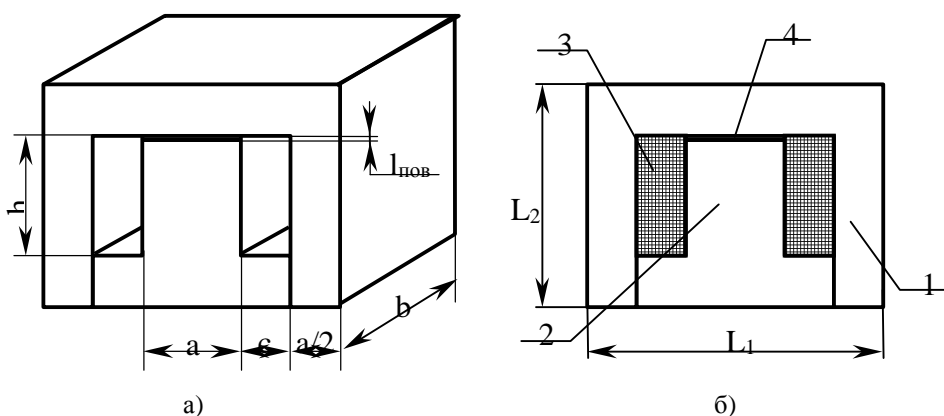


Рис. 2. Магнітопровід (а) і поперечний переріз дроселя броньової магнітної системи (б)

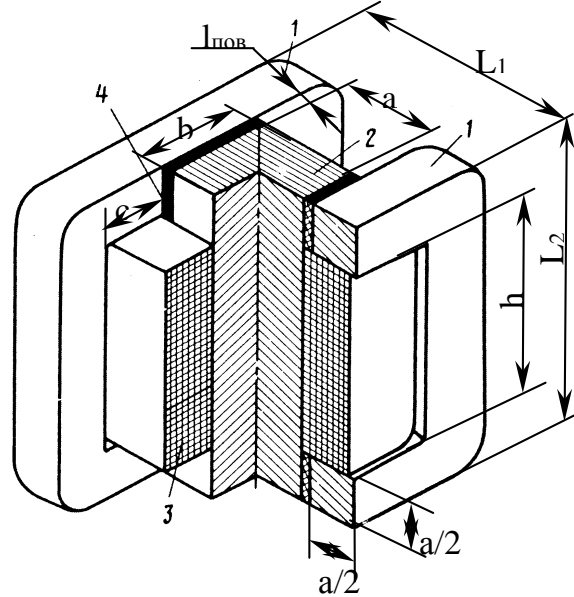


Рис. 3. Дросель просторової магнітної системи

для металевої основи

$$\alpha_{ef} = (k_{\alpha} \cdot \Delta T + b_{\alpha}) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

для неметалевої основи

$$\alpha_{ef} = (k_{\alpha} \cdot \Delta T + b_{\alpha} - 0,05612) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де

$$k_{\alpha} = 0,004001 + \left[\frac{233,021 - S_{відкр}}{17,091 \cdot 10^9} \right]^{1/3}, \quad (3)$$

$$b_{\alpha} = 1,5059 + \frac{36,6215}{S_{відкр} - 48,9042}. \quad (4)$$

Значення $S_{відкр}$ залежить від потужності лампи і може бути визначене за такою формулою

$$S_{відкр} = 2,1818 \cdot P_{л} + 76,368. \quad (5)$$

Якщо $k_{\alpha} < 0,0005$, то варто прийняти $k_{\alpha} = 0,0005$.

При визначенні коефіцієнта K_T , що характеризує перепад температури від внутрішніх шарів обмотки до поверхні котушки, варто

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

використовувати криві, наведені в РТМ 16.682.043–74 (або в [5]), але врахувати, що для просочених котушок величина K_T в чотири рази менше і знаходиться в діапазоні $0,025 \leq K_T \leq 0,075$. Це пов'язано з удосконаленням технології просочування котушок і також з тим, що сучасні матеріали, які використовують для просочення, краще проводять тепло, за рахунок чого зменшується перепад температури від внутрішніх шарів обмотки до поверхні.

При описі границі області допустимих значень магнітної індукції B_m і густини струму j при обмеженні за допустимими втратами і за температурним режимом дреселя в робочому й аварійному режимах, рівняння найкраще подати в полярній системі координат.

При обмеженні за допустимими втратами для побудови залежності $B_{m.sp.} = f(j_{sp})$ необхідно попередньо розрахувати коефіцієнти:

$$D1 = 22,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{U_{dp} \cdot I}{K_{\phi} \cdot f} \right)^{3/4} \cdot K_m^{1/4} \cdot K_3^{-3/4} \cdot g_{ob} \cdot \gamma_{ob} \cdot P_{ob}, \quad (6)$$

$$D2 = 22,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{U_{dp} \cdot I}{K_{\phi} \cdot f} \right)^{3/4} \cdot K_3^{1/4} \cdot K_m^{-3/4} \cdot g_{cm} \cdot \gamma_{cm} \cdot P_{1,0/f}, \quad (7)$$

а потім значення B_m і j :

$$B_m = \left(\frac{P_{dp.don} \cdot \sin^3 \varphi \cdot \cos^3 \varphi}{D1 \cdot \sin^8 \varphi + D2 \cdot \cos^8 \varphi} \right)^2 \cdot \cos^4 \varphi, \quad (8)$$

$$j = \left(\frac{P_{dp.don} \cdot \sin^3 \varphi \cdot \cos^3 \varphi}{D1 \cdot \sin^8 \varphi + D2 \cdot \cos^8 \varphi} \right)^2 \cdot \sin^4 \varphi, \quad (9)$$

де кут φ змінювати від 90° до 0° .

При обмеженнях за допустимою температурою перегрівання обмотки для побудови залежності $B_{m.sp.} = f(j_{sp})$ необхідно попередньо визначити коефіцієнт C_{ob} , який характеризує розміри поверхні охолодження обмотки:

для вмонтованих апаратів, призначених для установки в корпусі світлових приладів:

$$1: C_{ob} = \frac{n^{1/2}}{m} \left[\frac{2 \cdot (2 \cdot m + 1)}{n \cdot (\varepsilon - 1)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{n} + \pi \cdot m^2 \cdot (\varepsilon - 1)^2 + 2 \cdot m \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (2 \cdot m + 1) \right];$$

$$2: C_{ob} = \frac{n^{1/2}}{m} \left[2 \cdot m \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1) + \frac{2 \cdot (2 \cdot m + 1)}{n \cdot (\varepsilon - 1)} + 4 \cdot m^2 \cdot \varepsilon + \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{n} + 4 \cdot m^2 \cdot (\varepsilon - 1) + 2 \cdot \pi \cdot m^2 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \right]; \quad (10)$$

де цифрами позначені типи систем магнітопроводів (МГП):

II міжнародна науково-технічна конференція

1 – стержнева штампована з двома катушками;

2 – броньова штампована.

Тоді:

$$j = 22,007 \cdot \left[\frac{K_\phi \cdot f \cdot K_3}{U_{\partial p} \cdot I \cdot K_M^3} \right]^{1/7} \left[\frac{\Delta T_{об} \cdot \alpha_{ef} \cdot (1 - K_T) \cdot C_{об}}{g_{об} \cdot \gamma_{об} \cdot P_{об} \cdot K_I^2} \right]^{4/7} \cdot B_m^{1/7}. \quad (11)$$

Щоб врахувати обмеження за перегріванням матеріалу МГП, необхідно попередньо визначити коефіцієнт C_{cm} :

$$\begin{aligned} 1: C_{cm} &= 2 \cdot n^{1/2} [(\varepsilon + 3) + 2 \cdot m \cdot (\varepsilon + 1)]; \\ 2: C_{cm} &= 2 \cdot n^{1/2} \left[\frac{m+1}{n \cdot m \cdot (\varepsilon - 1)} + 2 \cdot m \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon + 1 \right]; \end{aligned} \quad (12)$$

а тоді

$$B_m = 22,007 \cdot \left[\frac{K_\phi \cdot f \cdot K_M}{U_{\partial p} \cdot I \cdot K_3^3} \right]^{1/7} \cdot \left[\frac{\Delta T_{cm} \cdot \alpha_{ef} \cdot C_{cm}}{g_{cm} \cdot \gamma_{cm} \cdot P_{1,0/f} \cdot K_U^2} \right]^{4/7} \cdot j^{1/7}. \quad (13)$$

Для апаратів незалежного виконання, які встановлюються окремо від світлового приладу, спочатку визначаємо значення коефіцієнта M :

$$\begin{aligned} 1: M &= n^{1/2} \left[2 \cdot (\varepsilon + 3) + \frac{4 \cdot (m+1)}{n \cdot m \cdot (\varepsilon - 1)} + 4 \cdot m \cdot (\varepsilon + 1) + \frac{2 \cdot \pi}{n} + 4 \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (m+1) + \pi \cdot m \cdot (\varepsilon - 1)^2 \right]; \\ 2: M &= n^{1/2} \left[2 \cdot (2 \cdot \varepsilon + 1) + \frac{4 \cdot (m+1)}{n \cdot m \cdot (\varepsilon - 1)} + 4 \cdot m \cdot \varepsilon + \frac{2 \cdot \pi}{n} + 4 \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (m+1) + 2 \cdot \pi \cdot m \cdot (\varepsilon - 1)^2 \right]; \end{aligned} \quad (14)$$

тоді:

$$\Delta \bar{T} = \Delta T_{об} \cdot \alpha_{ef} \cdot (1 - K_T) \cdot M; \quad (15)$$

потім значення коефіцієнтів $M1, M2$:

$$M1 = 4,472 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\frac{U_{\partial p} \cdot I \cdot K_M^3}{K_\phi \cdot f \cdot K_3} \right]^{1/4} \cdot g_{об} \cdot \gamma_{об} \cdot P_{об} \cdot K_I^2; \quad (16)$$

$$M2 = 4,472 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\frac{U_{\text{оп}} \cdot I \cdot K_3^3}{K_\phi \cdot f \cdot K_M} \right]^{1/4} g_{cm} \cdot \gamma_{cm} \cdot P_{1,0/f} \cdot K_U^2; \quad (17)$$

і конкретні значення j і B_m :

$$j = \left[\frac{\Delta \bar{T}_{\text{об}} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{M1 \cdot \sin^8 \varphi + M2 \cdot \cos^8 \varphi} \right]^{2/3} \cdot \sin^4 \varphi; \quad (18)$$

$$B_m = \left[\frac{\Delta \bar{T}_{\text{об}} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{M1 \cdot \sin^8 \varphi + M2 \cdot \cos^8 \varphi} \right]^{2/3} \cdot \cos^4 \varphi. \quad (19)$$

При врахуванні обмежень за температурним режимом узято до уваги те, що обмотка (при щільному приляганні до поверхні МГП) охолоджується не тільки зовнішньою поверхнею, але і поверхнею МГП за рахунок теплопередачі між обмоткою і МГП. Це дозволяє збільшити значення граничної густини струму. Збільшення густини струму, у свою чергу, приводить до економії матеріалів і дозволяє зменшити габаритні розміри ПРА.

Побудова залежності $j_{zp} = f(B_{m,zp})$ при обмеженні за заданою кратністю пускового струму здійснюється за формулою:

$$j_{zp} = 0,252 \cdot 10^{-5} \cdot g_{cm}^{4/3} \left[\frac{H_{m,av} - K_{U,av} \cdot H_m}{K_{I,av} - K_{U,av}} \right]^{4/3} \left[\frac{K_\phi \cdot f}{U_{\text{оп}} \cdot I} \right]^{1/3} \frac{K_3^{1/3}}{K_M} \cdot B_m. \quad (20)$$

Значення H_m і $H_{m,av}$ визначаються з виразів, що апроксимують основні криві намагнічування електротехнічних сталей для значень B_m і $B_{m,av}$ відповідно, де $B_{m,av} = K_{U,av} \cdot B_m$ [6].

Після визначення основних геометричних параметрів БД необхідно уточнити значення магнітної індукції B_m і напруженості магнітного поля H_m , оскільки при введенні в МГП повітряного зазору крива намагнічування БД істотно відрізняється від основної кривої намагнічування. Тому спочатку розраховуємо значення $H_{\text{оп}}$ за формулою:

$$H_{\text{оп}} = \sqrt{2} \cdot I \cdot W / l_{cm}. \quad (21)$$

Потім визначаємо значення B_m і j за методикою, описаною в [6], для дроселя з повітряним зазором, після чого розраховуємо основні геометричні параметри БД (d , W , a , b , c , h , $l_{\text{нов}}$) за формулами, наведеними в [5].

Економічні показники баласту варто визначати з рівнянь:

$$1: l_m = 2 \cdot (a + b) + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{W \cdot d_{i3}}{\text{ціла частина від } [h/d_{i3}]}, \quad (22)$$

$$2: l_m = 2 \cdot (a + b) + \pi \cdot \frac{W \cdot d_{i3}}{\text{ціла частина від } [h/d_{i3}]},$$

$$G_{cm} = 10^{-3} \cdot l_{cm} \cdot a \cdot b \cdot \gamma_{cm} \cdot K_3, \quad (23)$$

$$G_{ob} = 10^{-3} \cdot l_m \cdot W \cdot \gamma_{ob} \cdot \frac{\pi \cdot (0,1 \cdot d)^2}{4}, \quad (24)$$

$$G_{op} = G_{cm} + G_{ob}, \quad (25)$$

$$P_{cm} = G_{cm} \cdot p_{1,0/f} \cdot B_m^2, \quad (26)$$

$$P_{ob} = G_{ob} \cdot p_{ob\text{ роб}} \cdot j^2, \quad (27)$$

$$P_{op} = P_{cm} + P_{ob}. \quad (28)$$

Разом з цим пропонуємо нові залежності оптимальних співвідношень конструктивних параметрів від величини параметра мінімізації для штампованих і витих МГП різних конструкцій, що дозволяє розраховувати оптимальні БД при різних параметрах мінімізації (рис.4). Оптимальні значення безрозмірних коефіцієнтів m , n і ε визначалися в такий спосіб. Спочатку для дроселів різних потужностей з різними коефіцієнтами заповнення вікна магнітопроводу для різних магнітних систем розраховувалися коефіцієнти X для різних параметрів мінімізації (мінімальна вага, мінімальний об'єм, мінімальна вага й об'єм, мінімальна вартість магнітних матеріалів). Потім проводилася серія розрахунків дроселя при зміні безрозмірних коефіцієнтів від $m = 0,15$; $n = 0,5$; $\varepsilon = 1,3$ до $m = 1$; $n = 15$; $\varepsilon = 4,9$ із кроком $\Delta m = 0,01$; $\Delta n = 0,1$; $\Delta \varepsilon = 0,04$. Граничні значення безрозмірних коефіцієнтів вибиралися з практичних міркувань і технологічних можливостей. У процесі розрахунків визначалися мінімальні значення параметрів мінімізації і запам'ятовувалися коефіцієнти m , n , ε . У результаті були отримані ряд значень X і відповідні їм значення m , n , ε , при яких досягалися мінімальні значення параметрів, що оптимізуються, і на графіках залежностей m , n , ε від X координати цих значень відзначалися крапками. Потім у результаті апроксимації поліноміальною функцією були отримані криві залежностей оптимальних значень безрозмірних коефіцієнтів m , n , ε від коефіцієнта X . Порядок розрахунку скорочено

показано на блок-схемі (рис. 5). Поліноміальна функція обрана тому, що точність апроксимації такою функцією досить висока 0,7 – 0,96. При апроксимації степеневою, логарифмічною або експонентною функцією точність апроксимації в даному випадку не перевищує 0,05. Перевірочальні розрахунки показали, що відносна похибка розрахункових і дійсних значень не перевищує 9%. У таблиці 2 наведений порівняльний аналіз відносної похибки при розрахунку оптимального БД для РЛ типу ДНаТ потужністю 400 Вт і значеннях коефіцієнта заповнення вікна магнітопроводу міддю $K_m=0,484$; коефіцієнта заповнення пакета магнітопроводу сталлю $K_s=0,95$; вартості матеріалу обмотки $z_{об}=23,4$ грн/кг; вартості сталі $z_{ст}=3,1$ грн/кг за допомогою кривих, згідно з [5], і отриманих нами кривих.

Нами також розроблена методика для розрахунку БД при наявності обмежень поперечного перерізу і при наявності заданих розмірів штампу.

При обмеженнях поперечного перерізу дроселя початкові значення параметрів m і ε вибираються за графіками рис. 4 у залежності від параметра X , а параметр n розраховується за формулами (29):

$$\begin{aligned} 1: \quad n &= \frac{L_1}{2 \cdot m \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (\varepsilon \cdot L_2 - L_1)}; \\ 2: \quad n &= \frac{L_1}{m \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot L_2 - L_1)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Проводимо розрахунок. Потім перераховуємо параметр m за формулою $m_{i+1} = \frac{L_1' \cdot L_2'}{L_1 \cdot L_2} \cdot m_i$, де L_1' , L_2' і L_1 , L_2 - розрахункові і задані

розміри поперечного перерізу відповідно, а параметр n розраховуємо за формулами (29). При новому значенні коефіцієнтів m і n знову проводимо розрахунок. Значення коефіцієнтів m і n перераховуємо доти, поки наступне значення буде відрізнятися від попереднього не більше чим на задану величину похибки Δ .

При заданих розмірах пластин магнітопроводу параметр ε розраховується за розмірами пластини a і c , початкове значення параметра m вибирається за графіками рис. 4 у залежності від параметра X , а параметр n розраховується за формулою:

$$n = \frac{a^2}{c \cdot h \cdot m}, \quad (30)$$

де a , c , h - задані розміри магнітопроводу.

II міжнародна науково-технічна конференція

Проводимо розрахунок. Потім перераховуємо параметр m за формулою $m_{i+1} = \frac{L_1' \cdot L_2'}{L_1 \cdot L_2} \cdot m_i$, а параметр n розраховуємо за формулою

(30). Перерахунок проводиться в такий же спосіб, як і у випадку, викладеному вище, при обмеженні поперечного перерізу.

Відмінності запропонованого нами методу розрахунку баластних дроселів при наявності обмежень поперечного перерізу і заданих розмірів пластин магнітопроводу від методу, запропонованого в [5], полягає в тому, що при розрахунку за методом [5] при заданих розмірах пластин магнітопроводу коефіцієнти m і n не перераховуються, а варіюється товщина набору пластин, проводяться розрахунки і за графіками вибираються найкращі економічні показники. При обмеженні поперечного перерізу коефіцієнти m і ε зв'язані між собою деяким співвідношенням, а коефіцієнтом n необхідно варіювати. У нашому методі при заданих розмірах пластин магнітопроводу запропоновані формули для перерахування коефіцієнтів m і n . При обмеженні поперечного перерізу коефіцієнти m і n зв'язані між собою і перераховуються за певними формулами, а коефіцієнт ε вибирається за графіками в залежності від параметра мінімізації. Як показали дослідження, це дозволяє знизити похибку розрахунків з 5 % по [5] до 0,1 %, що є безсумнівною перевагою (див. табл. 1).

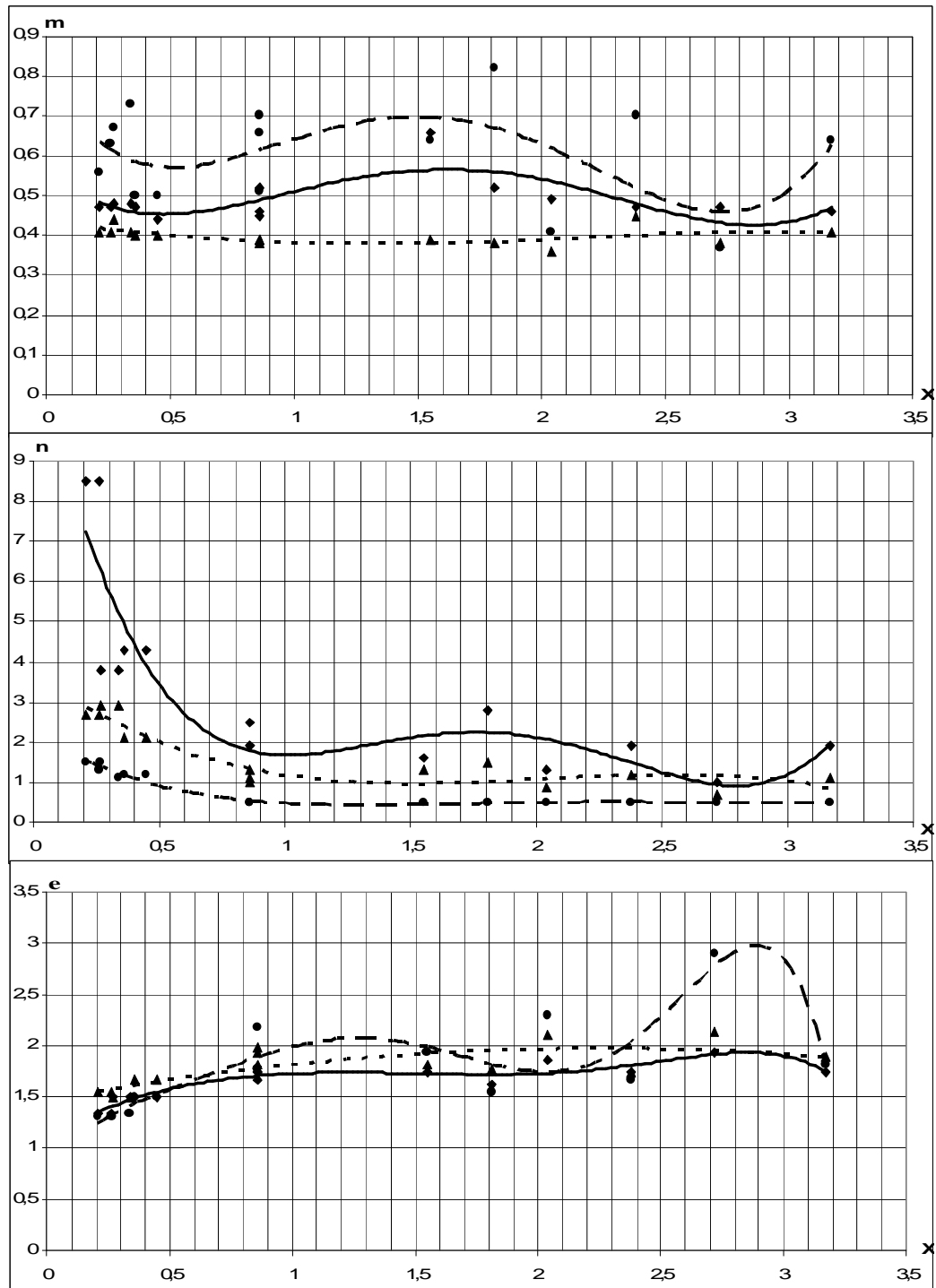


Рис.4. Залежність безрозмірних коефіцієнтів m , n і e від параметра мінімізації X для різних систем магістральних кабелів

Дійсні значення:

●●●●

▲▲▲▲

◆◆◆◆

- стержень з двома когунками -
- стержень з однією когункою -
- фронтова -

Апроксимуючі криві:

- · - · -

—————

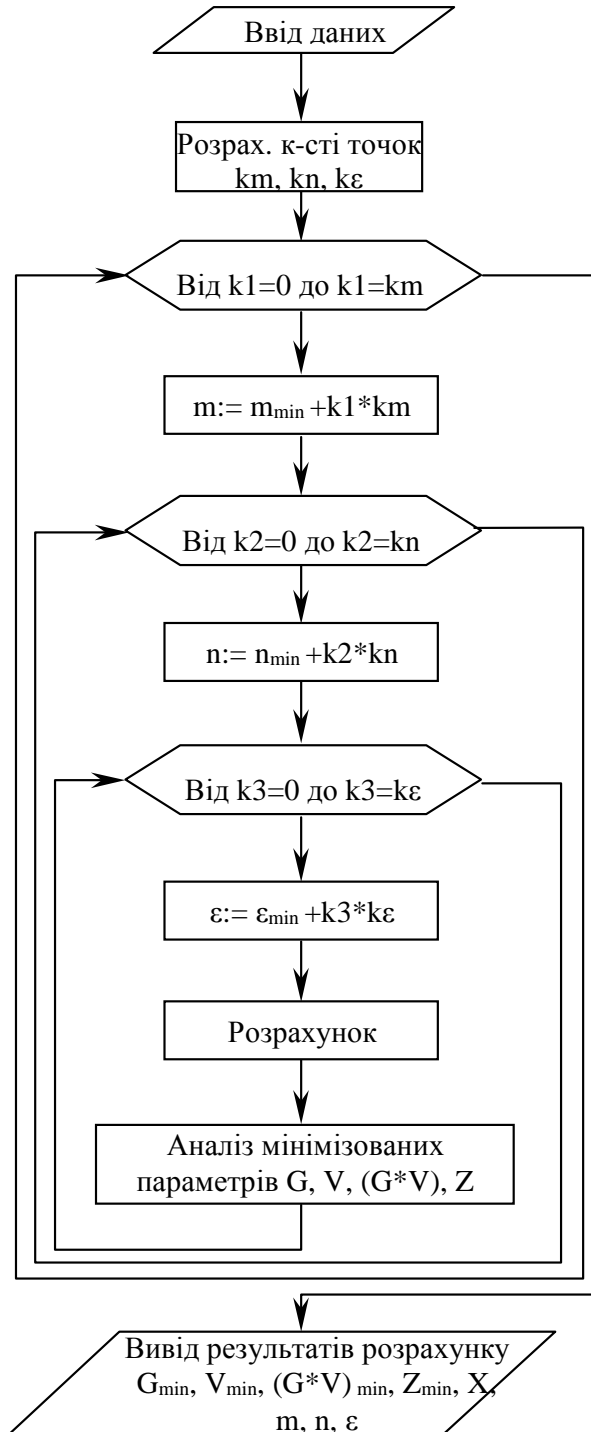


Рис. 5. Блок-схема визначення оптимальних значень безрозмірних коефіцієнтів m , n і ε

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Висновки. Використання запропонованого нами методу конструктивного розрахунку оптимальних БД, а також методик розрахунку при заданих розмірах пластин магнітопроводу та при наявності обмеження поперечного перерізу дозволяє зменшити час і збільшити точність розрахунку більше ніж в два рази. Це сприяє скороченню процесу впровадження у виробництво сконструйованих ПРА за рахунок скорочення термінів випробувань, підвищує конкурентну здатність вітчизняних виробів на ринку.

Таблиця 2

Аналіз відносної похибки при розрахунку оптимального БД
для РЛ типу ДнаГ – 400

Показник мінімізації	Параметр мінімізації X	m	n	ε	Знач. показн. мінімізації	Відносна похибка, %
Броньова магнітна система						
Дійсні значення						
V, см ³	1,96	0,55	4,0	1,5	569,666	
G _{др} , кг	1,69	0,6	1,8	1,82	3,5142	
(G _{др} ·V), кг·см ³	0,86	0,6	1,7	1,7	2029,712	
Z _б , грн	0,22	0,47	6,1	1,42	22,8069	
Z _с , грн	0,28	0,47	6,1	1,42	25,4292	
За кривими згідно [3]						
V, см ³	1,96	0,375	0,884	2,162	676,412	18,73
G _{др} , кг	1,69	0,378	0,953	2,065	3,6780	4,66
(G _{др} ·V), кг·см ³	0,86	0,396	1,581	1,760	2389,174	17,71
Z _б , грн	0,22	0,475	5,106	1,312	25,3405	11,11
Z _с , грн	0,28	0,464	4,408	1,340	27,8412	9,48
За розрахованими кривими						
V, см ³	1,96	0,53	1,91	1,72	579,453	1,72
G _{др} , кг	1,69	0,569	1,91	1,71	3,5736	1,69
(G _{др} ·V), кг·см ³	0,86	0,496	2,16	1,71	2141,684	5,52
Z _б , грн	0,22	0,497	7,61	1,375	23,4187	2,68
Z _с , грн	0,28	0,469	6,0	1,42	27,6541	8,75
Стержнева магнітна система з двома котушками						
Дійсні значення						
V, см ³	1,96	0,68	0,5	1,62	722,815	
G _{др} , кг	1,69	0,56	0,5	2,02	4,2601	
(G _{др} ·V), кг·см ³	0,86	0,73	0,5	1,74	3101,660	
Z _б , грн	0,22	0,56	4,9	1,34	32,4690	
Z _с , грн	0,28	0,43	4,5	1,3	36,9306	
За кривими згідно [3]						
V, см ³	1,96	0,4	0,392	2,599	835,252	15,55
G _{др} , кг	1,69	0,4	0,427	2,492	4,6444	9,02

II міжнародна науково-технічна конференція

$(G_{др} \cdot V),$ кг·см ³	0,86	0,408	0,77	2,073	3599,596	16,05
Z _б , грн	0,22	0,459	2,765	1,435	37,9081	16,75
Z _с , грн	0,28	0,445	2,316	1,519	43,0376	16,54
За розрахованими кривими						
V, см ³	1,96	0,639	0,5	1,755	727,739	0,68
G _{др} , кг	1,69	0,689	0,467	1,902	4,3262	1,55
$(G_{др} \cdot V),$ кг·см ³	0,86	0,613	0,545	1,891	3306,847	6,61
Z _б , грн	0,22	0,630	1,52	1,3	34,6231	6,63
Z _с , грн	0,28	0,605	1,36	1,35	39,8711	7,96
Стержнева магнітна система з одною котушкою						
Дійсні значення						
V, см ³	1,96	0,45	1,3	1,78	653,022	
G _{др} , кг	1,69	0,44	0,9	2,06	3,9818	
$(G_{др} \cdot V),$ кг·см ³	0,86	0,45	1,3	1,78	2608,692	
Z _б , грн	0,22	0,44	2,4	1,58	33,4116	
Z _с , грн	0,28	0,42	2,0	1,66	36,2590	
За кривими згідно [3]						
V, см ³	1,96	0,294	0,629	2,481	752,317	15,2
G _{др} , кг	1,69	0,302	0,745	2,344	4,2490	6,71
$(G_{др} \cdot V),$ кг·см ³	0,86	0,331	1,176	1,977	2884,506	10,57
Z _б , грн	0,22	0,394	3,155	1,523	33,7165	0,91
Z _с , грн	0,28	0,380	2,737	1,579	36,6685	1,13
За розрахованими кривими						
V, см ³	1,96	0,388	1,066	1,969	689,857	5,64
G _{др} , кг	1,69	0,382	0,992	1,945	4,0841	2,57
$(G_{др} \cdot V),$ кг·см ³	0,86	0,39	1,35	1,77	2639,450	1,17
Z _б , грн	0,22	0,42	2,85	1,55	33,5398	0,38
Z _с , грн	0,28	0,41	2,60	1,6	36,5250	0,73

Перспективою подальших досліджень є модифікація цього методу розрахунку для баластних дроселів, магнітопрвід яких виготовляється не з електротехнічних сталей, а з преспорошків, „металевого скла”, пермалоїв та феритів різних марок, коли виникає потреба оптимізувати не тільки параметри, але і форму магнітопроводу для частот, які перевищують промислову, зокрема для електронних ПРА.

In given article settlement formulas and the characteristics, connected with a heat-conducting path, for calculation of constructive and economic parameters of ballast throttles are offered. Also new dependences of dimensionless factors m , n and ϵ from parameter of minimization X for calculation of optimum throttles are resulted, the design procedure of ballast throttles is considered at presence of restrictions of cross section and at presence of the set sizes of plates magnetic wire.

Література

1. Закон України про енергозбереження. Енергозбереження: законодавство та норми. Збірник №1. – Николаев : ЮИКК, 1998. – С. 9–14.
2. ГОСТ Р МЭК 920 – 97. Аппараты пускорегулирующие для трубчатых люминесцентных ламп. Общие требования и требования безопасности. – М.: Госстандарт России, 1997. – 50 с.
3. ГОСТ Р МЭК 921 – 97. Аппараты пускорегулирующие для трубчатых люминесцентных ламп. Требования к рабочим характеристикам. – М.: Госстандарт России, 1997. – 30 с.
4. Бамдас А. М., Савиновский Ю. А. Дроссели переменного тока радиоэлектронной аппаратуры (катушки со сталью). – М.: Советское радио, 1969. – 248 с.
5. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп/ А. Е. Краснопольский, В. Б. Соколов, А. М. Троицкий; Под общ. ред. А. Е. Краснопольского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
6. Тарасенко М. Г., Кудряшова А. В. Математичне моделювання основних кривих намагнічування електротехнічних сталей. //Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2000. – Том 5, №1. – С. 113–121.

Н. Гасвська, Я. Герій

*Тернопільський державний технічний університет імені
Івана Пулюя*

ФОТОМЕТРИЧНЕ ТІЛО В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ОПРОМІНЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З НЕСИМЕТРИЧНИМ СВІТЛОВИМ РОЗПОДІЛОМ

На основі експериментальних вимірювань побудовано фотометричні тіла опромінювальних пристроїв з несиметричним світловим розподілом. Запропоновано математичну модель ОП та розроблено програму розрахунку на комп'ютері опромінення довільної площини.

Світлотехнічний розрахунок опромінювальних установок (ОУ) за часту зводиться до визначення потужності джерел випромінювання (ДВ) в опромінювальному пристрої (ОП) по заданому параметру світлового поля (опромінення, об'ємна густина потоку випромінювання), або до визначення параметрів поля по заданому розташуванню ОП і відомій потужності ДВ.

У розрахунку опромінювальних установок (ОУ) з декількома опромінювальними пристроями (ОП) користуються просторовими кривими рівних значень відносного опромінення, побудованими в полярній системі координат [1,2]. Цей метод є громіздким і вимагає тривалої кропіткої праці. Крім того, точність такого розрахунку є невисокою, оскільки включає величини, які визначаються із графічного матеріалу. В зв'язку з широким впровадженням інформаційних технологій стало можливим не лише підвищити точність розрахунку, але і автоматизувати його. Для цього постає задача розробки методики і створення програмного забезпечення світлотехнічного розрахунку ОУ на ЕОМ [3-5].

Для розробки методики даного розрахунку ОУ на комп'ютері в першу чергу необхідно мати математичну модель опромінювального пристрою, в якій важлива роль відводиться світловому розподілу опромінювача. В даній роботі ставилась задача провести вимірювання розподілу світлового потоку декількох типових опромінювачів, побудувати їх фотометричні тіла, розробити математичну модель ОП, в якій би даний розподіл був би врахований, та запропонувати алгоритм світлотехнічного розрахунку на комп'ютері з врахуванням даної математичної моделі.

Випромінювальні елементи (джерела світла, світлові прилади) для яких співвідношення між їх розмірами і віддаллю до опромінювальної поверхні $\leq 20\%$ можна вважати точковими. Така умова виконується для ОУ, що використовуються в тепличних господарствах. При розрахунках опромінення довільно розташованої

елементарної поверхні dS від точкового ДВ користуються законом квадратів відстаней, який у векторній формі можна представити рівнянням:

$$E_c = \frac{I(\alpha) \cdot (\overline{AC} \cdot (-\vec{N}))}{|\overline{AC}|^3}, \quad (1)$$

де AC – вектор напрямлений від опромінювача, розташованого в точці A до вибраної точки світлового поля C , яку оточує елементарна поверхня dS ;

N – одиничний вектор нормалі до поверхні dS .

Світловий розподіл точкового джерела випромінювання найбільш повно описується фотометричним тілом, що являє собою поверхню утворену кінцями радіус-векторів сили випромінювання. У випадку круглосиметричного світлового розподілу сила випромінювання в будь-якому напрямку простору визначається кутом α , що відраховується від осі опромінювача. Для більшості світлових приладів з круглосиметричною діаграмою направленості світлового потоку $I(\alpha)$ задається у вигляді таблиці або графічно при зміні кута - $90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Світловий розподіл некруглосиметричних ОП задається залежністю сили випромінювання $I(\beta, \alpha)$ від кутів (β) в поперечній (екваторіальній) та (α) поздовжній (меридіальній) площинах і зображається графічно просторовим фотометричним тілом. При наявності двох площин симетрії у фотометричному тілі, азимутальний кут β задається в межах $0 \dots 90^\circ$, при одній площині симетрії — в межах $0 \dots 180^\circ$, при відсутності площини симетрії — $0 \dots 360^\circ$.

При світлотехнічних розрахунках ОУ для ОП з круглосиметричним фотометричним тілом виходили із експериментальної кривої світлового розподілу опромінювача, яку представляли аналітично. Аналітичний вираз $I(\alpha)$ отримувався за наступною схемою:

- за табличними експериментальними даними будувався графік $I(\alpha)$, який після цього оброблявся кубічним сплайном, що збільшувало число точок на графіку до заданого N ;
- за новими табличними даними, використовуючи метод апроксимації поліномом або рядом Фур'є, записувався аналітичний вираз $I(\alpha)$.

Згідно наведеної методики представимо $I(\alpha)$ у вигляді полінома:

$$I(\alpha) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n A_i \cdot \alpha^i, & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{cp} \\ 0, & \alpha > \alpha_{cp} \end{cases}, \quad (2)$$

де α_{cp} – граничний кут, для якого можна вважати $I(\alpha)=0$.

Кутовий розподіл сили випромінювання некруглосиметричного опромінювача $I(\beta, \alpha)$ отримувався експериментально на установці, схема якої показана на рис. 1. При цьому будь-який напрям вектора сили випромінювання задавався двома кутами: α — кутом повороту опромінювача відносно осі Е; β — кутом повороту опромінювача відносно осі F. Обидва кути змінювалися в межах $+90^\circ \dots -90^\circ$. Знак "+" брався тоді, коли поворот опромінювача відбувався за годинниковою стрілкою, якщо дивитися в сторону випромінювання ОП, а "-" — коли проти годинникової стрілки

Такі вимірювання були проведені для ряду світильників та широко-кутових прожекторів з кроком зміни кутів $\Delta\beta = 10^\circ$ і $\Delta\alpha = 5^\circ$. Результати експериментальних вимірювань подавалися у вигляді таблиць, в яких у відповідності до значень кутів β і α записувалися значення сили світла у заданому напрямку.

При складанні таблиць дотримувалися таких правил:

1) значення сили світла $I(\beta, \alpha)$ у табличних точках визначалися з однаковою похибкою, яка для даної гоніофотометричної установки дорівнювала 5%;

2) у таблиці подавалися лише ті значення сили світла, похибка кожного з яких не перевищувала 0.5 одиниці молодшого розряду експериментально отриманих величин.

Табличні дані служили основою для подальших світлотехнічних розрахунків на комп'ютері, згідно рівняння (1).

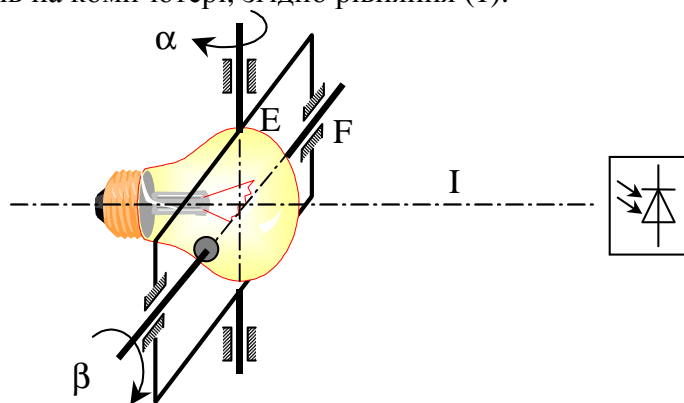


Рис.1. Схема гоніофотометричної установки для фотометрування світлових приладів прожекторного типу.

Для опромінювача з параболо-циліндричним відбивачем типу РСП-ВОТ-02, у фокусі якого розміщена лампа ДНаТ-400, вимірювання проводилися на іншому гоніофотометрі, схема якого подана на рис.2.

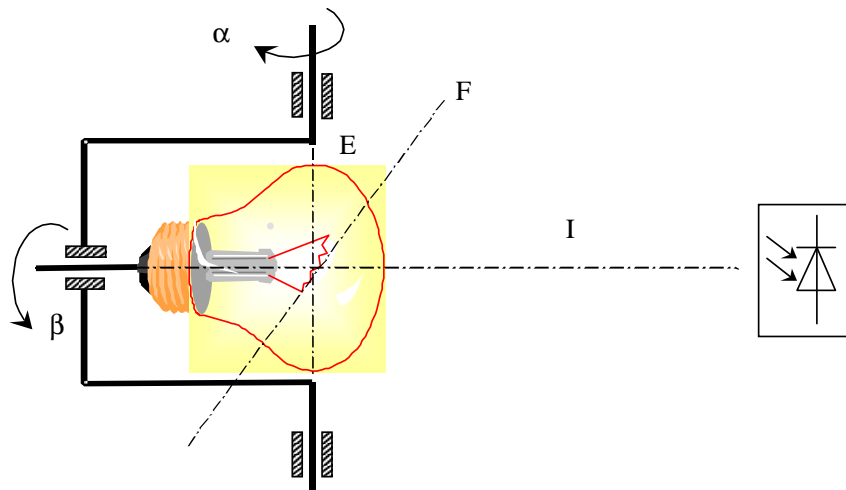


Рис.2. Схема гоніофотометра для фотометрування ОП з параболо-циліндричним відбивачем РСП-ВОТ-02 та лампою ДНаТ-400

Поворот ОП здійснювався навколо двох осей E і I. Азимутальний кут β змінювався при повороті навколо осі I а меридіальний α – навколо осі E. Як і в попередньому випадку ці кути мінялися від $+90^\circ$ до -90° і знак їх задавався аналогічно.

Результати експериментальних вимірювань подавалися у вигляді таблиць, де відповідно до значень кутів β і α записувалися значення сили випромінювання у заданому напрямі.

При складанні таблиць дотримувалися таких же правил, як і в попередньому випадку.

Табличні дані служили основою для подальших світлотехнічних розрахунків.

В результаті були отримані фотометричні тіла кожного із опромінювачів з певним типом джерела світла. Приклад фотометричного тіла для широко-кутового прожектора ЖО-01 з лампою ДНаТ-400 наведено на рис. 3. Такі ж фотометричні тіла були отримані і для ламп ДРИ-250-5, ДРИ-400-5.

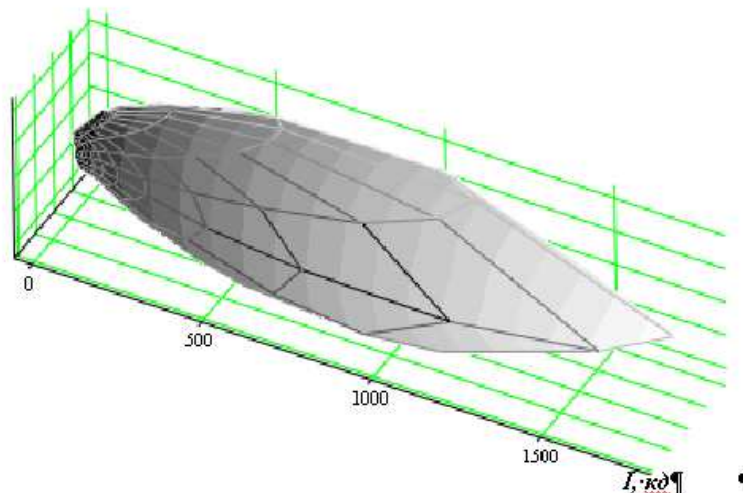


Рис.3. Фотометричне тіло ширококутового прожектора ЖО-01 з лампою ДНАТ-400, приведенне до світлового потоку 1000 лм

Приклад фотометричного тіла для тепличного світильника РСП-ВОТ-02 з лампою ДНАТ-400 подано на рис.4.

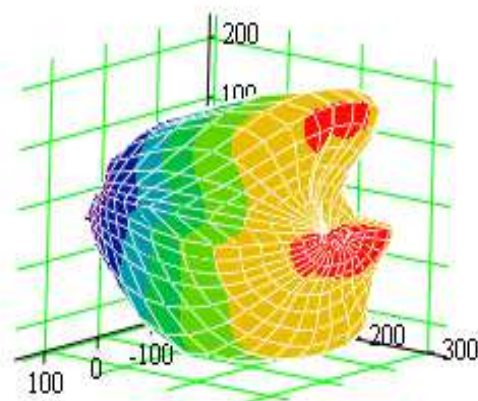


Рис.4. Фотометричне тіло опромінювача для теплиць РСП-ВОТ-02 з лампою ДНАТ-400, приведенне до світлового потоку 1000 лм.

При створенні математичної моделі опромінювального пристрою будемо виходити з того, що він складається з двох структурних елементів — джерела випромінювання та приймача. Геометрична схема такого ОП приведена на рис.5. Джерелом випромінювання в даному випадку є опромінювач, світловий розподіл якого виміряний експериментально і заданий фотометричним тілом. З кожним із них пов'яжемо свою систему координат: для джерела — $Ax_1y_1z_1$, для приймача — $Px_1y_1z_1$. Оскільки можлива зміна положення

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

джерела відносно приймача, то необхідно ввести ще одну систему координат $OXYZ$, пов'язану з земельною ділянкою теплиці, в якій будемо розглядати опромінювальну установку в цілому. Зв'язок між окремими системами координат можна записати аналітично.

Цінним в даній моделі є те, що система координат джерела випромінювання співпадає з системою координат гоніофотометра, на якому проводились вимірювання світлового розподілу опромінювача. Це дозволяє безпосередньо використати експериментальні дані, представлені у вигляді таблиць, при світлотехнічному розрахунку на комп'ютері.

Для проведення розрахунку опромінення елементарної ділянки dS у формулу (1) підставимо $I(\beta, \alpha)$ та координати векторів \overline{AC} і \overline{N} . Вектор \overline{AC} запишемо як суму векторів:

$$\overline{AC} = \overline{OP} + \overline{PC} - \overline{OA} \quad (3)$$

Вектори \overline{N} та кожен із складових \overline{AC} представлені в системі $OXYZ$.

Значення сили випромінювання $I(\beta, \alpha)$ в напрямку \overline{AC} задається кутами β і α . Куты β і α для вибраного напрямку в системі координат джерела можна записати через скалярний добуток векторів:

$$\beta = \arcsin \frac{(\overline{AC} \cdot \vec{e})}{|\overline{AC} - (\overline{AC} \cdot \vec{e}) \vec{e}|};$$
$$\alpha = \arcsin \frac{(\overline{AC} \cdot \vec{e}_f)}{|\overline{AC}|}. \quad (4)$$

При знаходженні сили випромінювання для кутів β і α , які не співпадають із табличними, використовувався метод інтерполювання. Інтерполяцію проводили за допомогою інтерполяційної формули або інтерполяційного многочлена Лагранжа [6].

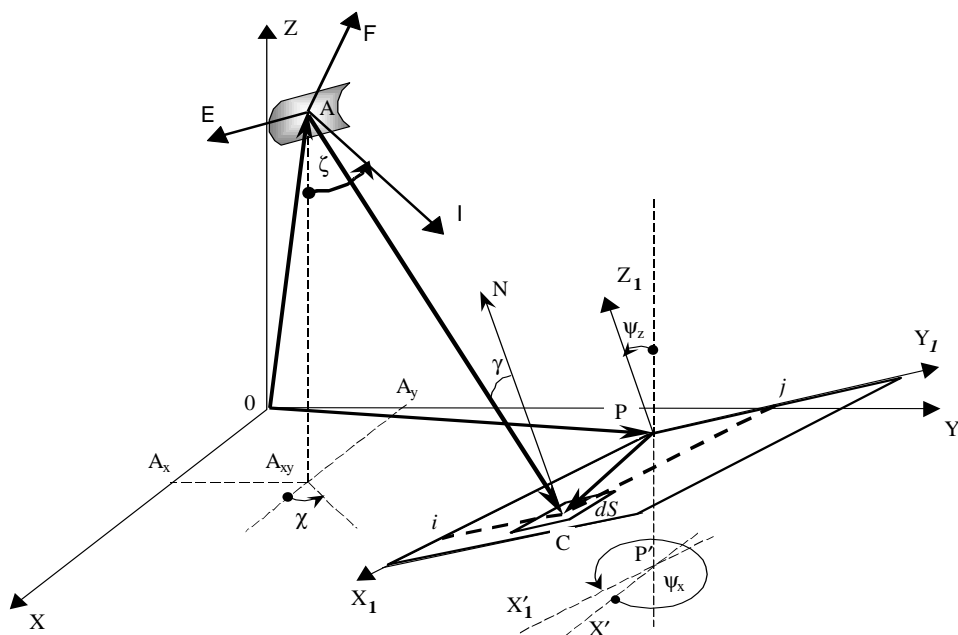


Рис. 5. Геометрична схема опромінювальної світлотехнічної установки з опромінювачем з несиметричним світловим розподілом, заданим фотометричним тілом, знятим на гоніофотометрі (рис.2.):

- OXYZ — система координат опромінювальної установки в цілому;
- AFEI—система координат випромінювача;
- PX₁Y₁Z₁ —система координат приймача;
- AI — оптична вісь ОП;
- χ — кут між віссю OX і проекцією оптичної осі ОП на площину XOY;
- N — одиничний вектор нормалі до ділянки dS;
- ψ_Z — кут між осями PZ₁ і OZ;
- ψ_X —кут між осями OX і PX₁.

Розрахунок $I(\beta, \alpha)$ проводився на ПЕОМ по розробленій програмі згідно алгоритму:

- за заданими координатами точки С визначаються кути β і α ;
- знаходиться ділянка, $[\beta_p, \alpha_q; \beta_{p+1}, \alpha_{q+1}]$ матриці I_{ij} , в яку потрапляє дана точка;
- проводиться лінійна інтерполяція;
- оцінюється похибка лінійного інтерполювання;
- проводиться порівняння абсолютної похибки розрахованої величини з абсолютною похибкою виміряних $I(\beta_p, \alpha_q)$. Якщо похибка розрахованої величини, менша або дорівнює 0,5 одиниці молодшого розряду експериментальних величин, то отримане $I(\beta, \alpha)$ використовується в подальших розрахунках. Якщо ж переважає вказану величину, то відбувається перехід до квадратичної інтерполяції;

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

- якщо похибка квадратичного інтерполювання не перевищує похибки експериментально отриманих величин, то отримане $I(\beta, \alpha)$ береться для подальших розрахунків, якщо ж перевищує — то програма інформує про це оператора.

Для розрахунку опромінення вибраної площини була розроблена ще одна програма, алгоритм якої такий:

- задаються координати ОП в системі OXYZ та кут нахилу ζ його оптичної осі до вертикалі;
- в системі OXYZ задається опромінювальна площина і зв'язується з нею система координат приймача $PX_1Y_1Z_1$;
- на опромінювальній площині вибирається прямокутна ділянка з сторонами $R_{x_1} \times R_{y_1}$, які співпадають з осями PX_1 та PY_1 ;
- задається напрям одиничного вектора нормалі $\vec{N}(N_x, N_y, N_z)$ до вибраної ділянки, який співпадає з віссю PZ_1 ;
- ділянка розбивається на елементарні квадрати з стороною Δ ;
- кожному елементу розбиття присвоюється пара цілих чисел (i, j) , які відповідають його координатам по осях PX_1 і PY_1 , якщо за одиничний відрізок прийняти Δ ;
- за формулою (1) визначається середнє опромінення E_{ij} кожного елемента Δ_{ij} ;
- опромінення всієї ділянки задається матрицею $\{E\}$ розміром $R_{x_1}/\Delta \times R_{y_1}/\Delta$, елементами якої E_{ij} є середні значення опромінення кожного Δ_{ij} .

Висновки

1. На основі експериментальних вимірювань побудовано фотометричні тіла опромінювальних пристроїв з несиметричним світловим розподілом.
2. Запропонована математична модель ОП, в якій система координат джерела випромінювання співпадає з системою координат гоніофотометра, на якому проводилися вимірювання світлового розподілу опромінювача.
3. Розроблено програмне забезпечення та приведено алгоритм розрахунку на комп'ютері опромінення довільно розташованої площини від ОП, світловий розподіл якого заданий фотометричним тілом.

Photometric bodies of the non-symmetric light-distributed irradiation devices were built on the basis of the experimental measurements. Mathematic model of the irradiation device was proposed. Computer calculation programme of irradiation of arbitrary square was developed.

II міжнародна науково-технічна конференція

Література

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 528 с.
2. Справочная книга по проектированию электрического освещения /Под. ред. Г.М.Кноринга. - Л.: Энергия, 1976. - 384 с.
3. Куш О.К. Оптический расчет световых и облучательных приборов на ЭВМ. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 152 с.
4. Живописцев О.А., Косицын О.А. Электротехнология и электрическое освещение. - М.: Агропромиздат. 1990. - 302 с.
5. Никитин В.Д. Расчет освещенности наклонной плоскости// Светотехника. - 1989. - №4. - С.15-16.
6. Самарский А.А., Тулин А.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989. - 429 с.
7. Андрійчук В.А., Герій Я.М. Розрахунок інтегральних характеристик світлового поля некруглосиметричного опромінювача з параболо-циліндричним відбивачем// Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2001. - №4. - С.108-114.

УДК 623.407

М.Паламар, канд.техн.наук; А.Паламар

*Тернопільський державний технічний університет
імені Івана Пулюя*

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ І МОНІТОРИНГУ ПРИСТРОЇВ ГАРАНТОВАНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

В статті розглядається структура і алгоритм роботи системи керування і моніторингу пристроїв гарантованого живлення, яка забезпечує діагностику роботи системи, попереджує відкази і в загальному підвищує ефективність керування процесом подачі і розподілу електроенергії споживачам.

Розвиток інформаційних технологій, систем зв'язку, впровадження енергозберігаючих технологій вимагає нових підходів до принципів побудови і використання систем забезпечення та розподілу енергії особливо в таких областях як телекомунікація, системи керування складними процесами, освітлення важливих об'єктів і ін. Одним з основних напрямків впровадження енергозберігаючих технологій є впровадження електронних рішень по стабілізації живлення для складних умов промислової експлуатації (перепади навантажень, завади, реактивні навантаження).

Основні вимоги для таких систем живлення – це забезпечення надійності і стабільності (гарантованості) живлення, для чого вводиться резервування з акумуляторних батарей (АБ) а також відповідні вузли контролю стану, автономного та дистанційного керування процесом подачі і розподілу енергії. Структурна схема типової системи гарантованого живлення приведена на рис.1.

Необхідною частиною сучасних систем гарантованого живлення є дистанційний моніторинг як вхідних параметрів мережі, так і вихідних параметрів блока електроживлення, дистанційне керування комутацією навантаження, ведення електронного протоколу подій.

Для реалізації всіх приведених функцій необхідний достатньо "інтелектуальний" програмно-апаратний модуль, що стає обов'язковою складовою частиною системи гарантованого живлення.

Для подібних систем живлення за замовленням фірми-виробника розроблено спеціалізований контролер керування і моніторингу, структурна схема якого приведена на рис.2. Контролер призначений для вимірювання та індикації напруг і струмів пристрою електроживлення, вироблення додаткової напруги керування розрядом/зарядом акумуляторної батареї, архівування подій та

II міжнародна науково-технічна конференція

забезпечення обміну інформацією із ПЕОМ через послідовний інтерфейс RS232 із гальванічною розв'язкою, або через модем.

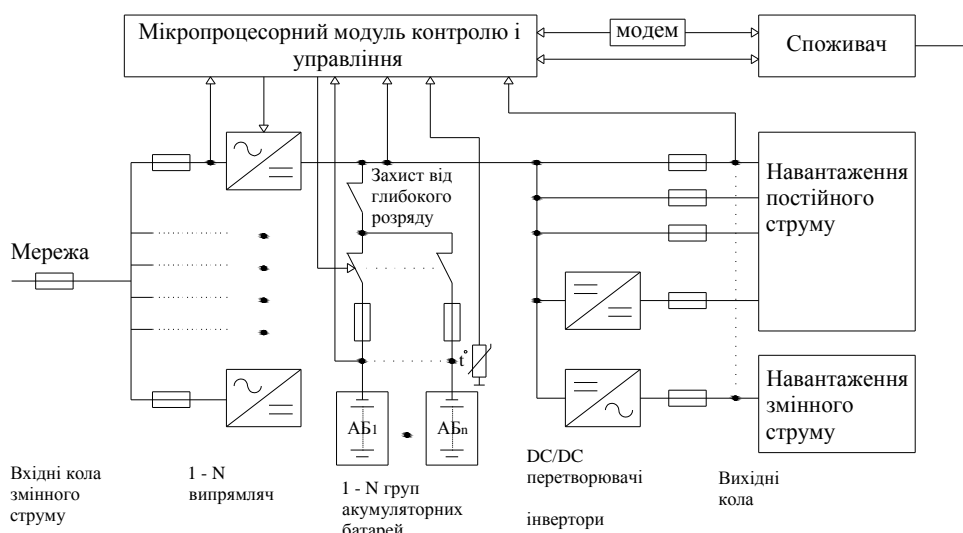


Рисунок 1 - Структурна схема системи гарантованого живлення

Однією з основних функцій модуля керування і моніторингу є програмне регулювання вихідної напруги і струму окремих інверторів у поєднанні з керуванням процесом заряду/розряду АБ у відповідності з ТУ на використовувані акумулятори. Тому контролер є елементом замкненої керуючої системи із зворотнім зв'язком по струму.

Для захисту вихідних кіл інверторів та АБ від значних скачків струму при комутаційних процесах, застосовується алгоритм адаптивного пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора для керування вихідною напругою інверторів.

$$u(t) = K_p \left[i(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^T i(t) dt + T_D \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

де $u(t)$ -вихідна напруга інвертора; K_p – коефіцієнт підсилення в ланці зворотнього зв'язку; $i(t)$ – відхилення струму АБ від заданого в t момент часу; T_I, T_D – сталі часу інтегрування і диференціювання.

Для дискретної системи керування, закон цифрового ПІД регулятора приводиться до вигляду, зручного для програмної реалізації на мікроконтролері:

$$u_t = u_{t-1} + A_0 i_t + A_1 i_{t-1} + A_2 i_{t-2} \quad (2)$$

де A_0, A_1, A_2 – коефіцієнти пропорційної, інтегральної і диференціальної частин відповідно

$$A_0 = k_p \left(1 + \frac{T_0}{2T_I} + \frac{T_D}{T_0} \right) \quad (3)$$

$$A_1 = -k_p \left(1 - \frac{T_0}{2T_I} + \frac{2T_D}{T_0} \right) \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{k_p T_D}{T_0} \quad (5)$$

T_0 – період квантування, який може програмно змінюватись. Змінюються також T_I , T_D – відповідно до параметрів інвертора і типу АБ.

Дискретна передаточна функція керування контролера приводиться до виразу:

$$W_p(z) = k_p \left[1 + \frac{T_0(1+z^{-1})}{2T_I(1-z^{-1})} + \frac{T_D}{T_0}(1-z^{-1}) \right] \quad (6)$$

Контролер передбачає захист АБ від глибокого розряду за допомогою дистанційно керованих розмикаючих ключів. Для реалізації температурної компенсації режиму заряду АБ в системі введено вимірювальний канал температури. В процесі роботи є можливість періодично проводити тест справності АБ і оцінювати її залишкову ємність шляхом часткового розряду з контролем залишкової напруги батареї і програмного обмеження струму.

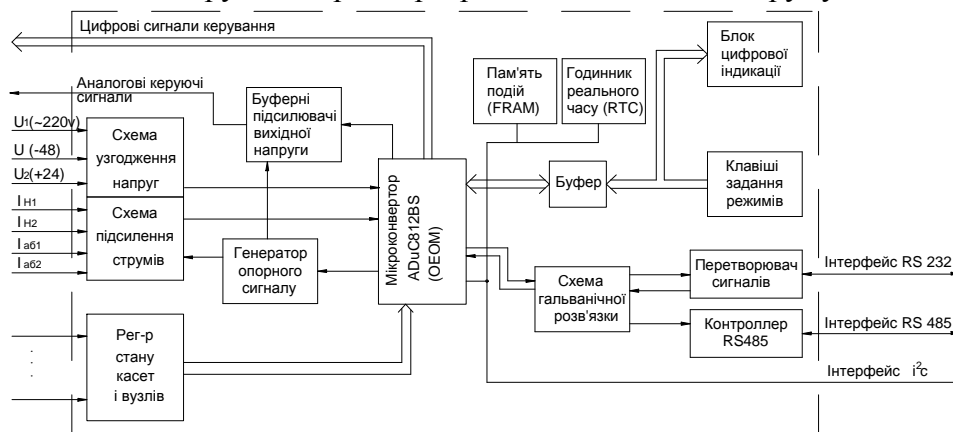


Рисунок 2 Структурна схема блоку керування і моніторингу

Схема узгодження напруг контролера служить для приведення вимірювальних напруг джерел живлення (~220В, -48В, +24В) та напруги асиметрії АБ до нормованих значень 0..+2,5 В. Вона реалізована на ділянках напруги та інверторах на ОП із елементами фільтрації завад.

II міжнародна науково-технічна конференція

Схеми підсилення вихідних сигналів датчиків струмів (шунтів) виконані на інструментальних операційних підсилювачах, що підсилюють стандартний вихід шунта 0..75мВ до нормованого входу АЦП (0..2,5В), з фільтрацією завад. Діапазон вимірювання струмів навантаження і АБ по кожному каналу може програмно змінюватись залежно від програмних коефіцієнтів у Flash-пам'яті контролера. Відносна приведена похибка вимірювання становить 0,3 %. Оцифровування сигналів виконується за допомогою внутрішнього 12-розрядного АЦП, що входить до складу мікроконвертора ADuC812 (Analog Devices) і який є центральним вузлом обробки та керування обміном інформацією. В процесі опитування даних використовуються програмні алгоритми накопичення і усереднення вимірювальних сигналів, що значно підвищує співвідношення сигнал/шум і відфільтровує імпульсні завади. Особливістю вимірювальної схеми є програмна настройка змищення нуля та коефіцієнтів підсилення кожного каналу без використання змінних потенціометрів, а також самоконтроль і діагностика за опорними сигналами.

Мікроконвертор за допомогою ЦАП, що входить до його складу, та вихідного підсилювача виробляє напругу керування силовими касетами, які в свою чергу забезпечують рівень струму і напруги заряду/розряду АБ згідно заданого алгоритму.

Дискретні сигнали стану роботи касет та інших вузлів періодично зчитуються контролером через буферний регістр. Виміряні значення напруг і струмів індикуються на цифровому рідкокристалічному табло (4 строки по 10 символів). Зміни робочих параметрів блоку та задання режимів прогляду та індикації вибирається за допомогою кнопок на передній панелі касети.

Всі відхилення параметрів живлення від норми, а також час виникнення події заносяться в енергонезалежну пам'ять. При необхідності, можливе відключення певних каналів навантаження, або включення звукової чи світлової сигналізації.

Через послідовний інтерфейс стандарту RS232 (V24), або через модем, система моніторингу під'єднується до ПЕОМ для передачі накопиченої архівної інформації, або дистанційного контролю чи установки параметрів блоку в On-Line режимі.

Схема гальванічної розв'язки та перетворювач сигналів служать для забезпечення надійного зв'язку з ПЕОМ через послідовний інтерфейс стандарту V24 (RS232). Передбачена можливість зв'язку через інтерфейс стандарту RS485.

Програмне забезпечення моніторингу та дистанційного керування установкою електроживлення складається з двох частин: одна частина – програма контролера, записана у Flash-пам'ять, яка здійснює автономне керування, архівування подій, зв'язок з віддаленим оператором. Інша частина працює на ПЕОМ на

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

платформах Windows95/98 чи Windows 2000 і служить для перегляду інформації, що поступає через канал зв'язку з контролером у зручному форматі у вигляді графіків зміни параметрів у часі, або табличних даних, ведення бази даних подій, видачі звукових повідомлень при порушеннях в системі живлення (рис.3).



Рисунок 3 – Інтерфейс програми моніторингу джерела гарантованого живлення

Впровадження таких систем гарантованого живлення підвищує надійність і ефективність функціонування та енергозбереження у різних важливих технологічних процесах.

The article considers a method and algorithm of control system work and monitoring of device ensure power supply, which diagnostics breach in system work, warning refuses and in general raise efficiency of control processing presenting electric power consumer.

Література

1. Федорейко В.С., Паламар М.І. Оптимізоване керування роботою асинхронних двигунів у потокових лініях // Матеріали сьомої наукової конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". - Тернопіль: 2003. - с.103-104

ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРИ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ СКЛА

В статті розглянута плазмова електротехнологія поверхневої обробки скла при атмосферному тиску. Наведена принципова схема плазмового пристрою, використання якого дозволяє інтенсифікувати процес нанесення покриття та отримувати проникаючі покриття із відмінними від основи властивостями. Наведені результати експериментів з водними розчинами солей та сполук.

Скло, як конструкційний матеріал, досить тривалий час звертає на себе пильну увагу людини при використанні його як у побуті, так і в промисловості. Вибір скла дуже залежить від впливу зовнішніх факторів на нього. Воно повинно відповідати певним фізико-хімічним або механічним властивостям. Так, хімічний лабораторний посуд (пробірки, стакани, колби, реторти й ін.) повинен бути стійким до впливу хімічних реагентів, легко відмиватися від забруднень, а матеріал його повинен бути термостійким і мати малий коефіцієнт теплового розширення; медичне скло, призначене для зберігання й упакування лікарських засобів, ін'єкційних і бактеріологічних розчинів повинне мати світлозахисні властивості й високу стійкість до стерилізації паром; високі вимоги пред'являються до термічної стійкості, коефіцієнтам переломлення, відбиття і розсіювання світлового потоку для світлотехнічних стекол, призначених для зміни напрямку й спектрального складу світла (лінзи для маяків, автомобільні фари, плафони й ковпаки світильників). Ці властивості не завжди доцільно забезпечувати по всій скломасі, починаючи від підготовки компонентів вихідної сировини до одержання готового продукту. Створення на поверхні скла тонких шарів із заданими властивостями шляхом відповідної обробки дозволяє значно зменшити економічні витрати при виробництві кольорового та спеціального скла.

Використання технологій, що знайшли сьогодні широке застосування в промисловості, не завжди відповідає вимогам кінцевого результату – одержання на поверхні матеріалу чи виробу властивостей, відмінних від основи і без додаткових витрат. Електрохімічні методи обробки скла та скловиробів характеризуються тривалим часом обробки, який складає 30 – 60 хвилин при температурі 450 – 600 °С, та дозволяють створювати на поверхні скла у більшості випадків лише непроникаючі покриття [1]. Обробка скла катодним розпиленням або за допомогою магнетронних систем дозволяє формувати плівки заданого хімічного складу певної товщини із задовільною для

експлуатації адгезією, однак ці методи вимагають наявності обмеженої у розмірах камери, у якій створюється вакуум у межах 10^{-4} – 10^{-1} Па, апаратів очищення і дозування газів, які подаються у камеру; спеціальної підготовки обслуговуючого персоналу для спостереження за технологічним процесом, що відрізняється високою енергоємністю [2–4].

Використання потоків низькотемпературної плазми дозволяє відмовитися від застосування складного та енергоємного вакуумного обладнання, однак формування декоративних непроникаючих покриттів, які сильно піддані механічним ушкодженням та неможливість зберегти при формуванні покриттів прозорість скла звужує галузь використання цих методів.

Застосування у плазмових методах поверхневої обробки вихідних матеріалів у вигляді порошків або дроту, коли в якості середовища, що утворює плазму, використовується аргон чи водень, або суміш цих газів [5, 6] не завжди відображає економічну доцільність.

Організація технологічного процесу з використанням іонно-плазмової обробки при атмосферному тиску дозволяє усунути зазначені недоліки й інтенсифікувати процес впровадження елементів у поверхню матеріалів, що обробляються повітряною плазмою. Матеріали впровадження можуть являти собою як чисті елементи (наприклад, мідь, марганець, хром), так і компоненти цих елементів або сплавів (мідь + кобальт, марганець + мідь, ніхром, карбонітрид титану й ін.), що дозволяє розширити спектр матеріалів, які використовуються і зменшити витрати на попередню підготовку матеріалів впровадження, оскільки вони можуть бути використані у виді агломератів, стружки, обпилювань, прутків.

Одержувати проникаючі декоративні покриття і покриття з відмінними від основи фізико-хімічними і механічними властивостями, наприклад, з підвищеним коефіцієнтом відбиття – можливо і при використанні водяних розчинів хімічних сполук. Застосування водяних розчинів дозволяє інтенсифікувати процес впровадження матеріалу покриття і скоротити час обробки. Присутність у плазмовому струменю водню сповільнює процес окислювання впроваджуваних елементів і забезпечує одержання більш чистих і рівномірних покриттів. Принципова схема електротехнічного пристрою для іонно-плазмової обробки скла й скловиробів при атмосферному тиску з використанням парів води показана на рисунку 1.

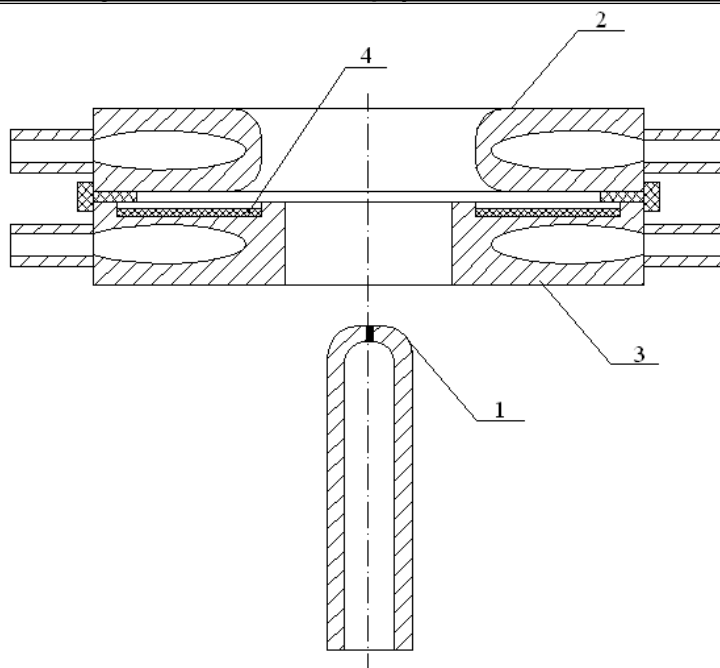


Рисунок 1. – Принципова схема електротехнічного пристрою для іонно-плазмової обробки скла й скловиробів при атмосферному тиску з використанням парів води:
1 – катод; 2 – анод; 3 – безпотенційна вставка; 4 – пористий матеріал.

Попереднє випарування модифікуючого матеріалу робили за рахунок генерування плазмового дугового розряду (довжиною 45 мм, 140 В) між катодом плазмового пристрою постійного струму й вихідною сопловою частиною (анодом) плазмотрона. Вихрова (тангенціальна) подача плазмоутворюючого середовища (повітря) витратою $G = 0,0006$ кг/с забезпечувала стабільне обертання прив'язок дугової плазми по поверхні анода. Додатково, магнітна стабілізація розряду в сопловій частині плазмового пристрою підвищувала швидкість переміщення опорних плям плазмової дуги й створювала, тим самим, рівнозначні умови для розвитку ерозійних процесів в області випарування модифікуючого матеріалу.

Під інтенсивним впливом електричної дуги вихідний матеріал покриття, що подається через пористу вставку, випарується, переводиться в збуджений та іонізований стан і переноситься плазмовим потоком до оброблюваної поверхні. Організація процесу іонно-плазмової обробки поверхні скла з застосуванням розробленого електродугового плазмового пристрою дозволяє здійснити рівномірне заповнення міжелектродного проміжку плазмою насичуючого середовища, виключаючи при цьому краплинний перенос речовини яка модифікує скло, а як робоче середовище можливе використання повітря.

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

По закінченню проведених експериментів з такими водяними розчинами солей і сполук як: хлористий кобальт CoCl_2 , перманганат калію KMnO_4 , біхромат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, розчин сульфату алюмінію із сірчаною кислотою міддю відповідно були отримані прозорі зразки рожевих, блакитних, сірих, зелених, червоних відтінків із сонцезахисними властивостями. Насиченість кольорових відтінків залежить від витримки часу обробки, яка складала від 3 до 25 секунд.

Проведений аналіз показав, що після обробки іонно-плазмовим способом поверхня зразків являє собою шар скла, структурно модифікований впровадженими іонами металу, оброблені стекла здобувають сонцезахисні властивості. Отримані функції коефіцієнтів відбиття, пропускання представлені на рисунках 2 - 4.

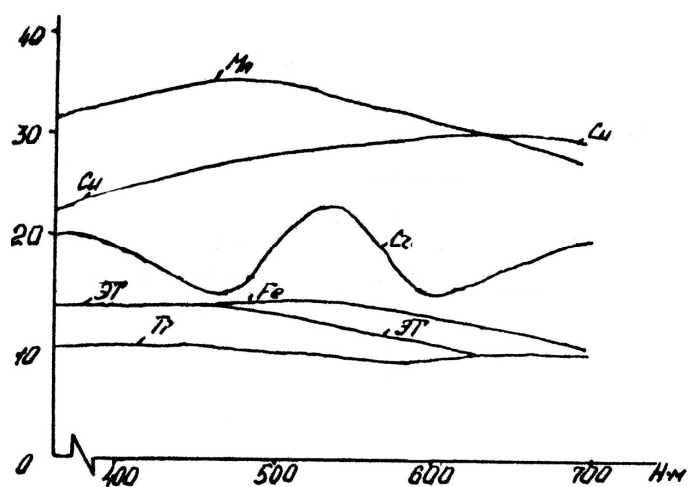


Рисунок 2. – Коефіцієнт відбиття (видимий спектр)

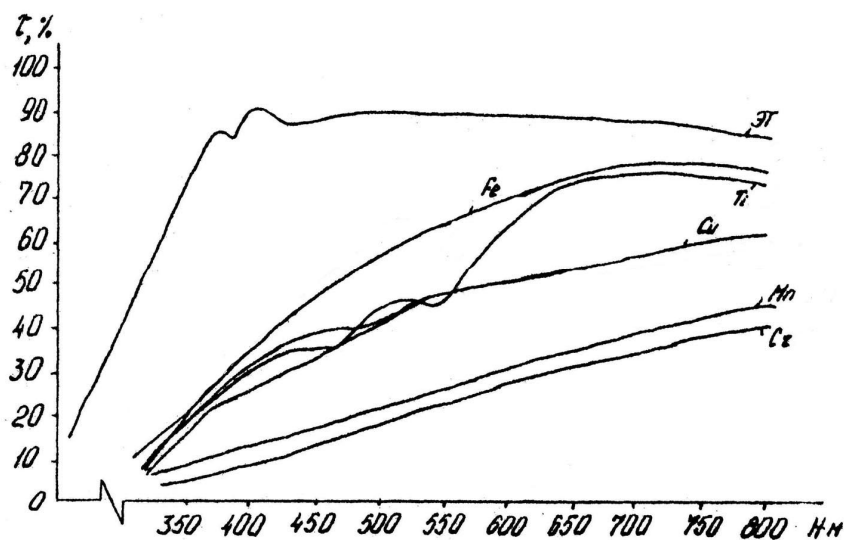


Рисунок 3. – Коефіцієнт пропускання (видимий спектр)

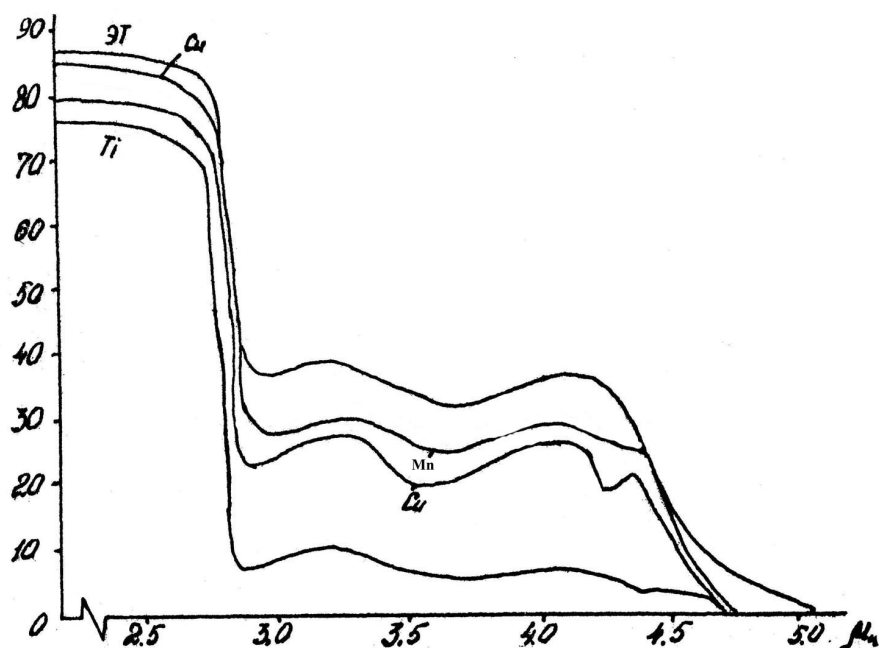


Рисунок 4. – Коефіцієнт пропускання (УФ)

Максимальний ефект збільшення відбиття у видимій області стосовно вихідного скла, виявляє скло з покриттями, отриманими з марганцю і міді. Збільшення коефіцієнта відбиття для покриття з цих матеріалів складає 15-20%. При цьому пропускання у видимій області складає 30-65% для зразків з покриттям з міді. Покриття з заліза збільшують відбиття на 4-10%. Пропускання у видимій області складає 35-75%.

В ультрафіолетовій області коефіцієнт пропускання всіх зразків із модифікованими поверхнями зменшується і наближається до його значення у вихідному склі. Так в області 5 мкм коефіцієнт відбиття для всіх модифікованих стекол не перевищує 3%. Зі збільшенням довжини хвилі різниця практично зникає.

Організація процесу іонно-плазмової обробки скла й скловиробів із застосуванням розробленого електродугового плазмотрона усуває необхідність у використанні порошкового матеріалу покриття певного гранулометричного складу і складного вакуумного устаткування, а рівномірне заповнення міжелектродного проміжку плазмою насичуючого середовища підвищує ефективний коефіцієнт її використання.

The plasma electrotechnics of glass surface processing under atmospheric pressure allowing to intensify the process of the fixing covering and get penetrating covering with different characteristic from bases is considered in this article. The results of the experiments with water salt solutions and compounds are given.

Література

1. А. с. №1799856, С03 С 17/25 А. Б. Аткарская, В. И. Борулько, В. Ю. Гойхман, Т. А. Дудник, Л. И. Маричева, С. А. Попович. Теплоотражающее покрытие для стекла.
2. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел: Перевод с англ. / Под ред. Р.Бериша. М., Мир, 1984. – 336 с.
3. Б. С. Данилин, В. К. Сырчин. Магнетронные распылительные системы., М., Р. и С., 1982. – 72 с.
4. А. с. №1831514, С23 С 14/34 А. Н. Руднев. Электродуговой испаритель А. Н. Руднева.
5. Крохин В. П. и др. Декорирование стекла и изделий из него методом плазменного напыления // Стекло и керамика. – 1999. №3. – с. 12 – 15.
6. Плазменное декорирование сортовой посуды / И. И. Немец, В. П. Крохин, В. С. Бессмертный и др. // Стекло и керамика – 1983. - №4. – С. 9 – 10.

ВОДА – СУМАТОР ЕНЕРГІЇ

В даній роботі розглядаються основні можливі механізми перетворення енергії в так званій всмоктуючій турбіні Шаубергера та близьких по конструкції пристроїв.

Переглянувши листи Віктора Шаубергера і Людвіга Гербранда, написані 60 років тому, ми знаходимо, що енергія, властива вільному і безперервному потоку води може бути потенційно набагато більшою, ніж це доступно при використанні тиску, що надходить із диференціальної висоти [1].

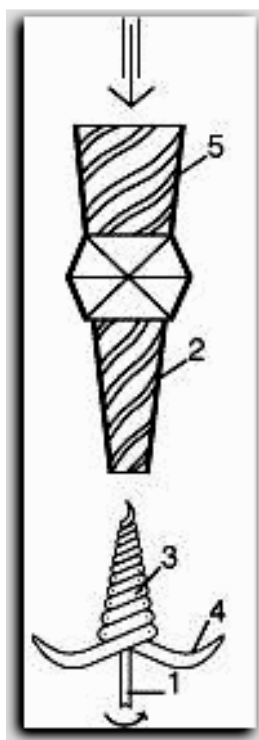


Рис.1. Турбіна Шаубергера

Віктор Шаубергер (1885-1958) народився в австрійському місті Плекенштен, п'ятою дитиною серед дев'яти інших. Віктор цілими днями бродив глухою, схожою на дрімучий ліс місцевістю біля Плекенштейнського озера і спостерігав за природою. Батько хотів відправити сина в університет, щоб він вивчав там лісоводство, але Віктор відмовився, вважаючи що викладачі тільки спотворюють його не переконані звичайні бачення природи, як це сталося з його братами, тому пішов вчитися у звичайне лісове училище і став лісником. Завдяки своїм спостереженням Шаубергер дав самі фундаментальні відкриття ХХ ст. та своєю технікою завихрення відкрив людству зовсім нові джерела енергії.

Напевне самим важливим його відкриттям є сила безвибухового руйнування [2]. Безвибухове руйнування він називав (Implosion), а вибухову, як вибух у двигунах внутрішнього згорання (Explosion).

Коефіцієнт корисної дії двигунів внутрішнього згорання нижче 50% і більше половини енергії вивільняється в пусту, частіше всього у вигляді тепла. І це не тільки жахливе марнотратство нафти, газу, вугілля і т. д. (по словах Шаубергера, їх треба залишити в землі, тому, що вони необхідні для утворення води).

Шаубергер взяв в якості зразка творчі сили природи. За його словами: „в рослині нічого не вибухає, але затрачаючи мінімум енергії

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

досягається максимум продуктивності". Він писав „наша сучасна техніка поводить себе навпаки, як селянин, який навесні кидає в землю сім картоплин, щоб восени викопати одну”.

При цьому Шаубергер покладав надії не на тиск та температуру (двигуни внутрішнього згоряння), а на силу безвибухового руйнування. Така біотехніка не створює відходів та відпрацьованих газів, а виробляє енергію по тарифу, майже рівному нулю.

Шаубергер писав: „Направлений до центра циклоїдальний спіральний рух відповідає температурі, що понижується, стисканню і концентрації. Відцентровий рух рівний по значенню температурі, що піднімається, теплу, розтягненню і вибуху”.

Те що його техніка функціонує Шаубергер довів на своїх „всмоктуючих”, або „форелевих” турбінах для гідроелектростанцій [3], коефіцієнт корисної дії яких набагато вищий ніж у звичайних. У 1930 р. він отримав патент на свій винахід, схема якого зображена на рис.1.

Конус, що обертається, який приєднаний до осі (1) в напрямі водяного реактивного сопла, складає реактивну трубу (2). На конус нанесені леза (3) у вигляді штопора. Кінці (4) цих лез (3) зігнуті дещо вверх проти прибуваючого водного реактивного потоку. На внутрішній поверхні реактивної труби (2) знаходилися гвинтоподібні ребра (5).

Головною особливістю даної турбіни є можливість працювати на великих частотах обертання без створення кавітації на її робочих частинах.

Дану турбіну Шаубергер називав форелевою, оскільки принцип її будови взяв із спостережень за рухом форелей, здатних до вертикального підйому у невеликих водоспадах. Проводячи спостереження за рибою він писав: „риба із широко розкритим ротом знаходилась в нерухомому стані у падаючому потоці води. Виходячи через зябра вода завихрювалась, що призводило до створення реактивної тяги позаду риби, яка підштовхувала тіло риби проти потоку води”.

Роботою цих турбін зацікавився німецький інженер Людвіг Гербранд. За його свідченням ще в 30-х роках [4] генератори на одній із електростанцій середини 30-х років приєднаних до турбіни Шаубергера на річці Рейнфельд давали більше енергії ніж могли. Один із генераторів Рейнфельдської електростанції при розході води $50 \text{ м}^3/\text{сек}$ і висоті тільки один метр, давав стільки ж потужності, як генератор на іншій річці біля Рюбергштат, який мав перепад між рівнем потоку і турбінами 12 м при розході води $250 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Цей факт було підтверджено професором Фінзи. Говорячи до молодого Herbrarda: „не переживайте відносно цього. Це правильно. Генератор працює без проблем на протязі деякого часу. Ми –

II міжнародна науково-технічна конференція

інженери – електрики. Ці проблеми не наші і ми залишаємо їх гідравлікам. Ми повторили наші вимірювання і потужність генератора так визначена. Єдина річ – ніхто не визнає цього”.[4]

Herbrard скоро пішов у армію і друга Світова війна не дозволила йому досліджувати дане питання.

Тільки набагато пізніше в сімдесятих – вісімдесятих роках Herbrard повернувся до обчислень і намагався – поки без успіху – зацікавити промисловість та керівництво в цьому більш ефективному використанні гідроприводу.

Технічні факти.

Гербранд писав: „Підтверджений фактичним експериментом, щоб показати, що різними підходами до розробки гідроприводу ми могли би отримати більшу електричну потужність, ніж отримується із гідроприводів сьогодні, з більш простими машинами і меншою кількістю розходу”.

Він провів розрахунки швидкості води на турбіні, залежно від висоти води за формулою:

$$V = \text{Sgrt } 2 g h, \quad (1)$$

де V – швидкість в м/сек.; g – прискорення вільного падіння м/сек²;

h – висота диференційних вимірювань, м.

Залежність швидкості потоку від висоти зображено на рис.2 та вихід електричної енергії в кіловатах із збільшенням висоти зображено на рис. 3.

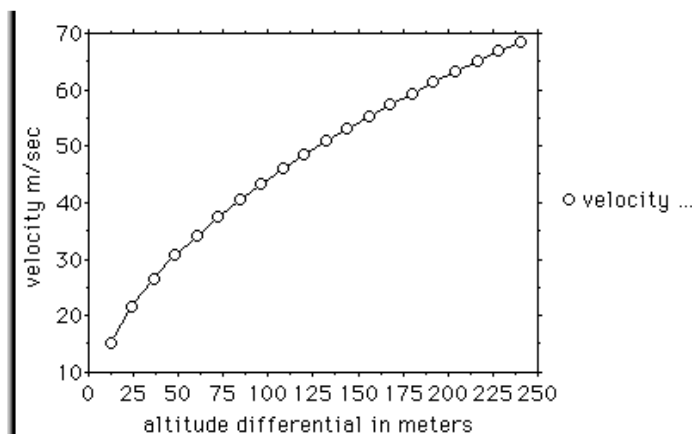


Рис. 2. Залежність швидкості потоку води від висоти дамби

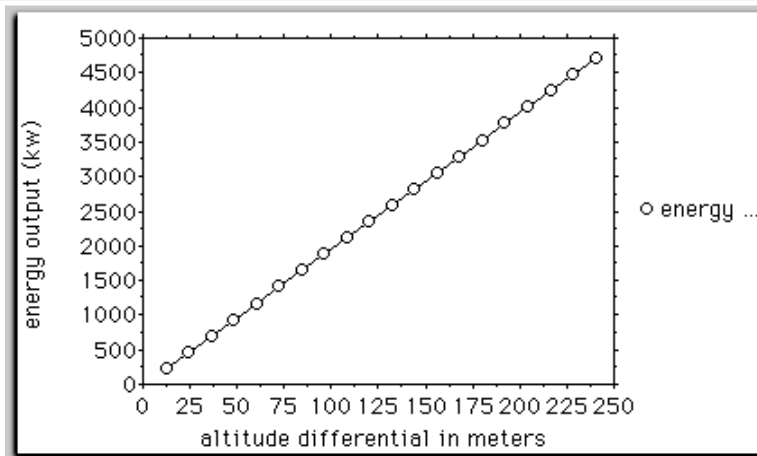


Рис. 3. Залежність виходу електричної енергії при збільшенні диференційної висоти

Збільшення виходу енергії згідно рис. 3 здійснюється за лінійним законом.

Електрична енергія, яка може бути отримана від води, при розрахунку на основі швидкості потоку і маси води, тобто величини із потоку, вимірюваної в кубічних метрах за секунду, за формулою визначення кінетичної енергії

$$E_{kin} = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (2)$$

Отримаємо криву виходу електричної енергії в залежності від швидкості потоку зображену на рис.4.

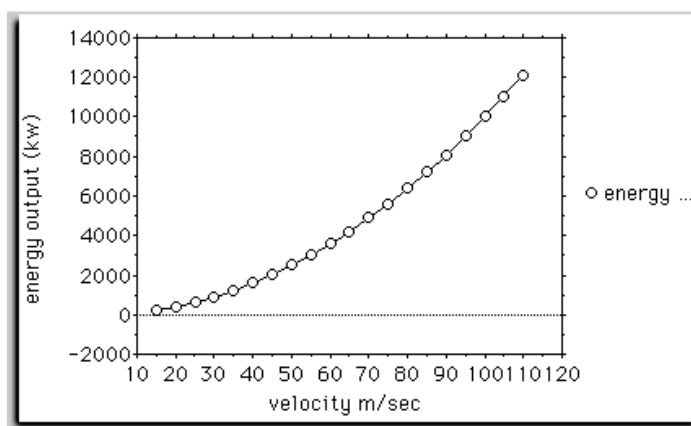


Рис. 4. Залежність виходу електричної енергії від швидкості потоку

Враховуючи вираз визначення кінетичної енергії, вихід енергії в залежності від швидкості буде мати квадратичну залежність, рис. 4

З графіка бачимо що із збільшенням швидкості квадратично збільшується вихідна енергія. Тому чим більша швидкість води тим більша ефективність електростанції

Таким чином ми маємо дві основних величини, які визначають вихід електричної енергії. Це – кількість води та швидкість потоку.

Перша змінна, кількість доступної води, залежить від місцезнаходження і не дозволяє робити зміни.

Друга змінна, швидкість потоку води, яка може керуватися різними способами. Крім збільшення водного тиску для збільшення швидкості потоку, який є порівняно неефективним способом, можна застосовувати інший.

Інший метод збільшення швидкості потоку води полягає в тому, щоб сформувати поздовжнє завихрення в напрямку його осі. Таке завихрення має властивість збільшувати швидкість потоку і скорочувати діаметр місця, необхідного для тіла води та збільшення її густини. (Сама висока густина води як відомо при температурі $+4^{\circ}\text{C}$). Встановлення турбіни показано на рис.5.

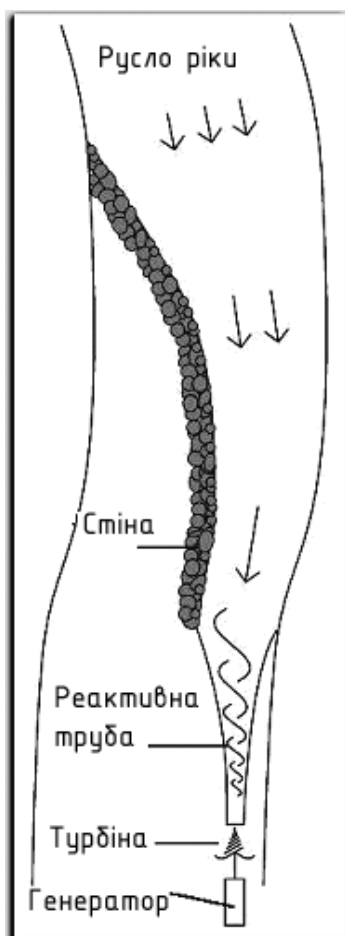


Рис.5. Встановлення турбіни Шаубергера по руслу ріки

При експериментальному дослідженні даного методу згідно опису [4] рис.5 нормальний потік води, який виходить із стіни яка обмежує русло ріки збільшує нормальну швидкість потоку з 2-5 м/сек. до 10-15 м/сек. Далі наступним кроком для збільшення швидкості необхідно забезпечити канал потоку, який найбільш близько схожий на форму природного завихрення. Таким чином вода в самому вузькому пункті русла ріки переходить в „круглу трубу” або „реактивну трубу”, яка поступово обмежує діаметр потоку води і таким чином спричиняє подальше збільшення в швидкості.

Для формування завихрення в реактивній трубі створюється спіральними ребрами на внутрішній частині реактивної труби.

Монтаж турбіни і генератора в точці випуску водного реактивного сопла відносно проекту запропонованого Шаубергером,

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

тепер забезпечить вихід електричної потужності набагато більше, ніж це досягається звичайним шляхом.

Здається теоретично немає ніяких обмежень при використанні вихрового методу по збільшенні швидкості води. Але якщо вода буде протікати по трубі із збільшенням швидкості збільшується опір потоку на тертя. У випадку використання вихрового руху рідини опір на тертя може бути дуже низьким і навіть від'ємним, що показано експериментами в Штутгарті.

Підтвердження тенденції завихрювання, для збільшення потоку води (або іншими словами зменшити опір потоку води) надходить від експериментів, виконаних в 1952 р. в технічному коледжі Штудгарта професором Францом Попелом [5.]

Експерименти проведені по замовленню Ради Міністрів ФРГ з метою перевірки теорії Шаубергера, оскільки його теорія про рух суперечила класичній механіці та термодинаміці. Експерименти дали незрозумілі з точки зору останніх наук результати. Одним із таких результатів є виявлення режиму перекачування води по мідній трубі, виготовленій у вигляді точної копії рогу антилопи куду (правостороння спіраль, що звужується), при якій величина сили тертя води в трубі залежала від режиму перекачування води, а в одному із режимів виявилася від'ємною. На рис. 6 подані фотографії цієї труби і графіки сили тертя води в трьох трубах (прямій скляній, прямій мідній, спіральній мідній) в залежності від швидкості потоку прокачуваної через них води.

Таким чином повернувшись до рис.5 з метою оцінки потенціальної вигоди від використання динамічних якостей, властивих потоку води, ми можемо стверджувати, що таким чином ми повинні отримати, без особливих труднощів, швидкості між 40 і 50 м/сек. [5]. Ця оцінка базується на спостереженнях Гербранта на електростанції Раінфельден на якій було досягнута швидкість потоку 35 м/сек.

Швидкість потоку води 35 м/сек еквівалентна висоті встановлення більше ніж 100м. Враховуючи, що маючи потік води розходом $10 \text{ м}^3/\text{сек.}$ зі швидкістю ($V = 45 \text{ м/сек.}$) вихід електричної енергії близько 10 МВт. Ця значна кількість потужності може бути отримана майже де-небудь по нормальному курсу ріки без надзвичайно дорогої практики будівництва дамби.

Цим самим підхід Шаубергера до розгляду природних фізичних процесів виходив за межі, встановлені методологією фізичних явищ, що відбуваються в замкнених системах. При цьому він не шукав джерел додаткової кінетичної, що виникає в його турбінах і спіральних трубах. За його словами [5] при певних умовах впорядкування руху атомів і молекул речовини, частина енергії їх руху на мікрорівні може перетворитися і перейти на макрорівень.

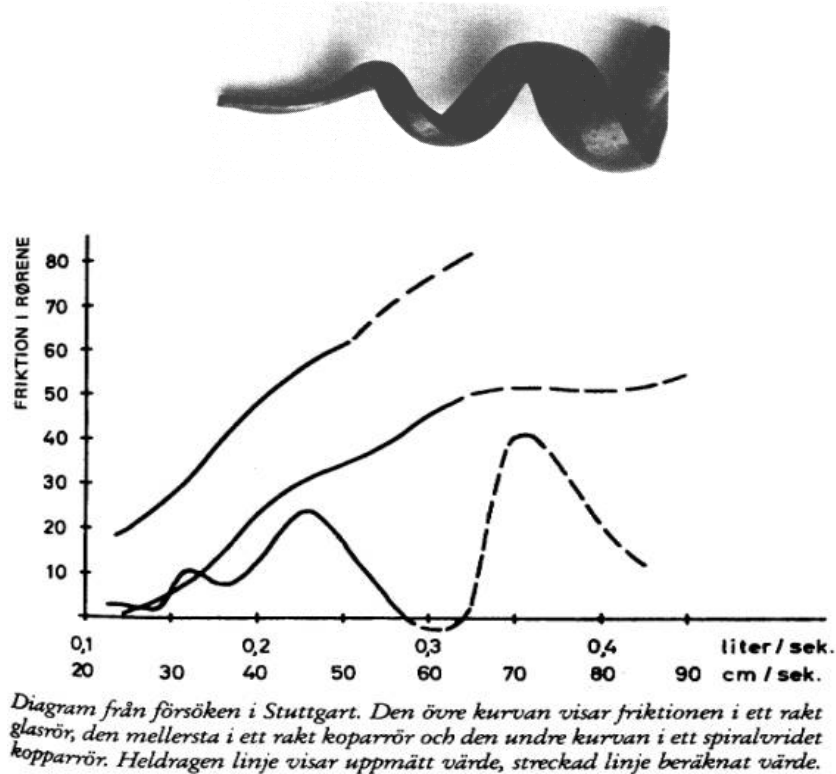


Рис.6 Фото спіральної труби та графік сили тертя в трубах різної форми залежно від швидкості протікаючої в них води.
Суцільною лінією показані експериментальні дані, пунктиром – розрахункові

Характерний приклад цьому – пониження температури води в річці на $0,2^{\circ}\text{C}$ при обтіканні водою округлого каменя. Це пониження температури було виміряне підчас спілкування Шаубергера з присланим до нього для перевірки його ідей професором одного із Венських університетів [5]. Напроти твердження професора про підвищення температури води внаслідок тертя об камінь, Шаубергер з термометром в руках довів зворотнє.

Пояснюючи цей феномен і інші феномени Шаубергер говорив про можливість часткового перетворення енергії хаотичного руху атомів і молекул довільного теплоносія в кінетичну енергію руху цього теплоносія як цілого. Це може наступити внаслідок надання спеціальної форми руху теплоносія. Для приводу його в рух по цій формі повинна затратитися енергія із зовнішнього джерела. Крім цього, енергія зовнішнього джерела необхідна на перемагання сили тертя теплоносія до стінок посудини. Якщо можна покрити ці енергозатрати всередині замкненої системи, то тільки за рахунок перетворення деякої із внутрішніх форм енергії теплоносія в макрокінетичну [6].

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Підтвердженням даного явища виступає також розробка в 1990 р. Ю.С.Потаповим вихрового теплогенератора, в якому відношення теплопродуктивності до затрат електроенергії на привод асинхронного двигуна складає більше 1 [7] . Тобто так званий к.к.д. установки знаходиться в межах 1,4-1,7.

В таблиці 1 наведено робочі параметри декількох модифікацій вихрових труб теплогенераторів Потапова.

Таблиця 1. Вихрові труби теплогенераторів „Юсмар”

Тип	1М	2М	3М	4М	5М
Габарити (діаметр / довжина), мм	54/600	76/800	105/100	146/1200	180/1500
Маса, кг	7,5	10	15	28	50
Робочий тиск, атм	5	5	6	6	6
Розхід води, м ³ /год	12	25	50	100	150
Потужність водяного насоса, кВт	2,7	5,5	11	45	65
Виробляє тепла, кВт	4,18	7,66	15,1	63,9	110,37
Електричний к.к.д. η	1,5	1,39	1,37	1,42	1,69

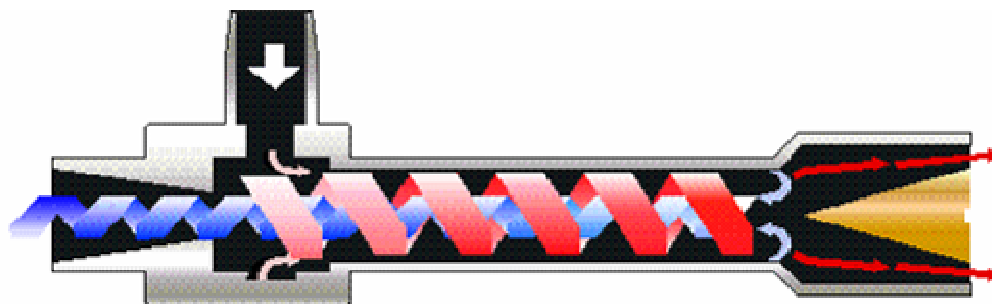


Рис.7 Вихрова труба та потік води в ній

Висновок. Людвіг Гербранд боровся безперервною битвою на протязі 20 років за визнання нової технології, висилаючи сотні листів до уряду і промисловців, та отримував негативні відповіді, які досить ввічливо відповідали йому відмовою.

Важко прорватися через бар'єр „знання” коли експерти думають, що вони бачать порушення закону збереження енергії коли обчислення не дозволяють отримати більший вихід енергії, ніж є насправді. Але в даному випадку є фактор яким ми нехтували в наших

II міжнародна науково-технічна конференція

обчисленнях і при його врахуванні немає порушення законів збереження.

In the given work the basic possible mechanisms of transformation of energy in so-called the Schauberger turbine and devices, close on a design, are considered

Література

1. Implosion nr. 58, pg 31 article "Kann Energie Wachsen".
2. Schauberger, Viktor „Das Problem der Donauregulierung” in Implosion nr.23.
3. Патент номер 117 749, виданий Віктору Шаубергеру Австрійським патентним офісом 10 травня 1930 р.
4. Herbrard, Ludvig „Das Geheimnis der Wasserkraft”, 1. Nov.1990, S.9.
5. Alexandersson, Olof, "Living Water" Gateway Books, Bath, UK.
6. Б.Н. Юдаев, Техническая термодинамика, теплопередача, М.: „Высшая школа, 1988.
7. Л.П. Фоминский. Роторные генераторы дарового тепла. Черкаси.: „Око-плюс”, 2003 р.

УДК 53 (09): 54-162

О. Богомоленко

Чернігівський державний педагогічний університет імені

Т.Г.Шевченка

МОДЕЛЬ СТАСІВА-ТЕЛЬТОВА

Показано важливість ідей Стасіва щодо ролі аніонних вакансій у процесах утворення частинок срібла при фотохімічному розкладі галогенідів срібла, які мали суттєвий вплив на подальші дослідження у цій галузі.

Умовні позначення

ПФЗ – приховане фотографічне зображення;

НТШ – наукове товариство імені Т.Г.Шевченка.

Внаслідок створення сучасних технологій світлотехніка розвивається настільки широко, що вона торкається майже всіх сфер життя людини. Так принцип фотохімічної дії світла лежить в основі фотографії, яка одночасно є галуззю науки, техніки і мистецтва. Однією з основних проблем ще від часу винайдення фотографії та кінематографії є проблема світлочутливості реєструючих фотоматеріалів. Вдосконалення різних видів фотографічних матеріалів нерозривно пов'язане зі збільшенням світлочутливості емульсії. Це питання, в свою чергу, безпосередньо пов'язане з проблемою прихованого фотографічного зображення. Тільки глибоке знання механізму його утворення в емульсійних мікрокристалах дозволяє свідомо змінювати світлочутливість емульсії і інші її властивості.

Поряд з вказаним практичним значенням, теорія утворення ПФЗ дуже важлива для кристалофізики та фотохімії кристалів. Це пояснюється тим, що процеси, які відбуваються в кристалі AgBr при дії світла, визначаються структурою реальних кристалів, т.б. природою дефектів ґратки.

Вагомий внесок в розвиток теорії механізму утворення ПФЗ зробив наш земляк з Галичини Остап Стасів, який працював в Німеччині і про якого в Україні мало хто знає. Його ім'я не можна знайти в жодному з вітчизняних енциклопедичних словників. Тільки завдяки публікаціям львівського професора Ярослава Остаповича Довгого ім'я видатного українського вченого стало відомим на його Батьківщині, яку він ніколи не забував і палко любив. В 1993 р. на науковому семінарі у Львівському національному університеті імені І.Франка комісія фізики НТШ вперше згадала ім'я цього талановитого вченого, а в 2003 р. на базі цього університету НТШ була проведена

II міжнародна науково-технічна конференція

міжнародна наукова конференція, присвячена сторіччю з дня народження вченого.

Історія фотографії починається з дослідів, в яких на папір або полотно з допомогою камери-обскури проектували зображення предмету і замальовували його. Ці досліді розпочались в кінці XV ст. і про них знав і сам відтворював їх ще Леонардо да Вінчі. Проте фотографія, в тому значенні слова, яке використовується на сьогоднішній день, виникла значно пізніше, коли не тільки стало відомо про світлочутливість багатьох матеріалів, але і з'явилися засоби використання і збереження змін в таких матеріалах під дією світла. Серед перших світлочутливих матеріалів в XVIII ст. були відкриті і дослідженні солі срібла. В 1802 р. Т.Уеджвуд в Великобританії зміг отримати зображення на шарі AgNO_3 , але ще не зміг його закріпити. Датою винайдення фотографії вважається 1839 р., коли Л.Дагер повідомив Паризькій академії про спосіб одержання фотографії, який він назвав в свою честь дагеротипією, хоча його авторство було спірним і багато важливих особливостей цього способу є досягненнями Ж.Н'єпса, які він розробив сам або в співпраці з Дагером. Майже одночасно з Дагером про інший спосіб отримання фотографії – калотипії повідомив в Великобританії У.Толбот, який отримав патент на цей винахід в 1841 р. Подібність цих способів обмежувалась використанням AgI в якості світлочутливого шару, відмінності з великі і принципи: в дагеротипії утворювалось відразу позитивне дзеркально відображене срібне зображення, що спрощувало процес, але робило неможливим одержання копій, а в калотипії виготовлявся негатив, з якого можна було отримувати довільну кількість копій. В цьому відношенні калотипія більш близька до сучасної фотографії, ніж дагеротипія; крім цього, в першій з них, як і в сучасній фотографії, проявлення використовувалось не тільки щоб зробити ПФЗ видимим для ока, але і для того, щоб його підсилити.

Принциповими для розвитку фотографій був перехід від камери-обскури до камери зі спеціально підібраним об'єктивом, який створив угорський оптик Й.Пецваль в 1840 р.; перехід від мокрих світлочутливих шарів, які готувались безпосередньо перед зйомкою, до сухих світлочутливих шарів, які виготовлялись заздалегідь і довгий час зберігаються в темноті без суттєвих змін. В цьому відношенні вирішальну роль відіграло заміна калодіоних світлочутливих шарів на желатині, які вперше використав англійський вчений Р.Меддокс в 1871 р., а також застосування замість чистого AgI інших галогенідів срібла, які більш зручні з практичної точки зору. Найбільш розповсюджений вид світлочутливих шарів – сухі желатинові шари з диспергованими в них мікрокристалами AgHal ($\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{Cl}+\text{Br}, \text{Cl}+\text{I}, \text{Cl}+\text{Br}+\text{I}, \text{Br}+\text{I}$).

Саме такі світлочутливі шари стали масово випускати промисловістю з середини 1870-х рр.

Важливу роль в розвитку фотографії на AgHal-світлочутливих шарах відіграло відкриття німецьким вченим Г.Фогелем в 1873 р. оптичної сенсibiliзації – розширення спектральної області чутливості світлочутливих шарів шляхом введення в них барвників, які поглинають світло більших довжин хвиль, ніж AgHal, які поглинають тільки в УФ області і на короткохвильовій ділянці видимої області, не далі синьої частини. Цим був подоланий великий недолік попередніх світлочутливих шарів [1].

Під дією світла в світлочутливих шарах виникає ПФЗ, механізм утворення якого вперше спробував пояснити в 1929 р. Шепард. При дослідженні фотографічних емульсій він показав, що підвищення світлочутливості в процесі дозрівання залежить від наявності в желатині органічних сполук, які містять лабільну сірку. Шепард припустив, що сірка бере участь в утворенні на поверхні зерен галогенідів срібла так званих "центрів чутливості", які діють як зародки, на яких утворюється атом срібла при фотолізі кристалу [2]. Ця думка лягла в основу загальної (не деталізованої) теорії утворення ПФЗ, яку запропонували в 1938 р. Р.Герні і Н.Мотт. Вони припустили, що центрами світлочутливості є дрібні кристали AgBr. Згідно цієї теорії, утворення ПФЗ проходить дві стадії:

1. швидка електронна стадія, яка практично не залежить від температури;
2. більш повільна йонна стадія, яка залежить від температури.

Поглинання фотона призводить до звільнення електронів і утворення позитивної дірки. Електрон захоплюється далі поверхневим центром світлочутливості, звичайною частинкою срібла або Ag₂S, а позитивна дірка дифундує (з дещо меншою швидкістю ніж електрон) до поверхні мікрочисталу, звідки вона виділяється в вигляді атому бромі. Цими процесами закінчується електронна стадія.

Друга стадія включає дифузю міжвузлових йонів срібла до негативно зарядженого центру світлочутливості, де йон з'єднується з електроном, утворюючи атом срібла і збільшуючи тим самим розмір цього центру. Наслідком повторення подібних процесів є ріст центрів світлочутливості до розмірів центру проявлення [3].

Запропонована теорія Герні і Мотта дозволила пояснити ряд фотографічних явищ: вплив низьких температур на світлочутливість, сенсibiliзацію, ефект Гершеля, відхилення від закону взаємозаміщення, процес проявлення і т.д..

Теорія Герні і Мотта ґрунтується на тому, що в галогенідах срібла існують тільки дефекти по Френкелю (міжвузлові йони Ag і

II міжнародна науково-технічна конференція

вакантні Ag-вузли), теорія яких була розроблена російським вченим Я.І.Френкелем ще в 1929 р. [4]. Існування цих дефектів було доведено також прямими дослідженнями Тубанда, Вагнера і Байєра. Проте, в цій теорії не враховувались можливі взаємодії між електроном і міжвузловими йонними срібла або між позитивними дірками і вакантними вузлами срібла.

Теорія Герні і Мотта, основана на чітких фізичних уявленнях, стимулювала постановку досліджень, які мали за мету перевірку і подальшу деталізацію теорії. Така деталізація на той час була просто необхідна, оскільки процес утворення ПФЗ більш складний, ніж це здавалось в період появи цієї теорії. Основні роботи в цьому напрямку були проведені в 1949-1952 рр. В цей період виникла потреба детального вивчення реальних кристалів галоїдного срібла. Збільшилось значення фізичних методів дослідження: вимірювання фотопровідності, теплоємності, термічного розширення, електропровідності, ізотопного обміну, спектрів поглинання і будови ґратки (методами рентгеноструктурного і електронографічного аналізів). Крім цього, збільшилась роль фізико-хімічних методів – вивчення кінетики і термодинаміки процесів дозрівання, фотолізу і проявлення.

Нові дані, отримані в результаті застосування вказаних методів, призвели до досить серйозних і цікавих змін, уточнень теорії утворення ПФЗ. Виявилось, що багато властивостей срібногалоїдних кристалів хімічно сенсibilізованої емульсії не співпадають з цією теорією. Ці розбіжності пояснив в 1949 р. професор Остап Стасів і його учень Йоахім Тельтов. Згідно їх гіпотези фотолітичне колоїдне срібло, яке утворюється при освітленні срібногалоїдних кристалів зі слідами Ag_2S , рівномірно розподілене по всьому об'єму кристалу. Це внутрішнє виділення срібла не можна пояснити, якщо вважати, що міжвузловий йон срібла є єдиним позитивно зарядженим дефектом ґратки галоїдного срібла і, як згідно теорії Герні і Мотта, прийняти, що вони не здатні захоплювати електрони при кімнатній температурі [5-7].

В зв'язку з цим в 1949 р. американським дослідником Дж.Мітчеллом була запропонована теорія фотографічної світлочутливості, згідно якої позитивно зарядженим дефектом, який відповідає за другу стадію утворення ПФЗ в хімічно сенсibilізованих мікрокристалах, є вакантний галоїдний вузол. Теорія Мітчелла ґрунтувалась на існуванні в галогенідах срібла тільки дефектів по Шоткі і отримала широке розповсюдження за кордоном [1].

Остап Стасів (1.01.1903-19.02.1985) народився у с. Борщовичах, що неподалік від Львова у сім'ї залізничника. Сім'я Стасівих мала восьмеро дітей, але не дивлячись на матеріальну скруту, всі діти

отримали освіту в українській гімназії Перемишля. Остап спочатку навчався в народній школі, а далі – в гімназії, яку закінчив на відмінно у 1921р. Після закінчення гімназії Стасів вступив до Вільного Українського університету, який українська інтелігенція заснувала таємно у 1921 р. в зв'язку з утисками і забороною української мови з боку польського уряду. Та незабаром він був заарештованим польськими властями за спротив владі. Проте, перед вироком Стасіву вдалось втекти до Гданська на судоверф. Через декілька місяців Український Студентський Комітет домігся включення його до списку осіб, які були рекомендовані на навчання за кордоном [8].

У 1923 р. Стасів став студентом фізичного факультету Берлінського університету, де слухав лекції таких корифеїв фізичної науки як М.Планка, А.Айнштейна, Макса фон Лауе, Вальтера Боте та інших. Після закінчення університету з 1927 р. продовжив свою освіту в Інституті фізики Гессенського університету під керівництвом професора В.Боте, де в листопаді 1929 р. здобув ступінь доктора філософії.

Дослідження галогенідів срібла О.Стасів розпочав в лабораторії Р.Поля в Геттінгенському університеті в 1931 р. На той час попит на матеріали для фотографії та кінематографії різко зростав. Але була проблема збільшення чутливості плівок, особливо для кіно. В зв'язку з цим в 1938 р. О.Стасів заснував і очолив дослідницьку лабораторію при фотографічній фірми "Zeiss Ikon" у Дрездені. Але для промисловості він працював без натхнення, тому що його як справжнього науковця завжди тішили дослідження, а не бізнес. Проте при розв'язанні питань, потрібних для технології, він розв'язував і наукові. У 1939 р. до лабораторії Стасіва приходить Й.Тельтов і відтоді починається їх спільна робота з теорії йонних та електронних процесів в йонних кристалах.

В 1947 р. Стасів добивається включення своєї лабораторії до новозаснованої Німецької Академії наук як "Інституту дослідження твердого тіла Академії Наук, Дрезденський філіал". Того ж року він став професором Дрезденського технічного університету, де працював впродовж двадцяти років. Читав лекції з різних розділів фізики – теорія атомів, статистична фізика. Особливого успіху в студентів та наукових співробітників мали розроблені ним курси з фізики твердого тіла і з теорії складних дефектних центрів у домішкових йонних кристалах. Вони привертали увагу своєю оригінальністю, новизною і притаманною для Стасіва глибиною висвітлення фізичних процесів і механізмів явищ. Професор з безмежною щедрістю передавав свої ідеї науковій молоді, багато з яких стали його дипломниками і згодом захистили дисертації.

II міжнародна науково-технічна конференція

В 1951 р. Стасів засновує в Берліні Інститут кристалофізики Німецької Академії наук. І саме завдяки його участі тоді вперше в Східній Німеччині добули зріджений водень і гелій. У 50-ти роки інститут Стасіва став відомим в Європі як центр кристалофізичних та низькотемпературних досліджень.

В 1959 р. у видавництві "Springer" (Берлін) у серії "Структура та властивості матерії" вийшла фундаментальна монографія Стасіва "Електронні та йонні процеси в йонних кристалах", яка може стати навчальним посібником для студентів і аспірантів, які займаються вивченням кристалофізики. В 1963 р. в Празі академічне видавництво опублікувало переклад цієї монографії чеською мовою. Монографія Стасіва, яку люб'язно надала його донька Марі-Луїза, на Україні знаходиться у музеї НТШ в єдиному екземплярі. І на жаль перекладу її українською мовою ще не має. Марі-Луїза до заміжжя теж займалась фізикою і багато її праць було опубліковано в журналі "Physica Status Solidi", засновником якого був Стасів.

7 жовтня 1956 р. професору Стасіву за видатні заслуги у розвитку науки для мирних цілей "за його основоположні дослідницькі праці в галузі фізики твердого тіла, зокрема, у зв'язку з вивченням природи складних фотохімічних процесів у непровідних твердих тілах, які дали поштовх для практичного використання" була присуджена Німецька національна премія III класу з науки і техніки [8].

В зв'язку з неспроможністю теорії Генрі і Мотта пояснити ряд властивостей срібногалоїдних кристалів хімічно сенсibilізованої емульсії, Мітчелл припустив існування в них тільки дефектів по Шоткі. Проте експериментальні результати праць Коха і Вагнера і проведені до цього оптичні вимірювання Стасіва інтерпретувались виходячи з того, що окрім дефектів по Френкелю в кристалі є дефекти і по Шоткі. Перед Стасівим постало завдання підтвердити або відкинути одночасне існування дефектів по Шоткі і дефектів по Френкелю.

У більшості праць Стасіва при дослідженні оптичних властивостей фотоемульсій об'єктами дослідження були вибрані монокристали AgBr та AgCl з домішкою Ag_2S . Оскільки вивчення властивостей таких кристалів стимулювалося тим, що внесення сірчаних сполук при синтезі фотографічних емульсій різко підвищувало їх світлочутливість. Для вимірювання поглинання такі кристали відпалювались при температурі 380° і потім швидко охолоджувались до кімнатної температури. Такі відпалені кристали при кімнатній температурі були досить пластичними, що давало змогу спресувати їх між двома скляними пластинками для отримання плиток необхідної товщини, придатних для оптичних вимірювань. Монокристали, одержані при 380° , практично повністю руйнувались в

результаті такої пластичної деформації при кімнатній температурі. Крім цього при такій методиці одержання кристалів зберігались властивості монокристалів, спостерігались важливі властивості змішаних кристалів, які не спостерігались раніше і стан рівноваги наставав через декілька годин після охолодження, а не відразу як для кристалів спресованих при кімнатній температурі.

Вивчаючи низькотемпературну люмінесценцію легованих сіркою кристалів AgBr , Стасів вперше виявив ефект дії інфрачервоного підсвічування на інтенсивність свічення (явище оптичного спалаху та гасіння) і зробив припущення, що відповідальними за різні смуги люмінесценції є домішкові дефекти таких можливих типів: двовалентний йон сірки в аніонному вузлі ґратки і міжвузловий йон срібла, що міститься поряд для компенсації надлишкового від'ємного заряду; двовалентний йон сірки в аніонному вузлі та розташована поряд аніонна вакансія. Ці дефекти О.Стасів назвав сульфідаргентумними комплексами і саме їм він приписував важливу роль у механізмі утворення при кімнатній температурі ПФЗ, розглядаючи ці дефекти як центри світлочутливості [5-7].

Запропонована О.Стасівим і Й.Тельтовим модель комплексних дефектів відома на сьогоднішній день спеціалістам як "Модель Стасіва-Тельтова". Ідеї Стасіва, щодо важливої ролі аніонних вакансій в процесі утворення частинок срібла при фотохімічному розкладі галогенідів срібла є суттєвими для обґрунтування механізму дії лазерного випромінювання.

З досліджень Стасіва з фізики галогенідів срібла слід підкреслити першорядне значення одержаних ним результатів для розв'язання важливої проблеми фізики і хімії твердого тіла — виявлення природи фотографічної світлочутливості. Роботи Стасіва заклали фундамент знань у цій області, стимулювали діяльність дослідників в різних країнах. Експерименти Стасіва і Тельтова і запропонована ними модель стали відправним пунктом для удосконалення теорії Герні і Мотта, а також для започаткування циклу досліджень з цієї проблематики, виконаних Дж.Мітчеллом. Цими проблемами займалися і на Україні: спочатку професор М.Цаль у Львові, а потім А.Глауберман в Одесі, причому, О.Стасів слідкував за цими роботами.

Наукові праці професора О.Стасіва мають цінність не лише для теорії фотографії, але вони є актуальними і на сьогоднішній день для фізики матеріалів, що використовуються в різних приладах сучасної твердотільної електроніки.

II міжнародна науково-технічна конференція

It is shown importance are the ideas of Stasiw regarding the role of anionic vacancy in the process of creation of particles of silver during the photochemical decay of the silver halogens, which had a great influence on the subsequent research in this field.

Література

1. Большая советская энциклопедия. Т.27.–М., 1953.– С.577.
2. Митчелл Дж. Свойства галоидных солей серебра, содержащих следы Ag_2S // Химия фотографических процессов.–М., 1951.–С.143-165.
3. Герни Р., Мотт Н. Электронные процессы в ионных кристаллах.–М., 1950.–С.38-49.
4. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов.Т.3.–М., 1959.–С.13-25.
5. Стасив О. Оптический метод доказательства существования дефектов по Шотки в бромистом серебре // Физические основы фотографической чувствительности / Под ред. К.В. Чибисова.–М., И.-Л., 1953. – С.46-58.
6. Стасив О. Оптические свойства бромистого серебра с добавкой сернистого серебра при низких температурах // Физические основы фотографической чувствительности / Под ред. К.В. Чибисова.–М., И.-Л., 1953. – С.59-72.
7. Стасив О., Тельтов Й. Два новых экспериментальных доказательства существования смешанных дефектов и их ассоциации в бромистом серебре // Физические основы фотографической чувствительности / Под ред. К.В. Чибисова.–М., И.-Л., 1953. – С.73-78.
8. Довгий Я.О. Наукова школа професора Стасіва // Аксіоми для нащадків / Упорядник О.Романчук.–Львів: Меморіал, 1992.– С.218-247.

УДК 658.5

О.Прокопів

*Тернопільський державний технічний університет
імені Івана Пулюя*

ІННОВАЦІЙНИЙ РОЗВИТОК ПІДПРИЄМСТВ СВІТЛОТЕХНІКИ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

В статті розглянуто необхідність використання стратегічної моделі інноваційної політики України. Представлено інноваційний розвиток економіки і методологію розробки інноваційної моделі на основі комплексних науково-інноваційних цільових програм, які розробляються на базі пріоритетних напрямів розвитку держави.

В багатьох державах створено сприятливе для появи інновацій внутрішнє і зовнішнє середовище: підтримуються усі види інновацій, нові організаційні структури, розробляються та реалізуються цільові програми інноваційного розвитку, формується сприятливе законодавче та податкове забезпечення, цільове державне фінансування.

Результат такого сприяння – зростання наукоємності ВВП. Для США, Японії, Німеччини видатки на НДДКР складають 2,5-2,9% від ВВП, у Франції, Великобританії – 2,2-2,4%, Італії і Канаді – 1,3-1,7%, в Україні – менше 1% (хоча законом передбачено 1,7% від ВВП). В Україні за останні 10 років частка держави у національних видатках на науку знизилась. З одного боку це зумовлено скороченням оборонних програм, з другого – прискоренням розвитку інноваційної сфери у приватному секторі.

У США активно формують інкубатори інновацій, в Японії проект TARA (Tsucuba Advanced Research Alliance) об'єднав у місті Цукуба найбільший у світі потенціал вчених, викладачів, студентів, дослідників. Тут сконцентровано близько 50 науково-дослідних центрів, 200 приватних дослідницьких лабораторій, 12 тисяч вчених та інженерів. Загальний бюджет містечка становить майже \$3 млрд.

Метою статті є обґрунтування стратегії інноваційної політики розвитку промислових підприємств.

Інноваційна модель підприємства формується на концепції інноваційної політики держави. Вона повинна забезпечувати пріоритет інновацій, підвищувати інноваційну активність підприємств. Формування на підприємстві інноваційної моделі дає змогу бачити його пріоритети. В такому варіанті учасники інноваційного забезпечення, траєкторію досягнення цих віх вибирають самостійно на основі визначених пріоритетів держави (конкретних показників інновацій з диференціацією по галузях та часу). В такому варіанті

II міжнародна науково-технічна конференція

учасники інноваційного забезпечення, траєкторію досягнення цих віх вибирають самостійно на основі конкурентної боротьби. Інноваційна модель розвитку підприємства створюється з відповідними організаційними структурами зверху до низу, їх правовим статусом, достатнім фінансуванням та матеріально-технічним забезпеченням. Роль держави в моделі полягає у своєчасній зміні показників інноваційних потреб, координації робіт з розробки та впровадження інновацій, в стимулюванні їх та підтримці.

Інноваційна політика держави ґрунтується на певній інноваційній стратегії. Російські вчені В. Фрідлянов, Р. Некрасов, С. Остапюк виділяють три стратегічні моделі інноваційної політики:

1. Модель стратегії “перенесення” полягає у використанні наявного зарубіжного науково-технічного потенціалу через закупівлю ліцензій та виготовлення продукції на їх основі з метою продажу на зарубіжних ринках.
2. Модель стратегії “нарощування” передбачає використання власного науково-технічного потенціалу, залучення іноземних вчених, об’єднання результатів фундаментальної та прикладної науки з метою створення нових продуктів та технологій для власних потреб.
3. Модель стратегії “запозичення” передбачає освоєння випуску наукомісткої продукції, яку виробляли раніше індустріально розвинені країни, на основі використання дешевої власної робочої сили та частини власного наукового потенціалу.

Держава в інноваційній моделі розвитку забезпечує функціонування тих галузей, підприємств, де господарювання на приватних принципах непривабливе, неефективне, або неможливе. Для розв’язання цих завдань використовують такий інструмент як державне інноваційне підприємництво.

В Україні інноваційна діяльність розвивалась на засадах командно-адміністративної економіки, характерними властивостями якої були:

- відсутність ендогенного чинника розвитку;
- незалежність фундаментальних та прикладних досліджень;
- пріоритетний розвиток НДДКР в оборонній сфері за рахунок екзогенного чинника;
- неможливість використання технологій подвійного призначення в народногосподарському комплексі;
- ігнорування такими інноваціями як інновація – організаційні форми та інновація – нові ринки збуту продукції;
- слабка дифузія впровадження інновацій.

В умовах ринкової трансформації економіки необхідно здійснити переорієнтацію інноваційної діяльності. Держава повинна

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

виробити ясну стабільну інноваційну політику, розробити концепцію, побудувати інноваційну модель такого розвитку. На мою думку – це основні послідовні етапи, які можуть здійснюватися, уточнюватися, але їх обійти неможливо.

Державна інноваційна політика може формуватися на основі розглянутих трьох моделей стратегій розвитку, запропонованих російськими вченими В. Фрідляновим, Р. Некрасовим, С. Остапоком: “перенесення”, “запозичення”, “нарощування”. Крім цього – повнішого використання науково-технічного потенціалу оборонного комплексу, його розвитку, об’єднання ринкових методів стимулювання із посиленням державного регулювання, створенням механізмів впровадження новітніх розробок у виробництво та комерційного клімату для розвитку фінансово-промислових груп, технопарків, технополісів, вільних економічних зон, інших ринкових інноваційних структур.

Підприємство ОСП “Корпорація Ватра” зуміло за короткий термін створити ринкову структуру управління, наростити обсяг виробництва інноваційної продукції та розширити ринки збуту.

Так, в 2004 році ОСП “Корпорацією Ватра” розроблено 15 нових виробів. Освоєно і впроваджено у виробництво 8 нових виробів. Випущено нової продукції (перші промислові серії) на суму 1,5 млн. грн., що складає біля 4 відсотків від загального обсягу (37 млн. грн.).

Промисловістю світлотехніки освоєно нові прилади для освітлення доменних, сталеплавильних, прокатних цехів, приміщення коксохімічних заводів, приміщення цементної та інших галузей промисловості.

Крім цього ОСП “Корпорація Ватра” займалась освітленням теплиць та оранжерей. Конкуренція на ринку тепличних світильників спонукала створити ряд сучасних виробів, в яких застосовані високоефективні джерела світла. Це серії 05, 06, 07, в яких корпусні деталі виготовлені з алюмінієвого прокату, відбивачі з високочистого дзеркального матеріалу фірми “Аланод”. Ступінь захисту електричного блоку IP54. Світильники мають досить високі світлотехнічні характеристики. Особливістю таких світильників є низьке енергоспоживання (струм споживання 3,1 А для лампи 600 Вт, $\cos \phi = 0,95$).

В 06 серії застосована лампа потужністю 600 Вт на напругу 380 V (аналогів такому світильнику в СНД не існує). Це дає можливість різко скоротити витрати на монтаж електричної сітки теплиць. Крім того лампа має вищу на 15 відсотків світловіддачу.

Особливою характерністю конструкції виробів є відсутність гальванічних і лакофарбних процесів покриття при їх виготовленні, що суттєво впливає на енергоспоживання і екологію Товариств.

Організовано виробництво сучасної вибухобезпечної техніки.

II міжнародна науково-технічна конференція

1. Розроблено серії з лампами розжарення 150, 200, 300 Вт. Ці вироби замінюють дорогі аналоги серій 11ВEx. Різниця в собівартості в 1,6 рази нижча за рахунок переходу на литва під високим тиском замість литва під низьким тиском і на завальцовку скла замість заливки. Підготовлено виробництво, випущено настановну серію. Вироби проходять випробування в Донецьку.
2. Розширено номенклатуру серії 18 Вex – підготовлено виробництво і випущено промислову партію світильника з пониженим корпусом і низьким відбивачем. Це зроблено на вимогу споживачів для встановлення в місцях розливу нафтопродуктів в цистерни, тощо.
3. Розширено номенклатуру 11-ї серії – введені перспективні лампи ДРІ 150 і 250 Вт.
4. Освоєно виробництво вибухобезпечних стельових світильників серії 14 ВEx.
5. В даний час у випробувальному центрі м. Донецька знаходиться серія вибухобезпечних прожекторів РО/ГО/ЖО 17В зі ступенем вибухозахисту 2Ex пот. 150-250 ВТ і Exn потужністю 150-400 Вт.

Внесено корективи в розробку прожекторної техніки.

Освоєно виробництво прожектора з фацетним відбивачем серії 06В потужністю 600/1000 Вт під двопальникові натрієві лампи з терміном служби до 60 тисяч годин. Комплектується незалежним блоком ПРА.

Призначений прожектор для освітлення відкритих просторів. В цьому році для потреб нафтогазового комплексу було виготовлено 145 штук на суму 252 тисяч грн. Також він знайде своє місце і при освітленні об'єктів залізничного транспорту.

Також для освітлення відкритих просторів, архітектурної підсвітки створено прожектор нової серії потужністю 250/400 Вт. Вдалось в цю ж конструкцію помістити і лампу 600 Вт з компенсацією реактивної потужності.

Крім цього проводяться роботи із модернізацією прожекторів 07 і 08 серій, що забезпечить здешевлення прожектора до 350 грн./шт. Розширюється виготовлення спеціального освітлення на світлодіодах.

Призначення – зображення з наступною підсвіткою інформаційних знаків для забезпечення орієнтування людей в аварійних ситуаціях з подачею звукового сигналу.

Розробляється і освоюється виробництво нових баластів.

З метою зменшення нормативної собівартості, покращення монтажних характеристик, підвищення корозійної стійкості, розроблені незалежні баласты в пресованому алюмінієвому профілі потужністю ДНат – 250/400, ДРЛ 400/700, ДРІ-400/700.

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

В конструкції застосовано ряд новинок щодо кріплення бокових кришок пустотілими заклепками та гвинтами-саморізами. Практично ліквідовано гальванічні операції. Очікуване зниження собівартості – до 10 грн. на баласті.

Розроблено програму розвитку номенклатури на 2005 рік. В промисловій світлотехніці розширено застосування пресованих алюмінієвих профілів для виготовлення корпусів електроблоків, зокрема, створюється світильник для освітлення високих промислових приміщень під ГЛВТ потужністю ДНаТ-600, ДРІ-700, ДРЛ-1000 Вт з вмонтованою апаратурою управління.

Малопотужні світильники з відбивачами під ГЛВТ потужністю від 100 до 200 Вт. Аналоги РСР05-125, НСП17-100/200 – Ардатовського СТЗ.

Світильники з відбивачами для загального освітлення виробничих приміщень під ГЛВТ потужністю 150 – 250 Вт.

Малопотужні світильники з фасетним відбивачем і полікарбонатним розсіювачем під ГЛВТ потужністю 30 – 100 Вт.

Малопотужні світильники з скляними розсіювачами під ГЛВТ потужністю 25 – 200 Вт.

Світильники з скляними розсіювачами для загального освітлення виробничих потужностей під ГЛВТ потужністю 100–250 Вт.

Розширюється номенклатура вибухобезпечної техніки. Випускаються стаціонарні світильники типу НСР/ЛСР з компактними люмінесцентними лампами потужністю 11, 15 Вт, світлодіодами, лампами розжарення потужністю 100 і 200 Вт у виконаннях.

Аварійні світильники з лампою KLL 28 Вт.

Проводяться зміни у випуску прожекторної техніки для зовнішнього освітлення.

1. Для освітлення спортивних споруд і відкритих просторів планується розробити прожектори під лампу ДНаТ-1000.

2. Для критих спортивних залів розробляються прожектори на базі прожекторів ГО07В-1000.

На базі деталей, вузлів отриманих по кооперації, планується розробка прожекторів з малопотужними ГЛВТ 70...150 Вт, а також 250, 400 Вт з цоколем R7S.

Планується розробка прожекторів загального освітлення взамін НО. Для парків буде розроблено новий світильник.

ОСП “Корпорація Ватра” та інші підприємства в інноваційному розвитку використовують тільки власні ресурси. І це свідчить про те, що і в умовах нестабільної економіки інноваційний розвиток підприємств можливий.

The article examines the necessity of the use of strategic model of innovative policy of Ukraine. Innovative development of economy and methodology of development of innovative model on the basis of the complex scientific-innovative having a special purpose programs which are developed on the base of priority directions of development of the state is offered.

ЗМІСТ

ВНЕСОК ІВАНА ПУЛЮЯ У СВІТЛОТЕХНІКУ	3
<i>В.Козирський, О.Рокіцький, В.Шендеровський. ІВАН ПУЛЮЙ І СЬОГОДЕННЯ УКРАЇНИ</i>	<i>7</i>
<i>В.Андрійчук, С.Воркун, Л.Костик. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЗМІННОГО СВІТЛОВОГО ПОЛЯ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН НА ЗАКРИТОМУ ГРУНТІ</i>	<i>15</i>
<i>П.Євтух, Н.Куземко. ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ПОХИБКИ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ</i>	<i>22</i>
<i>І.Шур. ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ НЕРІВНОВАЖНИХ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ - НОВИЙ НАПРЯМ У ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ.....</i>	<i>27</i>
<i>И.Труфанов, А.Чубаров, Е.Ксендзюк, Л.Богданова. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ГАЗОПЫЛЕУДАЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОАО ЗАПОРОЖАЛЮМИНИЙ.....</i>	<i>39</i>
<i>И.Труфанов, Д.Ярымбаи. СЕНСОРНАЯ ПОДСИСТЕМА ЛОКАЛЬНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ</i>	<i>53</i>
<i>Р.Пилипчук, В.Щиренко. ПРОБЛЕМА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ</i>	<i>65</i>
<i>Я.Довгий, І.Маньковська, С.Тернавська. ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ “ЗЕЛЕНОГО” GaP - СВІТЛОДЮДА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КРАЙОВОГО ПОГЛИНАННЯ ТА ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДБИВАННЯ ...</i>	<i>77</i>
<i>С.Мовчан, Л.Мовчан, Я.Проць. ПОБУДОВА ОБЛАСТІ СТІЙКОСТІ ЛІНІЙНИХ НЕПЕРЕРВНИХ СИСТЕМ В ПРОСТОРІ ДВОХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО НЕЛІНІЙНО ВПЛИВАЮТЬ НА КОЕФІЦІЄНТИ ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО РІВНЯННЯ.....</i>	<i>91</i>
<i>А.Лупенко. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННОГО ПУСКОРЕГУЛЮЮЧОГО АПАРАТА ДЛЯ НАТРІЄВИХ ЛАМП ВИСОКОГО ТИСКУ</i>	<i>101</i>
<i>М.Тарасенко, А.Кудряшова. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКТИВНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ ДРОСЕЛІВ ДЛЯ РОЗРЯДНИХ ЛАМП</i>	<i>110</i>

"СВІЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

Н.Гаєвська, Я.Герій. ФОТОМЕТРИЧНЕ ТІЛО В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ОПРОМІНЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З НЕСИМЕТРИЧНИМ СВІТЛОВИМ РОЗПОДІЛОМ	126
М.Паламар, А.Паламар. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ І МОНІТОРИНГУ ПРИСТРОЇВ ГАРАНТОВАНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ..	134
О.Шрам, І.Авдєєв. ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСМНОСТІ ПРИ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ СКЛА	140
І.Соловей. ВОДА – СУМАТОР ЕНЕРГІЇ	146
О.Богомоленко. МОДЕЛЬ СТАСІВА-ТЕЛЬТОВА.....	155
О.Прокопів. ІННОВАЦІЙНИЙ РОЗВИТОК ПІДПРИЄМСТВ СВІЛОТЕХНІКИ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ.....	163

Н а у к о в е в и д а н н я

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський державний технічний університет
імені Івана Пулюя

**"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ,
ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"**

Праці II Міжнародної
науково-технічної конференції

(Тернопіль, 24-27 травня 2005 р.)

Відповідальний редактор завідувач кафедри світлотехніки ТДТУ
імені Івана Пулюя ТДТУ професор **Андрійчук В.А.**

Підписано до друку 20.06.2005. Формат 70×100/16.
Папір ксер. Гарн. Times New Roman. Друк різогр.
Наклад 200 прим. Зам.105.

**Оригінал-макет підготовлений в Тернопільському державному
технічному університеті імені Івана Пулюя**

Віддруковано у видавництві Тернопільського державного
технічного університету імені Івана Пулюя
46001, Тернопіль, вул.Руська, 56.