

**ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА  
АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**Паздрій Ігор Ростиславович**

УДК 628.93

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В АНОМАЛЬНИХ  
РЕЖИМАХ РОБОТИ ТА ЗАПОБІГАННЯ ЇХ ВИНИКНЕННЮ**

05.09.07 - Світлотехніка та джерела світла

**РУКОПИС**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2000

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Використання ВДС, до яких належать і РЛВТ дозволяє, насамперед, розв'язати проблему раціонального використання електроенергії в галузі світлотехніки з одночасним підвищенням ефективності освітлювальних установок [1, 56]. РЛВТ сьогодні складають практично найефективнішу групу розрядних джерел світла [70]. Однак, поряд з такими позитивними параметрами, як високі світлова віддача і питома потужність випромінювання, бажана передача кольору, є низка особливостей, які не дозволяють повністю використати ці переваги. Сюди слід віднести, насамперед, виникнення в процесі експлуатації РЛВТ аномальних режимів роботи, які викликають появу аномальних струмів. Для запобігання цьому необхідно визначити електричні характеристики ВДС в аномальних режимах роботи.

#### 1.1. Особливості роботи високоінтенсивних ламп в колах змінного струму

У більшості схем, які містять розрядні лампи, використовують живлення від мережі змінного струму. Це призводить до того, що за кожний період напруги живлення в лампі двічі відбувається запалювання розряду. Напруга запалювання, загалом, перевищує напругу горіння. Слід розрізняти напругу, при якій здійснюється перше запалювання лампи, від напруги запалювання при зміні напрямку протікання струму в колі. Напруга повторного запалювання, інакше напруга перезапалювання, є значно меншою за напругу початкового запалювання.

У ВДС, зокрема в МГЛ, внаслідок специфічних особливостей виникає низка затруднень, пов'язаних з їх запалюванням та перезапалюванням [84].

Високоєфективні катоди, які використовуються в дугових ртутних лампах, виявились зовсім непридатними для МГЛ [3, 32, 73]. Внаслідок взаємодії галогенідів з окисами барію і кальцію утворюються галогеніди металів, які конденсуються на стінках пальника. Залишковий кисень взаємодіє з вольфрамом, утворюючи леткі окиси вольфраму. Останні переносяться на стінки пальника, викликаючи їх почорніння. Тому на сьогодні в МГЛ використовують електроди з чистого або торійованого вольфраму. Слід відзначити, що ці електроди працюють краще, ніж в ДРЛ. Це пояснюється участю торію в галогенному циклі [14]. Проте на підвищення напруги запалювання найсуттєвіше впливає наповнення МГЛ [13, 14]. Це проявляється, по-перше, у дії на електроди. Під час остигання лампи спостерігається адсорбція галогенідів на електродах - отруєння електродів. На їх поверхні утворюється плівка, яка викликає збільшення роботи виходу електронів  $\phi$ .

Внаслідок високої гігроскопічності солей галогенідів металів вода є одним з основних компонентів, які викликають появу в МГЛ забруднювальних домішок. На рис. 1.1, 1.2 показані залежності роботи виходу  $\phi$  від тиску пари води і водню, які отримані в [13]. Встановлено також, що під дією парів  $HgI_2$  при температурі 1273 К робота виходу зростає на 1,4 ... 1,6 eV.

Для багатоелектродних МГЛ велику небезпеку становить явище електролізу, викликане наявністю лужних металів, які можуть осідати в позаелектродній області і викликати проникнення іонів лугу до фольгового вводу електрода. У результаті цього впай руйнується протягом декількох сотень годин роботи [92].

По-друге, металогалогенне наповнення викликає зменшення коефіцієнта іонізації Таунсенда  $\alpha$  [2]. При роботі МГЛ взаємодія компонентів супроводжується утворенням стійких від'ємних іонів з дисоціативним захопленням електронів у відповідності з такою реакцією:

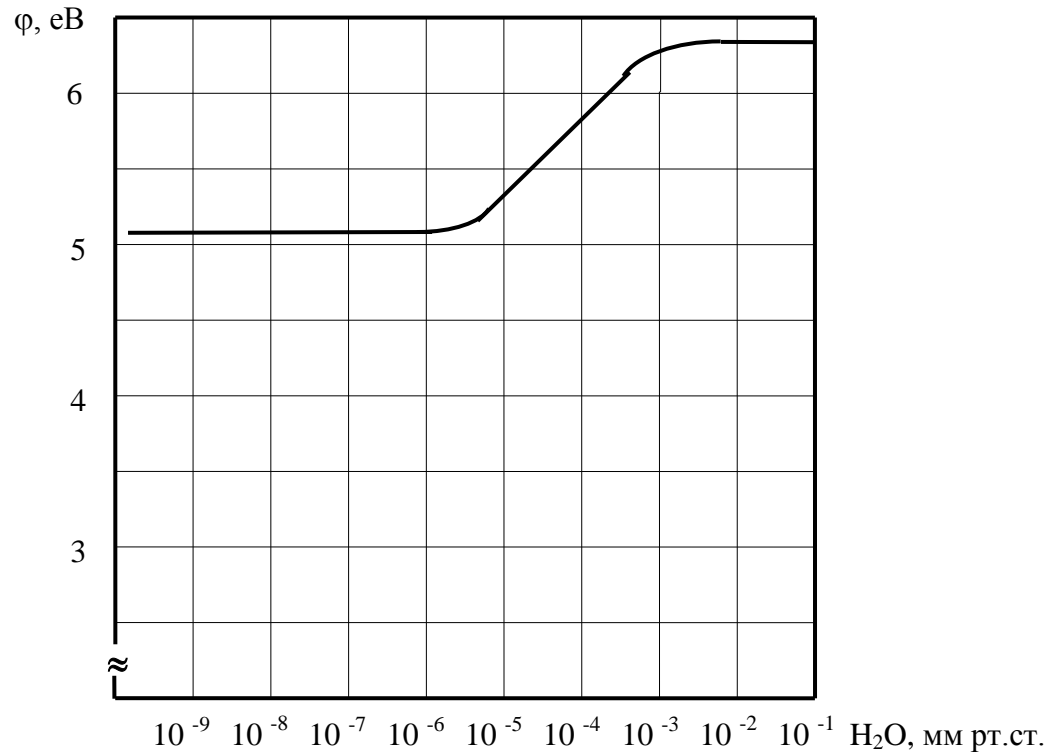
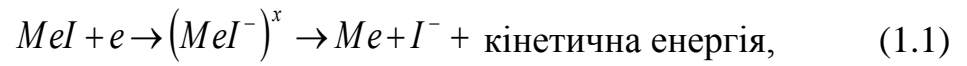


Рис. 1.1. Залежність роботи виходу  $\phi$  від тиску пари води.

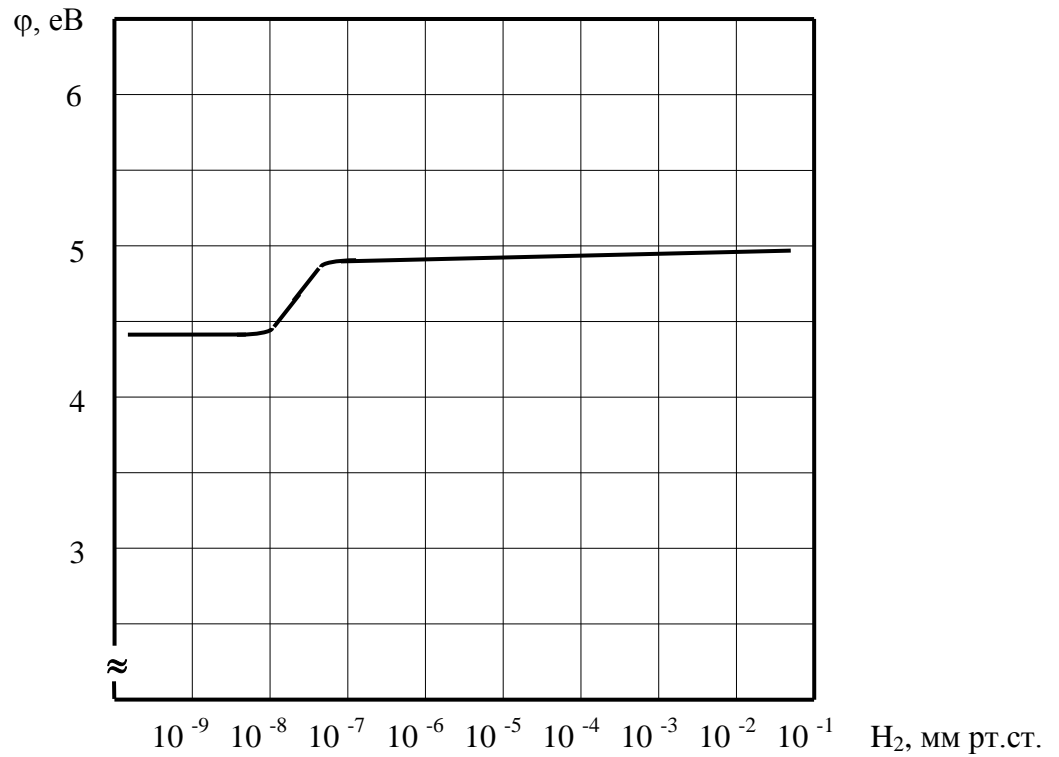


Рис. 1.2. Залежність роботи виходу  $\phi$  від тиску пари водню.

де  $x$  - показник, який вказує на появу збудженого атома, знак -- означає електровід'ємний іон.

Крім цього, аніони можуть появилися завдяки процесам співударів атомів і радикалів або при приєднанні електронів:



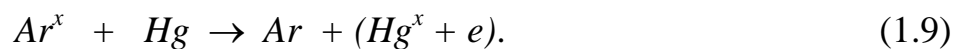
Приєднання електронів до нейтральних атомів призводить до зменшення коефіцієнта іонізації Таунсенда  $\alpha$ , що у свою чергу збільшує напругу запалювання. В електричних полях, при яких лампа повинна запалюватися, від'ємні іони не можуть отримати енергії, достатньої для утворення нових електронів. Тому кожний такий приєднаний електрон є втраченим для утворення електронної лавини. Для оцінки захоплення електронів використовується коефіцієнт  $\eta$  : чим вищий тиск парів галогенідів в холодному стані, тим більший коефіцієнт  $\eta$ . Отже, реальний коефіцієнт іонізації Таунсенда  $\alpha$  визначатиметься [84]:

$$\alpha = \alpha' - \eta, \quad (1.6)$$

де  $\alpha'$  - уявний коефіцієнт іонізації.

Очевидно, що зменшення коефіцієнта захоплення електронів  $\eta$  призведе до збільшення коефіцієнта іонізації  $\alpha$  і, відповідно, до зменшення напруги запалювання.

Присутність водню, внаслідок наявних забруднень матеріалу електродів і розпаду молекул води, послаблює прояв ефекту Пеннінга між аргоном, який вводиться в пальник для полегшення запалювання, і ртуттю та викликає зменшення концентрації збуджених атомів аргону. Отже,



Таким чином, підводячи підсумок вищенаведеному, слід відзначити, що труднощі пробою і запалювання ВДС обумовлені:

- низькими емісійними характеристиками катодів, які погіршуються ще і адсорбцією металогалогенних наповнювачів;
- наявністю в наповнювальному газі речовин, які сприяють утворенню електровід'ємних іонів.

Для зменшення напруги запалювання вітчизняними і закордонними вченими запропонована низка способів, які полягають в удосконаленні конструкції МГЛ [34, 41, 58], створенні сприятливих для запалювання умов[18], розробці спеціальних ЗП і схем ввімкнення високоінтенсивних ламп [4, 8, 53]. Детальний аналіз способів зменшення напруги запалювання поданий у додатку А. Внаслідок складності та появи побічних негативних явищ, пов'язаних із зменшенням світлового потоку і віддачі, терміну служби, не всі із запропонованих способів можна сьогодні реалізувати. Вітчизняні ВДС, в тому числі МГЛ, випускаються у двоелектродному виконанні. Тому для їх запалювання застосовують ЗП, парк яких досить різноманітний. З метою систематизації схемних рішень ЗП здійснена їх класифікація та подані короткі

характеристики (додаток Б). Більшість недоліків, пов'язаних із запалюванням і перезапалюванням ВДС, в основному успішно усунені.

На сьогодні найбільші неприємності споживачам ВДС, насамперед МГЛ, приносить виникнення аномального режиму роботи під час їх розгоряння [2, 12, 17, 29, 73]. Тоді РЛ поводить себе як випрямляч. Тому такий режим роботи отримав умовну назву “випрямного”. Даному режиму притаманні аномальні струми, які в 7 ... 10 разів перевищують номінальні струми високоінтенсивних ламп. Тут, і в подальшому, мається на увазі, що використовувані баластні дроселі суттєво нелінійні. Таке значне перевищення струмів надзвичайно шкідливо відбивається на терміні служби ламп. Відбувається значний перегрів електрода, який в даний півперіод є катодом. Крім цього, здійснюється посилене іонне бомбардування другого, холодного, електрода. Все це викликає прискорене розпилення матеріалів електродів. Низький тиск сприяє тому, що емітовані електродом електрони не повертаються назад на нього, як це, до деякої міри, має місце в робочому режимі. Внаслідок значних амплітуд виникнуті струми можуть викликати спрацювання автоматичних вимикачів захисту мережі.

Не дивлячись на важливість вказаного режиму, дотепер відсутні аргументоване наукове пояснення причин виникнення і ефективні методи усунення аномального режиму в процесі розгоряння високоінтенсивних ламп, зокрема МГЛ. Це викликано, насамперед, відсутністю методик і результатів вимірювань параметрів ВДС для даного режиму роботи.

## 1.2. Аналіз аномальних режимів роботи розрядних ламп

На різних етапах роботи ВДС може працювати в, так званих, аномальних режимах. Перш, ніж перейти до аналізу аномальних режимів, з метою

уникнення двоякого тлумачення формульованих положень, дамо визначення основних використовуваних понять.

Номінальний режим в колі з РЛ - це такий режим, коли всі електричні та світлотехнічні характеристики лампи знаходяться у відповідності з вимогами нормативної документації. Форма струму, як правило, несуттєво відрізняється від синусоїдної. Для допустимих змін напруги джерела живлення і параметрів ПРА характеристики ламп не виходять за допустимі межі.

Аномальний режим в колі з РЛ - це такий режим, коли одна або декілька електричних чи світлотехнічних величин суттєво відрізняються від нормативних. До аномальних відносяться режими, які виникають при тривалому розгорянні лампи, при несправних лампі чи схемі ввімкнення, при певних зовнішніх впливах. Необхідно відзначити, що аномальний режим може бути як симетричним, так і несиметричним. Загалом, при несиметричному аномальному режимі суттєво зростає напруга перезапалювання в один із півперіодів. Робота в аномальному режимі викликає електричне перевантаження елементів схеми ввімкнення. Розрахунок аномальних режимів пов'язаний із значними труднощами. Доцільно детально проаналізувати аномальні режими для РЛ різних типів, що полегшить встановлення причин виникнення і способів усунення аномальних режимів під час розгорання ВДС.

Дослідження аномальних режимів в колах з люмінесцентними лампами проведені В.А. Волченком [23]. Встановлено, що аномальний режим має місце в таких випадках:

1. При стартерному запалюванні. У пусковому режимі лампа замкнена накоротко контактами стартера. При цьому можливе залипання контактів стартера, що триває іноді від кількох секунд до кількох годин. Це викликає струмове перевантаження і перевищення температури ПРА.

2. Наприкінці терміну служби, що зумовлено дезактивацією одного з електродів. Режим іноді називають випрямним внаслідок того, що лампа в цей



час поводить себе подібно до випрямляча [25]. Під час цього режиму відбувається збільшення напруги перезапалювання і підвищення струму кола в 2,0 ... 2,1 раза. Суттєве збільшення струму кола викликає перегрів ПРА [24, 26]. Це вимагає для розрахунків ПРА передбачати збереження обмеженої працездатності апаратів в аномальних режимах.

Крім вказаних випадків, збільшення струму кола також можливе внаслідок виникнення перехідних процесів під час запалювання лампи [5]:

а) в період роботи стартера, коли відбувається замикання біметалевих контактів. Тривалість контактування становить 0,2...0,5 с. Контур, який містить реактивний елемент - дросель, періодично під'єднуватиметься до джерела змінного струму. Момент під'єднання визначається процесами нагріву і охолодження біметалевих контактів, тому може відбуватись для кутів в межах від 0...180°. Амплітуда струму перехідних процесів, які при цьому виникають, залежить від активного опору обмотки ПРА, електродів лампи і нелінійності дроселя. Перехідні процеси продовжуватимуться до моменту запалювання лампи.

б) у випадку виникнення розряду в лампі. При цьому має місце однократний перехідний процес, аналогічний до процесу при контактуванні електродів стартера. Відмінність полягає лише в тому, що опір електродів РЛ не впливає на струми перехідного процесу.

При запалюванні ЛЛ розрізняють такі стадії: пробій електрод - стінка, міжелектродний пробій, тліючий розряд, несиметричний дуговий розряд, симетричний дуговий розряд [86]. Тривалість цих стадій в реальних схемах може становити від долей секунди до кількох десятків секунд.

Дослідження і експериментальні дані показали, що стадії тліючого і несиметричного розрядів є вирішальними з точки зору руйнування оксидних електродів. Суттєве збільшення струму кола з ЛЛ під час аномальних режимів

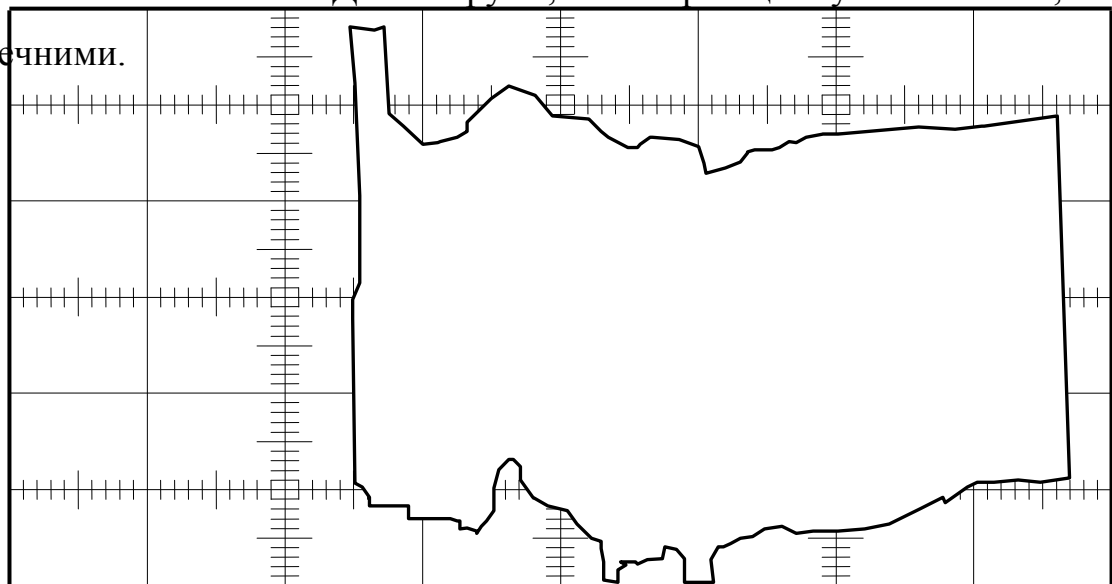
вимагає необхідності їх врахування при розрахунках і конструюванні ПРА, хоч це викликає деяке збільшення масогабаритних показників останнього.

У розрядних лампах високого тиску, на відміну від ЛЛ, аномальні режими роботи виникають загалом в процесі їх розгоряння. Дослідження аномальних режимів в колах з дуговими ртутними лампами проведені А.Л.Вассерманом [12]. За результатами проведених експериментів з дроселями різних типів отримано:

- аномальні струми кола з ДРЛ зумовлені перехідними процесами, які виникають після запалювання лампи;
- тривалість перехідних процесів коливається в межах 1 ... 3 с;
- значення струму перехідного процесу залежить від нелінійності дроселя;
- вентильна чи випрямна дія ламп проявляється не відразу після запалювання, а через декілька десятків періодів напруги живлення.

Автор вказує на причину виникнення аномальних струмів і наводить вираз для їх визначення. На жаль, в даній ситуації обмежуються лише розглядом причин виникнення аномальних струмів і наслідків, до яких вони можуть призвести. Однак, тут не розглядається власне процес їх виникнення і відсутній аналіз способів, які запобігають виникненню аномальних режимів під час розгоряння.

На сьогодні, як свідчать теж проведені нами дослідження, аномальний режим має місце в колах з ДРЛ (рис. 1.3). Однак завдяки удосконаленню технології виготовлення ДРЛ струми, які при цьому виникають, не є небезпечними.



При розробці натрієвих ламп нових типоміналів встановлено, що із зниженням потужності їх термін служби суттєво знижується [70, 89]. Так, приміром, лампи потужністю 70 Вт мали середній термін служби 2000 годин в порівнянні з 24000 годинами для джерел світла потужністю 250 Вт і 400 Вт. Вивчення цього явища показали, що причина такого зменшення терміну служби полягає у прискореному розпиленні електродів. Незважаючи на удосконалення електродних вузлів, явище залишалось неусунутим для ламп малої потужності. Під час ввімкнення лампа поводи́ла себе майже випрямлячем. При цьому виникали струми, які в 5 разів перевищували номінальний струм. Це явище має місце не для всіх ламп. Навіть в однієї і тієї ж лампи є суттєва відмінність як за моментом виникнення, так і за тривалістю існування такого режиму. В експериментальній установці використане відеознімання процесу розгоряння, а також отримані рентгенівські фотографії процесів, які відбуваються в пальнику. Мета досліджень полягала в тому, щоб встановити зв'язок між явищем несиметрії, тобто випрямленням, і передбачуваними причинами його виникнення: положенням електрода в пальнику, габаритами електрода, масою емітера на електродах і його положенням, типом ЗП. Виявлено, що несиметрію можна до деякої міри зменшити, використовуючи довгі електроди, знімаючи емітер із зовнішньої

сторони спіралі електрода, застосовуючи пальники більшого діаметру і баласту, які мають великий пусковий струм для прискореного розігріву електродів.

Проте повністю усунути несиметрію цими способами не вдалося. При детальному аналізі відеозаписів виявлено, що виникнення аномальних струмів залежить від того, на якому кінці пальника знаходиться амальгама натрію. В лампах, під час розгоряння яких аномальні струми мають місце для двох півперіодів, амальгама натрію присутня на обох кінцях пальника. На рис. 1.4 показана типова картина, яка знята з відеомонітора під час несиметричного режиму. Її аналіз показує, що в лампі має місце для одного півперіоду тліючий розряд, а для другого - дуговий розряд. Причина такого режиму наступна:

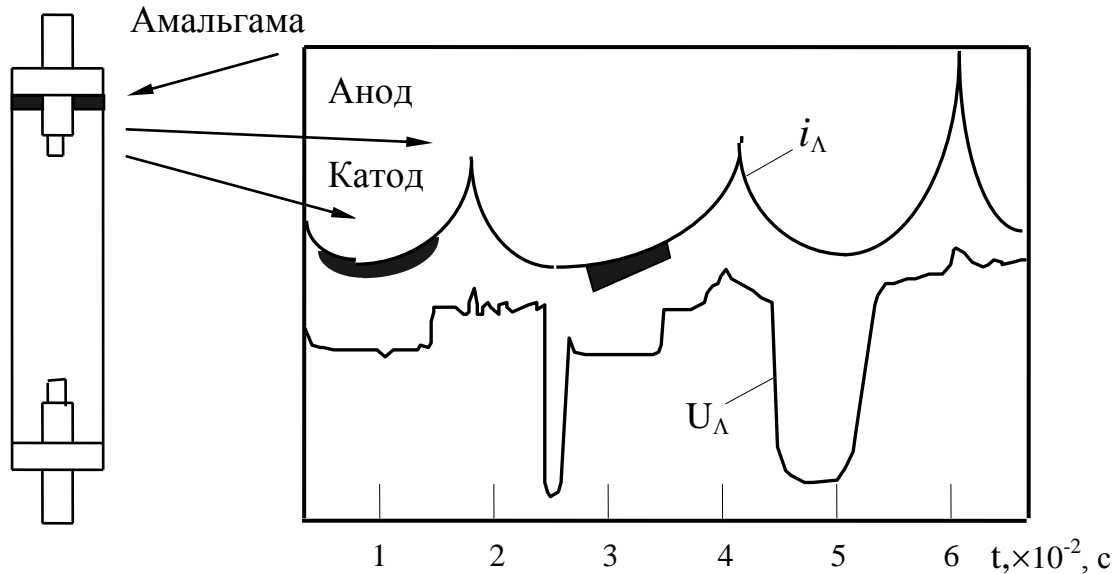


Рис. 1.4. Типова картина випрямлення в малопотужній лампі типу ДНаТ

внаслідок переміщення катодної плями по катоді відбувається замикання дуги на амальгаму, яка з'єднана з катодом. Внаслідок цього електрод заледве функціонує в якості катода, оскільки має температуру, недостатню для підтримки термоелектронної емісії. У таких умовах можливе горіння лише тліючого розряду. Існуюча несиметрія і викликає появу аномальних струмів. При їх виникненні електрод піддається посиленому бомбардуванню, яке і викликає прискорене розпилення емітера зі спіралі. Передбачалося декілька шляхів розв'язку даної задачі:

- видалити матеріали емітера із зовнішньої поверхні електрода;
- підібрати оптимальний струм для прискореного розігріву електродів;
- збільшити діаметр пальника, завдяки чому зменшується ймовірність контакту амальгами з електродом;
- зменшити масу амальгами.

Однак оптимальним визначений шлях ізоляції амальгами від електрода, для чого розроблена ступінчата заглушка спеціальної конструкції. При випробуваннях групи ламп з новою конструкцією заглушки встановлено, що випрямний режим у них повністю відсутній, а термін служби становить  $\approx 25000$  годин.

Шляхом удосконалення конструкції електродних вузлів натрієвих ламп малої потужності досягнуто симетрування емісійних характеристик катодних вузлів під час розгоряння. Однак найгострішою є проблема аномальних струмів кіл з МГЛ. Авторами багатьох праць відзначається як сам факт виникнення кидків струму в період розгоряння, так і їх несприятлива дія на термін служби комплекту ПРА - МГЛ [14, 32, 101]. Аномальні струми можуть викликати зменшення терміну служби лампи на 20%. Проте ні в одній праці не розглянуті процеси виникнення кидків струму, фактори впливу на них і, що особливо важливо, відсутні рекомендації з усунення цього явища.

У результаті проведеного аналізу специфіки роботи МГЛ в колах змінного струму можна зробити висновок: не дивлячись на значимість аномальних режимів роботи під час розгоряння ламп, до тепер немає наукового пояснення причин виникнення і способів їх усунення.

Вище викладене дозволило обґрунтувати і деталізувати основні теоретичні, експериментальні і прикладні аспекти задач роботи, які можна сформулювати так:

- провести визначення характеристик РЛВТ під час розвитку розряду від початку роботи до усталеного номінального режиму роботи;
- проаналізувати процес виникнення аномальних режимів, встановити і теоретично обґрунтувати причини їх виникнення;
- уточнити математичну модель кіл з РЛ і розробити метод їх розрахунку з метою аналізу аномальних режимів роботи;

- розробити придатні для практичної реалізації схеми ПРА для РЛВТ, які запобігають виникненню аномальних режимів роботи в процесі розгоряння ламп і забезпечують їх ефективну роботу.

### 1.3. Засоби дослідження характеристик високоінтенсивних джерел світла

У фотометричних лабораторіях країн з розвинутою світлотехнічною промисловістю широко використовуються гоніофотометричні вимірювання. Це зумовлено можливістю отримати за короткий інтервал часу великий обсяг інформації про світлотехнічні величини і характеристики джерел світла, світлових приладів, матеріалів. Отримана інформація використовується для розробки, удосконалення, сертифікації продукції світлотехнічних підприємств.

Основу вимірювальної системи складає гоніофотометр - розподілювальний фотометр, який є унікальним і складним за конструктивним виконанням засобом вимірювання із вмонтованими комп'ютером і точними електроприводами, в тому числі багатошвидкісними [15]. Габарити деяких закордонних систем перевищують 56 м і вартість кожної з них складає десятки - сотні тисяч гривень [93, 94]. Гоніофотометричні системи загалом містять:

- фотоелектричний вимірювальний перетворювач – фотоелектричну головку;
- конструкцію, яка забезпечує кріплення і поворот об'єкту вимірювань та фотометричної головки;
- проміжні електричні перетворювальні засоби;
- персональний комп'ютер, який забезпечує керування роботою гоніофотометра, корекцію похибок перетворення і обробку результатів вимірювань.

Сучасні закордонні гоніофотометричні системи характеризуються високими метрологічними характеристиками. Похибка вимірювання світлових

величин складає  $\pm 0,5 \dots 2,0\%$ , кутова роздільна здатність не перевищує  $\pm 0,1^\circ$ .

Для цього використовують вимірювальні перетворювачі спеціальної конструкції. Додаткове покращення метрологічних характеристик забезпечує комп'ютер завдяки врахуванню нелінійностей, контролю і коректуванню режиму роботи вузлів системи, математичній обробці результатів вимірювання.

На сьогодні країни з передовою світлотехнічною промисловістю і провідні світлотехнічні фірми мають щонайменше по одній сучасній гоніофотометричній системі високого класу точності. На жаль, наша країна в цей перелік не входить. Вимірювальні системи, які наявні у фотометричних лабораторіях підприємств галузі, загалом виготовленні із значним відхиленням від рекомендацій публікацій МКО, МЕК і стандартів.

За конструктивним виконанням гоніофотометри можна поділити на чотири групи:

Гоніофотометр, в якому ДС чи СП обертаються навколо двох осей. При цьому фотометрична головка знаходиться в нерухомому стані. Гоніофотометр даного типу рекомендується використовувати лише тоді, коли світлотехнічні характеристики не залежать від зміни положення ДС або якщо можна внести поправки. Вимірювання параметрів крупногабаритних СП є ускладнені. Найвідоміші фотометри цієї групи розміщені в світлотехнічній лабораторії Копенгагена і у фірмі LMT (Берлін).

Гоніофотометр, в якому здійснюється обертання ДС або СП навколо вертикальної осі і переміщення фотометричної головки навколо ДС чи СП. При цьому горизонтальна вісь проходить через ДС. Для усунення обертання фотометричної головки навколо ДС або СП можна використати декілька фотометричних головок, розміщених у вертикальній площині. До переваг гоніофотометрів даного типу відноситься фотометрування ДС і СП в робочому положенні, внаслідок чого забезпечується найменша похибка вимірювання світлотехнічних параметрів. До недоліків таких гоніофотометрів слід віднести



значні габарити, громіздкість конструкції, що стримує їх широке поширення.

Гоніофотометрами даної групи обладнані фірми Шредер (Бельгія) і RTV (Німеччина), національні лабораторії Франції і Аргентини.

Дзеркальний гоніофотометр, який забезпечує обертання ДС чи СП навколо вертикальної осі, а дзеркала - навколо горизонтальної. При цьому фотометрична головка нерухома. Важливою перевагою гоніофотометрів даного типу є компактність, незважаючи на фотометрування ДС і СП в робочому положенні. Крім цього, для їх розміщення не вимагаються приміщення великих габаритів. В даному випадку необхідна лише наявність фотометричного коридору. До недоліків цих гоніофотометрів належить передусім необхідність використання унікальних дзеркал діаметром 1,5 ... 2,5 м. Останні повинні забезпечувати рівномірний спектральний коефіцієнт відбиття, постійний ступінь дифузного відбиття, незначну поляризацію, стабільність характеристик в часі. Точність вимірювань в значній мірі залежить від якості дзеркала. Дзеркальні фотометри також є досить дорогими, але в той же час найсучаснішими. Їх придбали лише найбільші світлотехнічні фірми, такі, приміром, як Philips, PRC Krochmann (Німеччина), Vega, Regiolus (США).

4. Розгортковий гоніофотометр або інакше короткобазовий фотометр. Зацікавленість до них викликана можливістю отримати інформацію про фотометричні величини і характеристики СП у приміщеннях з обмеженими габаритами. Принцип їх роботи базується на телецентричному способі вимірювання сили світла. Оптична розгортка в таких фотометрах реалізується або у вигляді пустотілих трубочок, дотичних одна до одної, або у вигляді набору пластин-екранів із співвісно розміщеними отворами. Короткобазові фотометри доцільно використовувати для фотометрування СП з висококонцентрованими пучками (прожектори, лампи-фари тощо). Однак при цьому слід врахувати, що похибка вимірювання складає  $\pm 15 \dots 20\%$ . Короткобазовий фотометр побудований фірмою "Vulcan GmbH" (Німеччина).

Він знаходиться в національній лабораторії Данії, а також в СКТБ світлових і світлосигнальних приладів (Росія), де використовується для фотометрування аеродромних вогнів.

## Висновки до розділу 1

1. Отримано, що труднощі запалювання та перезапалювання РЛ обумовлені:

- низькими емісійними характеристиками застосовуваних електродів;
- отруєнням електродів галогенідами під час остигання лампи;
- наявністю в наповнювальному газі елементів, які сприяють утворенню електровід'ємних іонів.

2. Встановлено, що під час роботи РЛ мають місце аномальні режими, параметри яких суттєво відрізняються від номінальних значень.

3. Проведений огляд аномальних режимів роботи в колах з РЛ показав, що:

- в колах з ЛЛ вплив аномальних режимів враховується під час розробки і конструювання ПРА;
- шляхом удосконалення конструкції ВДС і технології їх виготовлення несиметричні аномальні режими практично усунені в лампах типу ДНаТ і ДРЛ;
- найкритичніше аномальні режими проявляються в МГЛ, що посилюється крайніми протиріччями і недостатністю відомостей про це явище.

4. Сформульовані задачі роботи.

## РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА ПІД ЧАС РОЗВИТКУ РОЗРЯДУ

Будь-який самостійний електричний розряд представляє собою складне поєднання взаємнообумовлених процесів, які утворюють деякий замкнений цикл. В залежності від форми розряду його цикл набуває тих чи інших рис. Для повного охарактеризування розряду необхідно описати весь цикл. Це значить, що повинні бути описані як кількісно, так і якісно:

- механізм емісії електронів з катода;
- процеси, завдяки яким здійснюється емітування електронів;
- механізм іонізації парів в катодній області розряду;
- такі важливі характеристики катодної області як її структура, протяжність, розподіл електричного поля і температури;
- енергетичний баланс.

Однак, один лише опис всіх цих процесів представляє тему для окремого дисертаційного дослідження. Тому завданням даного розділу є дослідження процесів, що мають місце після пробією і до усталеного режиму в РЛ.

У залежності від виду розряду в РЛ та її динамічної ВАХ в процесі розвитку розряду можна виділити такі основні режими роботи:

- 1) режим запалювання (передпробійний стан і пробій);
- 2) перехідний режим;
- 3) режим розгоряння;
- 4) усталений режим.

## 2.1. Передпробійний стан і пробій

Протягом першого інтервалу працює ЗП. Він генерує високовольтні імпульси, під дією яких відбувається пробій розрядного проміжку і

створюються сприятливі умови для подальшого розвитку розряду. Тривалість інтервалу становить 0,20 ... 60 с. На рис. 2.1, 2.2 показані відповідно динамічна ВАХ і осцилограми струму та напруги РЛ на цьому інтервалі.

На сьогодні найбільшого поширення набули дві теорії пробою газових проміжків: Таусенда-Роговського та стримерів [19, 75, 84].

Суть першої теорії полягає в наступному. Для виникнення розряду необхідна поява вільних електронів. Цей процес може відбуватися лише з допомогою зовнішнього іонізатора, наприклад короткого електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового, рентгенівського). Під дією прикладеного електричного поля електрони почнуть переміщатися до анода, що викличе появу струму в колі. Він залежатиме від кількості вільних електронів, які виникають під дією зовнішнього іонізатора, та від прикладеної напруги. Однак, збільшення напруги вище певного критичного значення призведе до різкого росту струму. Це явище має місце внаслідок прискорення електронів в електричному полі до енергії, достатньої для іонізації атомів газу. Вторинні електрони рухатимуться до анода, викликаючи при співударях іонізацію. По мірі переміщення електронів до анода відбуватиметься лавиноподібне утворення заряджених частинок, що і є причиною різкого зростання струму. Після закінчення дії зовнішнього іонізатора можуть мати місце три випадки:

- об'ємна (коефіцієнт  $\beta$ ) і поверхнева (коефіцієнт  $\gamma$ ) іонізації позитивними іонами недостатні для підтримання розряду. При цьому кількість електронів, які беруть участь в утворенні кожної наступної лавини, є менша, ніж попередня. Розрядний струм зменшується і розряд швидко припиняється. Стаціонарний розряд, який має місце до припинення дії зовнішнього іонізатора, є несамотійним розрядом;

- кількість електронів, утворених у наступній лавині, дорівнює кількості електронів, які беруть участь в попередній лавині. Розряд продовжується як стаціонарний самотійний;

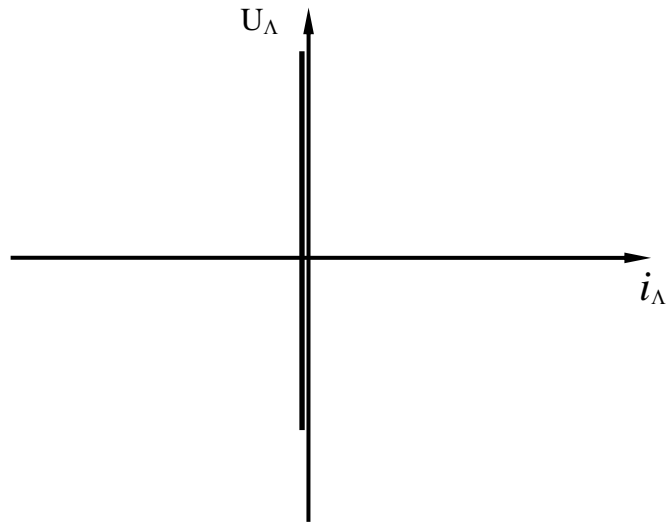


Рис. 2.1. Динамічна вольт-амперна характеристика МГЛ в передпробійному стані.

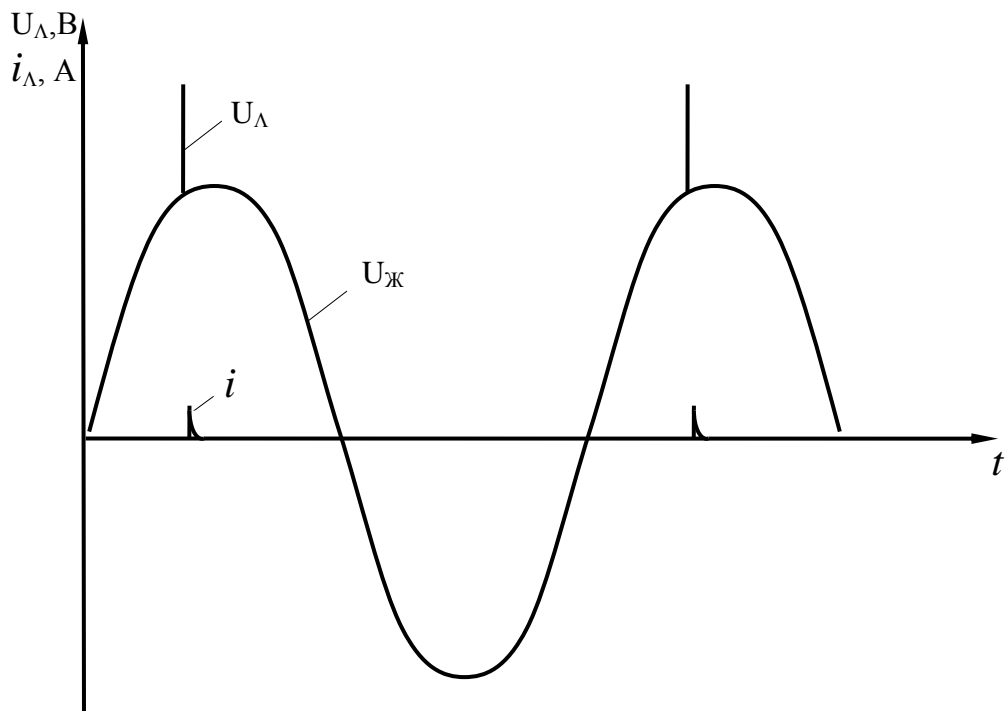


Рис. 2.2. Осцилограми струму та напруги МГЛ в передпробійному стані.

- кількість електронів, які утворюються в кожній наступній лавині шляхом об'ємної та поверхневої іонізацій, є більша, ніж в попередній лавині. Розряд розвивається надалі та переходить в ту чи іншу форму, поки його режим не стане рівноважним внаслідок зміненого розподілу поля всередині розряду і перерозподілу спаду потенціалу у всьому колі.

Густина струму несамоствійного розряду, яка встановилася у результаті проходження множини електронних лавин, дорівнюватиме

$$j = \gamma \frac{\exp(\alpha d)}{1 - H(\exp(\alpha d) - 1)}, \quad (2.1)$$

де  $d$  - відстань між електродами,  $H$  - сумарна ймовірність появи всіх вторинних процесів у перерахунку на кожну іонізацію.

За умову переходу несамоствійного розряду в самоствійний приймається необмежене зростання струму (знаменник прямує до нуля), викликане розкачуванням електронних лавин. Подальший розвиток розряду і встановлення тієї чи іншої форми самоствійного розряду залежить від умов зовнішнього кола. Недоліком наведеного виразу є те, що він визначає лише межу стійкості, але не дає ніяких відомостей про розвиток процесу переходу несамоствійного розряду в самоствійний.

Роговський врахував роль об'ємних зарядів при проходженні електронних лавин. Це дозволило описати процес переходу несамоствійного розряду в самоствійний. Однак, для значень тиску  $\approx 27000$  Па спостерігається розбіжність експериментальних даних з теорією Таусенда-Роговського. Це привело до створення теорії стримерів, яка розглядає пробій як результат проходження однієї електронної лавини.

За певних умов між електродами появляються невеликі області з високим ступенем іонізації газу. Ці утворення, інакше стримери, швидко поширюються в напрямку електродів, залишаючи за собою вузький канал з високоіонізованою

плазмою. Після замикання стримером міжелектродного проміжку і утворення приелектродних областей розряду по цьому каналу відбувається подальший розвиток розряду. Перенесення фронту високої іонізації можна викликати фотоіонізацією газу попереду основної лавини, термічною іонізацією, іонізацією електронами або збудженими атомами. Для існування стримерів необхідно витримати дві умови:

- електричне поле в голові лавини повинно бути достатнім для вливання в основну лавину фотоелектронів та утворених ними лавин;
- кількість фотоелектронів, які утворюються в голові лавини, повинна бути достатньою для поширення стримеру.

Умовами, які сприяють утворенню стримера, є: імпульсний характер прикладеної напруги і перевищення нею напруги, необхідної для статичного пробую. І навпаки, для малих перевищень статичної пробивної напруги - низьких неоднорідностей електричного поля і зовнішній іонізації пробій на першій стадії починається, мабуть, з таусендівського розкачування лавин. І лише в подальшому він може приймати стримерний характер.

Внаслідок значної складності і швидкоплинності процесів, які відбуваються при пробі розрядних проміжків МГЛ, питання про те, який з механізмів присутній в даному випадку, остаточно не вирішене. На нашу думку, при пробі холодних МГЛ має місце таусендівське розкачування лавин. Реалізація ж стримерного пробую найімовірніша для випадку миттєвого перезапалювання гарячих ламп.

Пов'язані з явищем пробую труднощі можна розглядати як статистичну ймовірнісну задачу для системи, яка складається з розрядної лампи і апаратури для подачі на лампу електричної напруги. В результаті проведених досліджень встановлено, що має місце значний розкид напруги запалювання не лише від зразка до зразка, але й для однієї і тієї ж лампи при ідентичних вихідних умовах. Передбачається, що є дві причини вказаного розкиду. По-перше, існує розбіжність в часі емісії з катода первинних електронів, що іонізують газ. По-



друге, має місце статичний розкид. Він обумовлений тим, що процес збудження розряду під дією емітованих катодом первинних електронів носить ймовірнісний характер [35].

Нехай  $Q$  - середня кількість первинних електронів, які емітовані катодом за 1 с. Тоді, використовуючи закон Пуассона, отримаємо формулу для ймовірності того, що в проміжку часу  $t$  не буде емітований ні один електрон

$$W_1 = \exp(-Qt). \quad (2.2)$$

Позначивши ймовірність виникнення розряду під дією первинного електрона через  $P$  та прийнявши її незмінною в часі, отримаємо ймовірність того, що за час  $t$  не буде збуджений розряд

$$W = \exp(-PQt). \quad (2.3)$$

Тоді ймовірність виникнення пробою за проміжок  $t$  дорівнюватиме

$$T = 1 - W = 1 - \exp(-PQt). \quad (2.4)$$

Ймовірність появи пробою за одиницю часу позначимо  $L$ . Вона визначиться з формули:

$$L = \frac{dT}{dt} = PQ \exp(-PQt) = PQW. \quad (2.5)$$

Тут прийнято, що ймовірність  $P$  незмінна в часі. Якщо ж вона змінюватиметься в часі, тоді ймовірність виникнення пробою слід обчислювати, розв'язуючи рівняння

$$\frac{dW}{dt} = PQW . \quad (2.6)$$

Звідси

$$W = \exp\left(-\int_0^t PQdt\right). \quad (2.7)$$

Тоді попередній вираз (2.4) набуває вигляду

$$T = 1 - \exp\left(-\int_0^t PQdt\right). \quad (2.8)$$

Ймовірність збудження розряду під дією одного електрона визначається із співвідношення:

$$P = \begin{cases} 0 & \text{для } q < 1 \\ 1 - \frac{1}{q} & \text{для } q > 1 . \end{cases} \quad (2.9)$$

Тут

$$\begin{aligned} q &= \gamma(n_{cp} - 1), \\ n_{cp} &= \exp \int_0^d \alpha dx , \\ \alpha &= a_z p \exp(b_z p E^{-1}), \end{aligned} \quad (2.10)$$

де  $n_{cp}$  - середня кількість електронів, які досягли анода в результаті виникнення лавин Таусенда;  $a_z$ ,  $b_z$  - постійні коефіцієнти;  $p$  - тиск;  $E$  -

напруженість електричного поля, яка виражається через прикладену до електродів напругу наступним чином

$$E = \frac{U}{d} . \quad (2.11)$$

З умови збудження розряду  $q = 1$ , отримаємо вираз:

$$\gamma \left( \exp(a_z p d \exp(-b_z p d U^{-1})) - 1 \right) = 1. \quad (2.12)$$

Позначивши через  $U_3$  мінімальну напругу запалювання, маємо:

$$P = 1 - \frac{1}{\gamma \left( (1 + \gamma^{-1}) \exp(b_z p d U_3^{-1} (1 - U U_3^{-1})) - 1 \right)}. \quad (2.13)$$

Якщо взяти до уваги, що

$$U = kt , \quad (2.14)$$

то

$$L(t) dt = L\left(\frac{U}{k}\right) d\left(\frac{U}{k}\right) = D(U) dU . \quad (2.15)$$

Звідси

$$D(U) = \frac{1}{k} L\left(\frac{U}{k}\right) = \frac{PQ}{k} \exp\left(\int_0^{U_3} \frac{PQ}{k} du\right), \quad (2.16)$$

де  $D(u)$ - визначає статичний розкид напруги запалювання для

$$\frac{U}{U_3} \gg 1. \quad (2.17)$$

Величина  $P$  змінюється нехтовно мало, тому її можна винести з під інтегралу

$$D = \frac{PQ}{k} \exp\left(\frac{PQ}{k}(U - U_3)\right). \quad (2.18)$$

Таким чином, основними причинами розкиду напруг при пробої лампи слід вважати розкид в часі емісії первинних електронів і ймовірнісний характер запалювання після емісії.

Вважаючи РЛ безінерційним комутувальним елементом, запалювання, а надалі і перезапалювання, розряду слід розглядати як ввімкнення контура до джерела змінної напруги. В схемах живлення РЛВТ контур найчастіше складається з індуктивності дроселя і активного опору його обмотки. Значно рідше до них додається ще ємність. Тому після комутації в колі матимуть місце перехідні процеси з притаманними їм аномальними струмами. Процеси, які відбуваються в такому колі, аналогічні до тих, які мають місце при комутації традиційними комутувальними елементами і достатньо досліджені, наприклад в [9, 64, 68, 69].

Амплітуда повного струму кола в перехідному процесі насамперед залежатиме від фазового кута  $\varphi$ , який відповідає моменту комутації. Струм матиме максимальне значення, якщо кут  $\varphi = \{0^\circ; 90^\circ\}$ . Для створення сприятливих умов подальшого розвитку розряду імпульси підпалу, а отже і моменти виникнення розряду, подаються в діапазоні  $60 \dots 85^\circ$ . Виникнуті при цьому струми перехідних процесів в 1,2 ... 1,6 раза перевищують номінальний струм. Цей процес має місце у всіх типових РЛ, спостерігається однократно в момент запалювання розряду, характеризується тривалістю 2 ... 3 періоди

напруги живлення і є безпечним для комплексу ПРА - лампа. У результаті експериментальних досліджень нами встановлено [30], що при виникненні самостійного розряду після пробою МГЛ з використанням стандартних ЗП відразу утворюється дуговий розряд (рис. 2.3).

Для збудження і підтримання дугового розряду між двома металевими електродами необхідно забезпечити певні умови. Передусім повинна підтримуватися певна різниця потенціалів. Однак це лише необхідна, але недостатня умова. Дуговий розряд може мати місце лише в тому випадку, коли розрядний струм перевищує деяке порогове значення, яке залежить від матеріалу електродів. Якщо джерело живлення і розрядне коло забезпечують проходження дуги, достатньо створити лише відповідну початкову ситуацію, сенс якої полягає в наявності у розрядному проміжку провідного середовища [84, 85].

Відомо [65, 66], що усталення дугового розряду можливе наступними шляхами:

- збудження дуги розривом кола;
- наближенням металевих електродів;
- пробоем проміжку для заданої відстані;
- переходом тліючого розряду в дугу;
- виникненням катодної плями при досягненні катода високоіонізованим газом.

У даних випадках поява дуги відразу після пробою не описується термоелектронною теорією, оскільки в початковому стані електроди ще холодні. Ймовірно, що під дією високої напруги і внаслідок неоднорідності поверхні електродів утворюються мікрокатодні плями та виникає автоелектронна емісія, які здатні протягом певного часу (декількох періодів) підтримувати дуговий розряд. Це підтверджується деякими авторами, які провели дослідження з метою отримати дугу обидвох типів з гарячим і холодним катодами для одного

і того ж матеріалу катодів. Результати цих досліджень показали, що для вольфраму (матеріалу електродів) отримуються два типи дуги [100].

Існування дуги з холодним катодом пояснюється автоелектронною емісією. На це вперше вказав Ленгмюр, а потім підтвердили розрахунками Комптон і Ван Вурріс. Слід також врахувати вплив аномальних струмів на формування розряду перехідного процесу під час запалювання лампи. Проте утворений дуговий розряд нестійкий і протягом декількох періодів переходить в тліючий розряд. Це пояснюється припиненням автоелектронної емісії, через відсутність високої напруги, і відносно малою площею мікрокатодних (квазікатодних) плям. В результаті цього відбувається їх швидке охолодження до температури основної маси електронів. Інших же умов, які здатні на даному етапі підтримувати дуговий розряд, ще немає.

## 2.2. Режим розгоряння. Симетричний тліючий розряд

Як відомо [3, 34, 73], в усталеному режимі в МГЛ має місце дуговий розряд, обумовлений термоелектронною емісією. Нагрів електродів відбувається під час горіння тліючого розряду, формування якого забезпечується завдяки вторинній емісії. При цьому коефіцієнт  $\gamma$  - максимальний, а струм викликаний в основному позитивними іонами. В газі поблизу катода виникає поле високої напруженості і значний катодний спад напруги. Позитивні іони, що досягають холодного катода, бомбардують його з енергією впритул до максимальної, яка дорівнює добутку заряду іона на катодний спад напруги. Більша частина цієї енергії витрачається на нагрів катодів, внаслідок чого їх температура зростає. При збільшенні енергії, яка отримується катодом з розряду, підвищується коефіцієнт термоелектронної емісії впритул до моменту виникнення дугового розряду. Отже, для формування дугового розряду необхідно витратити певну кількість енергії, яка здатна нагріти електроди до температури термоелектронної емісії.

Лампа загалом має зростаючу ВАХ для тліючого розряду (рис. 2.4). Ця обставина сприяє переходу від холодного катодного розряду до гарячого. Для

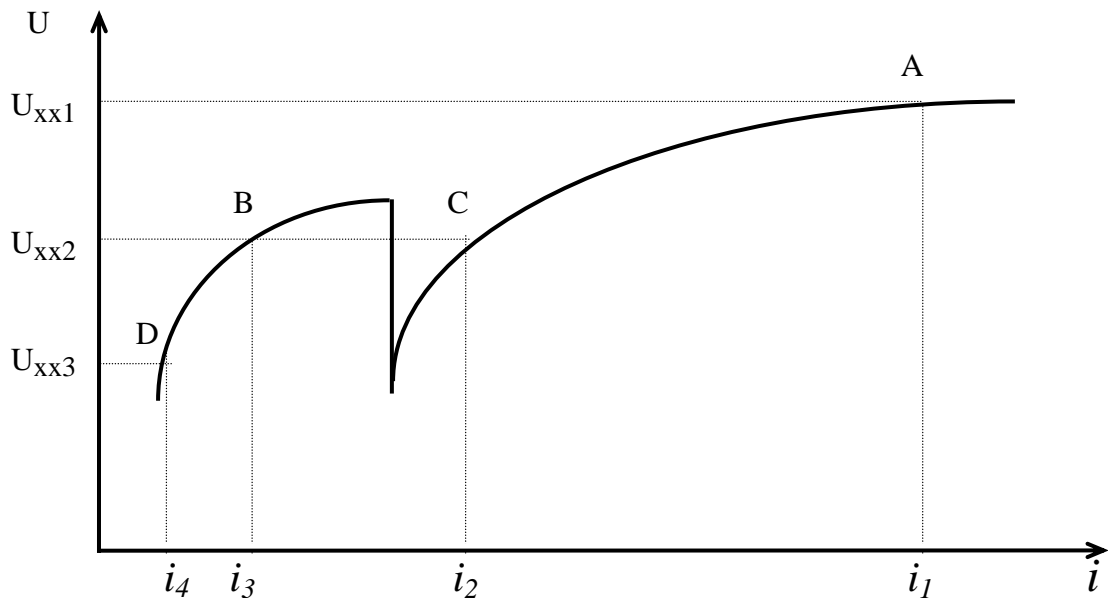


Рис. 2.4. Вольт - амперна характеристика розрядної лампи при тліючому розряді.

досить високої напруги холостого ходу  $U_{xx}$  відсутній період стійкого тліючого розряду, який передує нагріву електродів до температури термоемісії. Кінцева робоча точка А відповідає початковому робочому струму розряду. Якщо  $U_{xx}$  менша, то після усталення самостійного розряду струм зростає лише до т. В і тимчасово залишається стабільним. Більший катодний спад напруги і потенціал на додатньому стовпі саме достатні для підтримання незмінним струму  $i_2$ . Тим не менше, струм  $i_2$  і отримувана катодом енергія достатні для повільного нагріву електродів до температури термоелектронної емісії. Для  $U_{xx} \leq U_{xx2}$  робоча точка стабільно тліючого розряду настільки низька, що катод ніколи не нагрівається до достатньої температури. Розряд залишається в стадії тліючого, оскільки енергія, що виділяється на катоді, є співмірною з енергією втрат. Є сенс визначити кількість енергії, яка необхідна для переходу тліючого розряду

в дуговий. На першому етапі приймемо, що перехід здійснюється одночасно з двох електродів. Вважатимемо, що температура  $T$  активної ділянки електрода - катодної плями - розподілена рівномірно, а температура інших ділянок і температура стінок  $T_0$  підтримується постійною. Передбачається, що перехід від тліючого до дугового розряду відбувається тоді, коли густина термоелектронного струму на активній ділянці електрода перевищить де-яке порогове значення. Позначимо критичну температуру електрода в момент переходу  $T_k$ , масу активної ділянки електрода  $m$ , його питому теплоємність  $c$ , а площу граничного шару між активною та неактивною ділянками електрода  $S$ . Якщо прийняти, що є граничний шар, то на активній ділянці забезпечується умова неперервності теплового потоку. Рівняння енергетичного балансу тоді можна записати

$$P_{\Lambda} = U_{\Lambda} i_{\Lambda} = mc \frac{dT}{dt} + zS(T - T_0) + \sigma S(T^4 - T_0^4), \quad (2.19)$$

де  $\sigma$  - стала Больцмана.

Нехай протягом часу існування тліючого розряду  $\tau_T$  катод нагрівається до температури  $T_k$  і відбувається перехід від тліючого розряду до дугового. Тоді середня потужність тліючого розряду за цей проміжок часу дорівнюватиме

$$\bar{P}_{\Lambda} = \frac{1}{\tau_T} \int_0^{\tau_T} P_{\Lambda} dt. \quad (2.20)$$

Після перетворень отримаємо:

$$T_k - T_0 = \frac{\bar{P}_{\Lambda}}{mc} \tau_T. \quad (2.21)$$

Отже,



$$\frac{1}{\tau_T} = \frac{\overline{P_\Lambda}}{mc(T_K - T_0)}. \quad (2.22)$$

Тому енергія переходу дорівнюватиме:

$$E_{\Pi} = \int_0^{\tau_T} \overline{P_\Lambda} dt = \frac{1}{mc(T_K - T_0)}. \quad (2.23)$$

Отриманий вираз визначає мінімальну енергію, необхідну для здійснення переходу тліючого розряду в дуговий. При цьому прийнято, що перехід відбувається одночасно з обох електродів, на яких відсутні забруднення.

При детальнішому розгляді енергії переходу в РЛВТ слід врахувати витрати енергії на видалення адсорбованих речовин, яке включає очищення при іонному і електронному бомбардуваннях під час тліючого розряду, термоочищення, пов'язане з підвищенням температури електродів, тощо. На ці процеси впливає тип адсорбованих речовин і механізм їх адсорбції. Слід відзначити, що на сьогодні згадані процеси мало вивчені. Загалом енергія очищення залежить не лише від типу і кількості адсорбованих речовин, але й від механізму фізичної адсорбції.

Енергію, яка необхідна для видалення адсорбованих речовин, можна визначити як різницю енергій переходу для однакових ламп з очищеними і забрудненими електродами. Точність її визначення залежить від ступеня очищення. На практиці виникають досить значні похибки внаслідок того, що відбувається вторинна адсорбція видалених речовин. Згідно з [14] енергія необхідна для видалення адсорбованих речовин, становить приблизно 30% від витраченої повної енергії переходу. Цим значенням не можна нехтувати. Адсорбовані на електродах речовини не лише збільшують напругу запалювання і значно підвищують енергію переходу від тліючого до дугового розряду, вони

також є причиною виникнення аномальних режимів роботи під час розгоряння МГЛ, що розглянуто нижче.

### 2.3. Режим розгоряння. Несиметричний розряд

Як було відзначено вище, під час розгоряння МГЛ існує випрямний режим. В дійсності має місце прояв несиметричного розряду. Нами проведені експериментальні дослідження процесу розгоряння МГЛ потужністю від 125 до 1000 Вт [30]. Стабілізація струму здійснювалась баластним дроселем. Під час вимірювань записувались осцилограми струмів та напруг на елементах контура за допомогою електромеханічного і запам'ятовувального осцилографів. На рис. 2.5 показана форма струму лампи ДРИ - 400 - 5 під час розгоряння. В результаті вимірювань встановлено, що аномальні струми МГЛ:

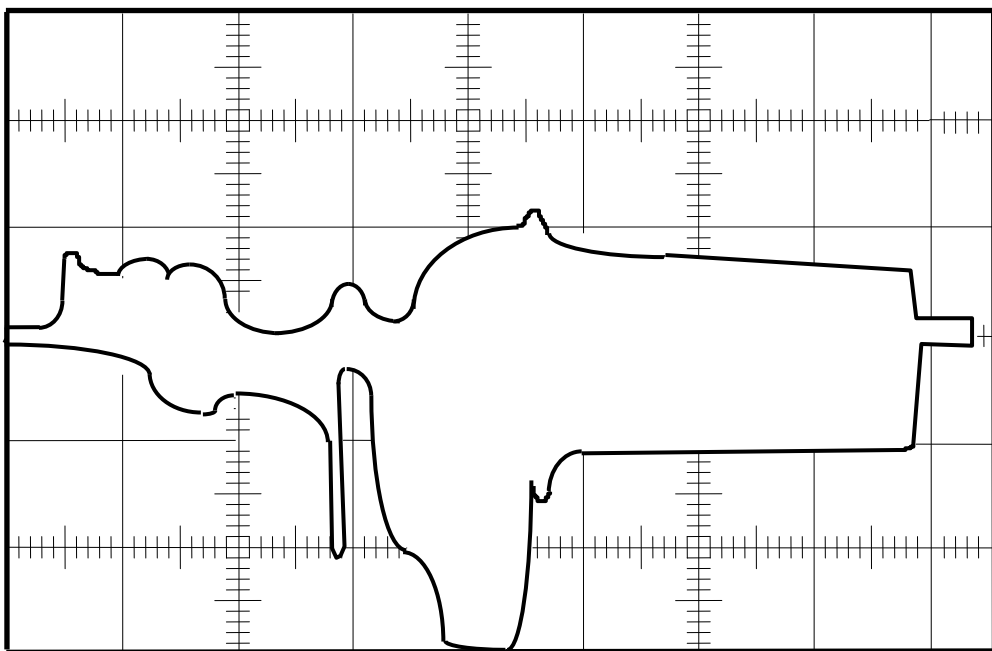
- виникають через 0,5...1,0 с після запалювання;
- мають місце лише для випадку горіння несиметричного розряду, коли за один період напруги живлення існують тліючий і дуговий розряди;
- проявляються незалежно від полярності подачі імпульсу підпалу;
- тривають 1,5...2,0 с;
- перевищують номінальний струм в 7...10 разів;
- залежать від ступеня нелінійності баластного дроселя і від ступеня несиметрії розряду.

Внаслідок специфіки МГЛ електроди на початку розряду не можна вважати симетричними, як це має місце в лампах типу ДНаТ та ДРЛ. Несиметрія виникає під час остигання лампи. Це викликане адсорбцією галоїдних сполук - отруєнням електродів. Тому для нагріву різних електродів до температури термоелектронної емісії необхідно витратити різну кількість енергії. Внаслідок цього один електрод здатний підтримувати дуговий розряд, а інший - ще ні. Несиметрія емісійних характеристик електродів зумовлює формування несиметричного розряду (рис. 2.6). Настає стадія так званих

тригерних переходів, протягом якої спостерігається хаотичний перехід від тліючого розряду до дугового і навпаки. Притаманний двом півперіодам перехід триває декілька десятків періодів напруги живлення. Під час цієї стадії мають місце короткочасні



a)



б)

Рис. 2.5. Обвідні струму під час розгоряння лампи типу ДРИ-400 в додатній (а) і від'ємний (б) півперіоди напруги живлення:

$$M_t = 500 \text{ мс/под.}; M_{i_A} = 10 \text{ А/под.}$$

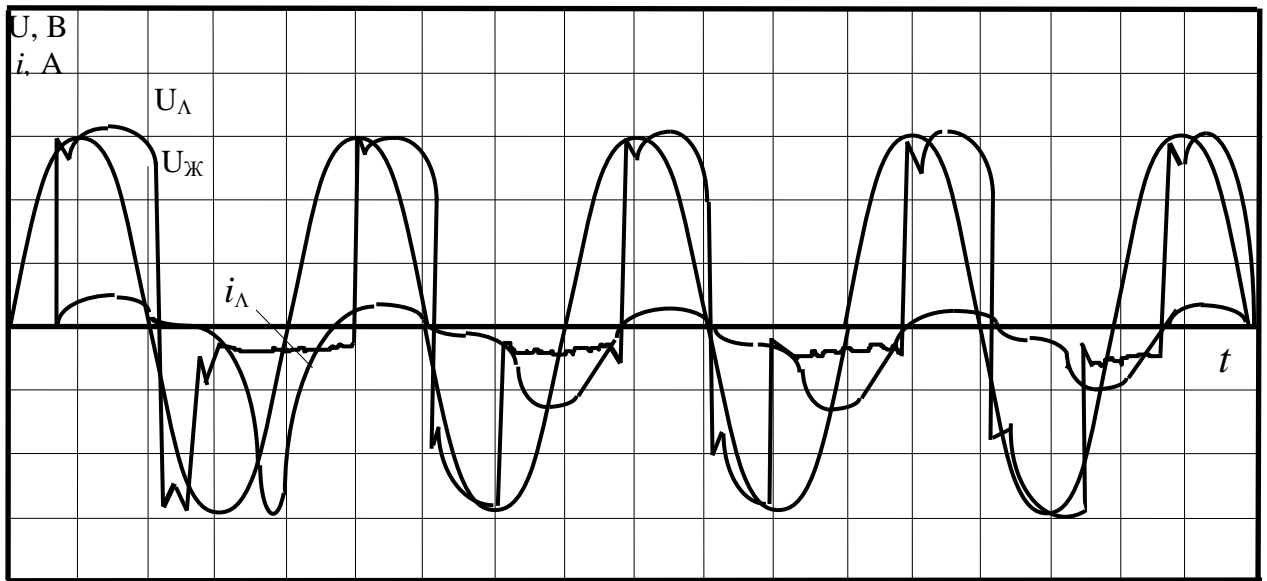


Рис. 2.6. Осцилограми струму і напруги МГЛ на етапі тригерних переходів в режимі розгоряння:

$$M_t = 5 \text{ мс/под.}; M_{i_\Lambda} = 5 \text{ А/под.}; M_{U_\Lambda} = 50 \text{ В/под.}; M_{U_\text{Ж}} = 100 \text{ В/под.}$$

кидки струму, який в 2 ... 3 рази перевищує номінальний струм. Вважається, що механізм цього явища пов'язаний з перехідними процесами під час емісії електронів та іонізації. Тоді випаровуються адсорбовані речовини і утворюються від'ємні іони [14].

Процеси, які відбуваються на цій стадії, визначаються температурними характеристиками електродів. Причини ж, які вказані в [14], мають другорядне значення. Гарячіший електрод за півперіод, коли він виконує функцію катода, остигає нижче за температуру термоелектронної емісії. В подальші 1 ... 2 періоди з цього електрода можливий знову лише тліючий розряд. Такі переходи триватимуть до тих пір, поки один з електродів не нагріється до температури, достатньої для підтримання дугового розряду з інтервалом один півперіод. Досягнувши такої температури, розряд в лампі переходить в стадію стійкого несиметричного розряду (рис. 2.7). Він характеризується тим, що :

- один електрод продовжує працювати в режимі автоелектронної емісії і тому має місце тліючий розряд;

- інший електрод встигає нагрітися до температури, достатньої для початку термоелектронної емісії, чим забезпечується виникнення на ньому дугового розряду.

При цьому амплітуда струму лампи в півперіод дугового розряду перевищує амплітуду номінального струму в 7 ... 10 разів. Під час цієї стадії відбувається найнесприятливіший вплив на комплект ПРА - МГЛ внаслідок перевантаження електродів за струмом, що викликає їх посилене розпилення. Крім цього, несиметрична стадія розряду пов'язана з постійною складовою струму лампи, що зумовлює перегрів окремих елементів ПРА і може бути причиною виходу їх з ладу.

Під час несиметричного розряду мають місце два різних кути перезапалювання, які можна знайти з виразу

$$\sin \varphi = \frac{U'_3}{\sqrt{2}U_{жс}}, \quad (2.24)$$

де  $U'_3$  - миттєва напруга перезапалювання розряду,  $U_{жс}$  - середньоквадратична напруга живлення.

Перезапалювання дугового розряду відбувається для  $\varphi = 10...15^\circ$ , а тліючого - для  $\varphi = 60 ... 70^\circ$ . Тривалість півперіодів горіння дугового і тліючого розрядів  $\tau_r$  для несиметричного режиму суттєво відрізняється. Вона визначається моментом перезапалювання і відносною напругою горіння. Проведені дослідження показали, що тривалість горіння  $\tau_r$  залежить від кута перезапалювання  $\varphi$ . Її можна визначити з формули [49]:

$$m = \left( \frac{2 \sin^2 \tau_{\Gamma}}{\left( \frac{U_3}{U_{\Lambda}} + \frac{\tau_{\Gamma}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\tau_{\Gamma}}{2} \right)^2 + \frac{\tau_{\Gamma}^2}{4}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.25)$$

Залежність  $\tau_{\Gamma}$  від  $\varphi$  показана на рис. 2.8.

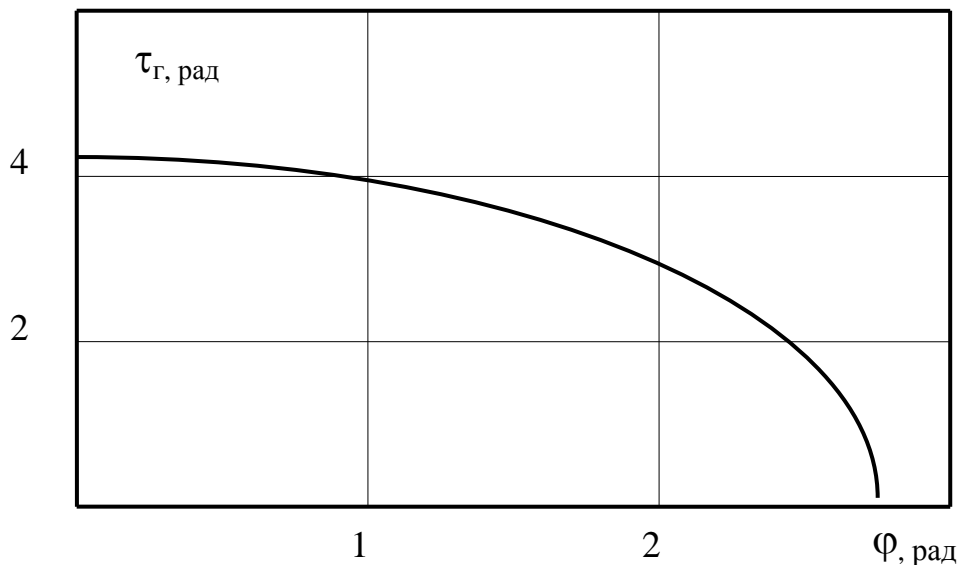


Рис. 2.8. Залежність тривалості горіння  $\tau_{\Gamma}$  від кута перезапалювання  $\varphi$ .

Чим менші кут перезапалювання і відповідно напруга горіння розряду, тим більша його тривалість. У реальних схемах тривалість дугового розряду досягає 0,75 Т, а тліючого - 0,25 Т. Зменшення тривалості тліючого розряду на холодному катоді призводить до суттєвого сповільнення його нагріву до температури термоелектронної емісії.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що амплітуда аномальних струмів залежить від :

- кута перезапалювання  $\varphi$ ;
- нелінійності ВАХ дроселя, яка характеризується коефіцієнтом нелінійності

$K_{\sigma}$ ;

- ступеня несиметрії розряду  $\varepsilon$ .

Нелінійність ВАХ баластного дроселя оцінена коефіцієнтом [49]:

$$K_{\sigma} = \frac{K_c}{1 + \mu_{\Gamma} \sigma_{\Gamma P}}, \quad (2.26)$$

де  $K_c$  - коефіцієнт нелінійності електротехнічної сталі,  $\mu_{\Gamma}$  - початкова магнітна проникність електротехнічної сталі,  $\sigma_{\Gamma P}$  - зведений повітряний проміжок.

Для оцінки ступеня несиметрії динамічної ВАХ лампи використаний коефіцієнт

$$\varepsilon = \frac{|U_m^+ - U_m^-|}{U_m^+ + U_m^-}, \quad (2.27)$$

де  $U_m^+$ ,  $U_m^-$  - амплітудні значення напруги на лампі для додатнього і від'ємного півперіодів.

Можна вважати, що виникнута асиметрія ніби самопідтримується завдяки перегріву гарячішого електрода, перешкоджаючи нагріву холодного електрода в другий півперіод. Тому, якщо в лампі горітимуть тліючий і дуговий розряди, їх перехід супроводжуватиметься виникненням аномальних струмів. Існування несиметричного розряду продовжуватиметься доти, поки холодний електрод не нагріється до температури термоелектронної емісії. Слід розглянути детальніше власне процес формування аномальних струмів з метою визначення можливих способів їх усунення.

#### 2.4. Формування аномальних струмів в колах з розрядними лампами

Дотепер відсутня єдина науково обгрунтована теорія виникнення аномальних струмів. Одні вважають, що характерне для несиметричного

режиму збільшення струму відбувається внаслідок дефектності одного електрода. Тому лампа запалюватиметься лише в один з півперіодів напруги живлення, тобто стає випрямлячем. У результаті цього дросель з малим активним опором не може обмежувати постійний струм. Тоді струм кола значно зростатиме. Інші автори допускають надзвичайну умовність, приписуючи ДС властивість генератора постійної е.р.с.. Висувається, як причина, також однопівперіодне запалювання. Однак проведені нами дослідження дозволили встановити помилковість всіх вказаних причин.

Вперше правильний розв'язок цієї задачі, щоправда лише стосовно кіл з ДРЛ, подав А.Л. Вассерман [12]. Автор зробив висновок, що аномальні струми кіл з ДРЛ обумовлені перехідними процесами під час розгоряння лампи. При цьому зроблена низка допущень і спрощень, що приводить до значної похибки розрахунків - 20%. Тому наведені в [12] аналітичні вирази можна використати тільки для якісної оцінки перехідних процесів. Додаткова складність при проведенні обчислень полягає в тому, що перехідні процеси в колах з нелінійними елементами супроводжуються явищами, які не зустрічаються в колах з лінійними елементами. Характеристики нелінійних елементів залежать від струмів і напруг, а отже змінюються в часі. Це часто призводить до якісно нових явищ. Перехідні процеси в нелінійних колах описуються з допомогою нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язок яких представляє певні труднощі.

Для в'яснення причин появи аномальних струмів кіл з МГЛ розглянемо детально процес їх виникнення. Можна вважати, що лампа в контурі виконує функцію елемента комутації. Тоді, не враховуючи динамічну ВАХ лампи, розрахункову еквівалентну схему контура можна подати у вигляді, показаному на рис. 2.9.

Паралельно зустрічно ввімкнені діоди VD1 та VD2 вказують на напрям протікання струму лампи і їх параметри не враховуються для аналізу процесів. Прийmemo, що комутація відбувається в момент перезапалювання лампи.



Спочатку розглянемо ввімкнення індуктивної котушки без сердечника, яка характеризується активним опором  $R$ , кількістю витків  $W$  та індуктивністю  $L$ .

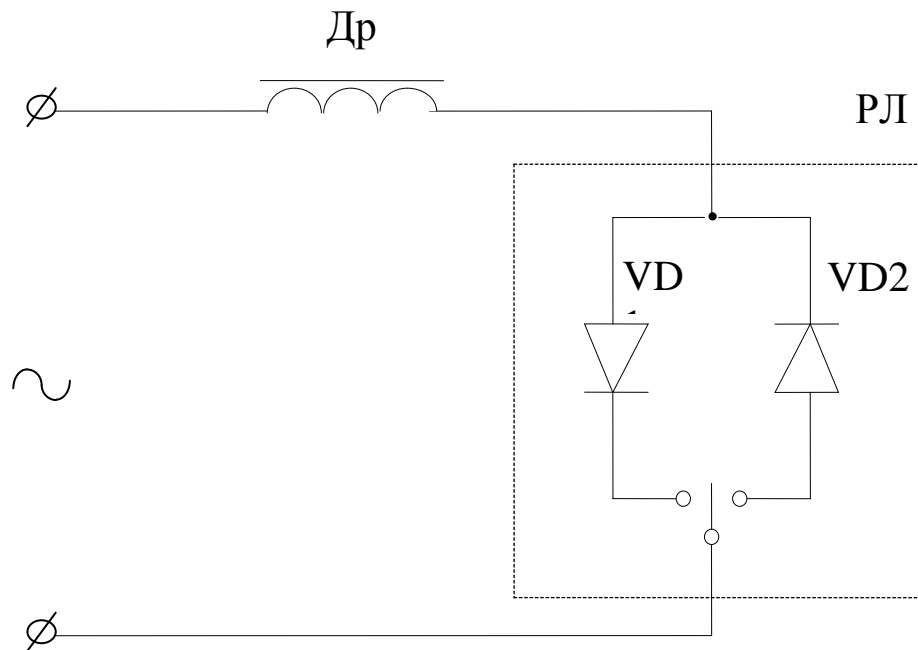


Рис. 2.9. Еквівалентна схема під'єднання дроселя в колі з РЛ до джерела змінної напруги.

Нехай момент ввімкнення визначається кутом  $\varphi$  і під'єднання котушки відбувається для часу  $t=0$ . Тоді для вхідної напруги

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.28)$$

вимушена складова струму дорівнюватиме:

$$i_{ВИМ} = \frac{U_m \sin(\omega t + \varphi - \alpha)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (2.29)$$

де  $\alpha = \arctg \frac{\omega L}{R}$  - кут зсуву між векторами напруги і струму кола.

Прирівнявши  $t$  до 0, отримаємо:

$$i = i_{ВИМ}|_{t=0} = \frac{U_m \sin(\varphi - \alpha)}{Z}, \quad (2.30)$$

де  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  - повний опір кола.

Оскільки в момент ввімкнення загальний струм  $i$  дорівнює нулю, то

$$i = i_{ВИМ}|_{t=0} + i_{В}|_{t=0} = \frac{U_m \sin(\varphi - \alpha)}{Z} + i_{В}|_{t=0} = 0, \quad (2.31)$$

де  $i_{В}|_{t=0}$  - вільна складова струму кола в момент  $t = 0$ .

Отже,

$$i_{В}|_{t=0} = -\frac{U_m \sin(\varphi - \alpha)}{Z}. \quad (2.32)$$

Ця вільна складова струму, протікаючи в замкненому колі без зовнішньої е.р.с., поступово загасатиме. Амплітуда струму зменшуватиметься з часом в геометричній прогресії з коефіцієнтом

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.33)$$

за законом

$$i_B = i_{B|_{t=0}} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.34)$$

Струм кола в перехідний період змінюватиметься згідно з виразом

$$i = \frac{U_m}{Z} \left( \sin(\omega t + \varphi - \alpha) - \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (2.35)$$

Вільна складова струму відсутня, якщо ввімкнення відбувається для  $\varphi = 90^\circ$ , або  $\varphi = 270^\circ$ , тобто коли вимушена складова струму  $i_{вум} = 0$  (рис. 2.10). Для малих значень активного опору і великих значень індуктивності максимальне значення струму кола в перехідному режимі не перевищуватиме подвійної амплітуди усталеного струму. Якщо б опір  $R=0$ , то

$$\frac{R}{L} = \frac{1}{\tau} = 0, \quad (2.36)$$

$$Z = \omega L, \quad (2.37)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2}. \quad (2.38)$$

Тоді струм кола після ввімкнення дорівнював би

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \left( \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \right), \quad (2.39)$$

тобто теоретично містив би дві складові: змінну і постійну. І якщо ввімкнення мало би місце в момент, коли  $\varphi = 0^\circ$  або  $\varphi = 180^\circ$ , то струм характеризувався б постійним напрямом протікання, визначався з виразу

$$i = \frac{U_m}{\omega L}(1 - \cos \omega t) \quad (2.40)$$

та змінювався в межах від 0 до  $2 \frac{U_m}{\omega L}$ . Тобто для ідеального випадку струм в перехідному режимі не перевищує двократного усталеного струму. Складніші процеси відбуваються в колі, якщо до джерела змінної напруги під'єднується котушка з магнітопроводом - дросель.

Прийmemo знову, що в момент  $t = 0$  коло під'єднується до джерела з напругою (2.28). Тоді

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = iR + w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.41)$$

звідки

$$d\Phi = \frac{U_m}{w} \sin(\omega t + \varphi) dt - \frac{R}{w} i dt. \quad (2.42)$$

Інтегруючи останній вираз по часу від 0 до  $t$ , отримаємо:

$$\Phi \Big|_{\Phi_0}^{\Phi_t} = -\frac{U_m}{\omega w} \cos(\omega t + \varphi) \Big|_0^t - \frac{R}{w} \int_0^t i dt \quad (2.43)$$

або

$$\Phi_t = \Phi_0 - \frac{U_m}{\omega w} \cos(\omega t + \varphi) + \frac{U_m}{\omega w} - \frac{R}{w} \int_0^t i dt. \quad (2.44)$$

Останній вираз показує, що миттєвий магнітний потік складається з чотирьох складових:

- постійна складова  $\Phi_0$  визначає собою потік залишкового магнетизму, який пронизує котушку в момент  $t = 0$ ;
- амплітуда другої складової дорівнює магнітному потоку, який мав би місце в стаціонарному режимі для нульового значення опору кола. При порівняно малому опорі та великому зсуві вектора струму відносно вектора напруги в усталеному режимі другу складову можна розглядати як магнітний потік для стаціонарного режиму. Його зміни наводять е.р.с., яка зрівноважується зовнішньою напругою;
- третя складова - це вільна складова магнітного потоку

$$\Phi_{B|_{t=0}} = \Phi_{mвм} \cos \varphi , \quad (2.45)$$

де  $\Phi_{mвм} = \frac{U_m}{\omega W}$  - амплітуда вимушеної складової магнітного потоку.

Складова  $\Phi_B$  компенсує вимушену складову магнітного потоку в початковий момент:

$$\Phi_{B|_{t=0}} + \Phi_{mвм|_{t=0}} = -\frac{U_m}{\omega W} \cos \varphi + \frac{U_m}{\omega W} \cos \varphi = 0 . \quad (2.46)$$

- четверта складова характеризує зменшення вільної складової магнітного потоку  $\Phi_B$ , яке зумовлене спадом напруги на елементах кола.

Таким чином, магнітний потік можна виразити через

$$\Phi_t = -\Phi_{mec} \cos(\omega t + \varphi) + \Phi_B + \Phi_0 - \frac{R}{W_0} \int_0^t i dt . \quad (2.47)$$

На рис. 2.11 показані залежності в часі кривих магнітного потоку і струму кола. Якщо спад напруги на елементах кола не зменшувався б в часі, то магнітний потік складався б з деякої постійної складової ( $\Phi_0 + \Phi_{mBIM} \cos \varphi$ ) та змінної складової  $\Phi_{mBIM} \cos(\omega t + \varphi)$ . Перша складова приймає найбільше значення

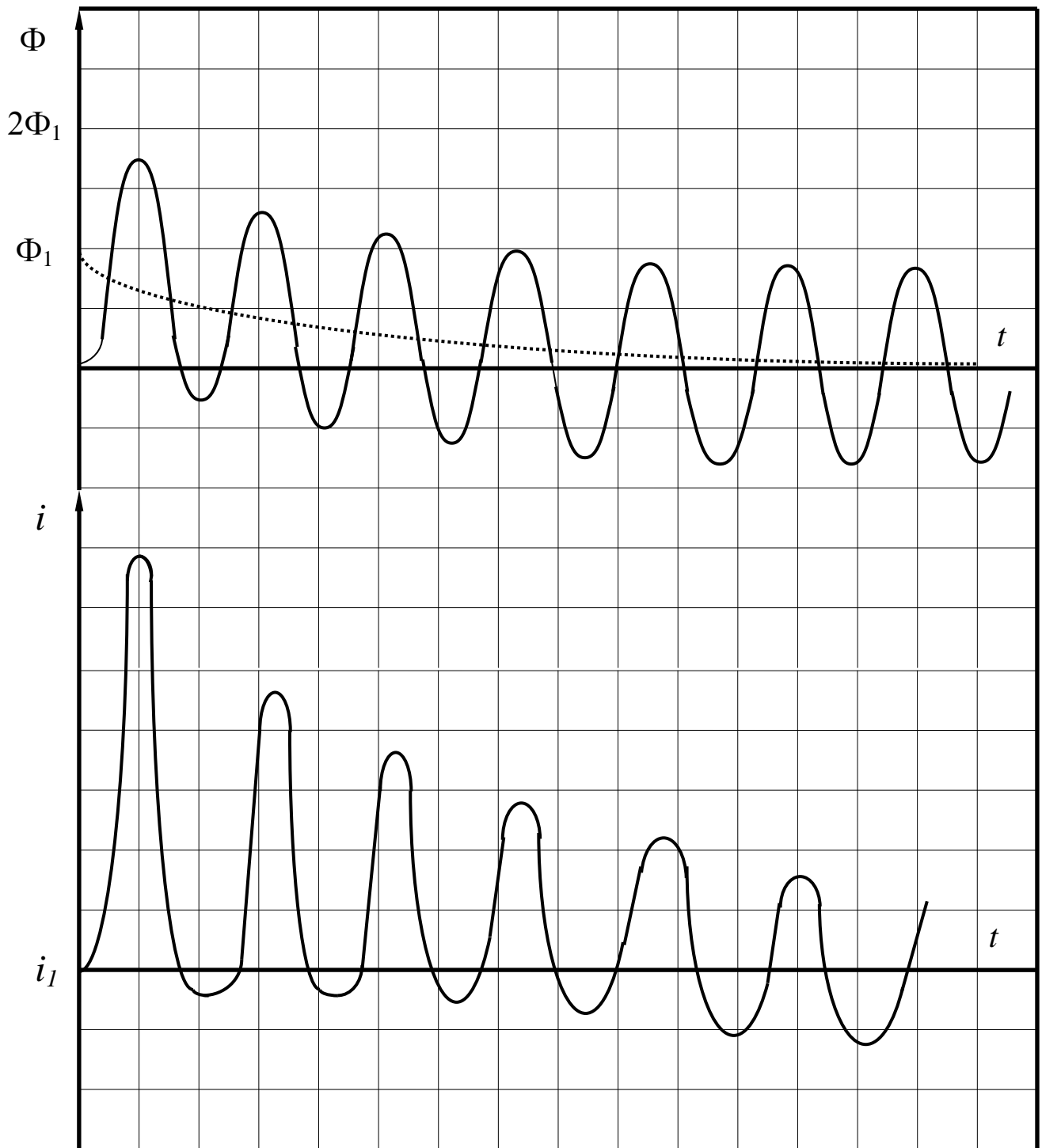


Рис. 2.11. Залежність магнітного потоку та струму кола з R-L від часу  
 $M_t = 5$  мс/под.,  $M_i = 1$  А/под.

для  $\varphi = 0$ , тобто коли ввімкнення відбувається в момент проходження зовнішньої напруги через нуль. Дана складова магнітного потоку змінюється в межах від  $\Phi_0$  до  $(\Phi_0 + 2\Phi_{mВИМ})$  в такт із зміною прикладеної змінної напруги (рис. 2.12). Струм приймає максимальне значення через півперіод після ввімкнення кола до джерела змінної напруги.

Для МГЛ під час несиметричного режиму розряд перезапалюється при кутах  $10 \dots 15^\circ$ . Тоді вільна складова магнітного потоку наближається до максимального значення. Замкнений магнітопровід реальних дроселів на момент перезапалювання РЛ завжди має залишковий магнітний потік  $\Phi_0$ , який спрямований протилежно до вимушеного магнітного потоку. Тому сумарний магнітний потік в магнітопроводі навіть для найнесприятливішого випадку завжди менший за подвійну вимушену складову магнітного потоку. Однак внаслідок тенденції до зменшення малогабаритних показників дроселів амплітуда усталеного потоку  $\Phi_{mВИМ}$  знаходиться поблизу перегину кривої намагнічування. Тому навіть незначне збільшення магнітного потоку понад робоче значення викликає зміщення робочої точки в область насичення. Оскільки повний опір насиченого дроселя незначний, то він практично втрачає властивість струмообмеження. Внаслідок цього струм кола суттєво зростає.

Таким чином, на тривалість аномальних струмів безпосередньо впливає РЛ. При роботі на змінному струмі в РЛ протягом періоду напруги живлення двічі перезапалюється розряд, що можна вважати аналогією процесу комутації. В цьому випадку виникає невідповідність між рівноважним станом кола до комутації та станом його після комутації. Це приводить до виникнення перехідних процесів в контурі. Однак не кожне перезапалювання розряду в РЛ супроводжується виникненням аномальних струмів. Для випадку симетричного розряду в лампі можливе перезапалювання розрядів таких типів: дуговий-дуговий або тліючий-тліючий. Тоді відбувається взаємна компенсація виникнутих магнітних потоків таким чином, що сумарний струм кола не

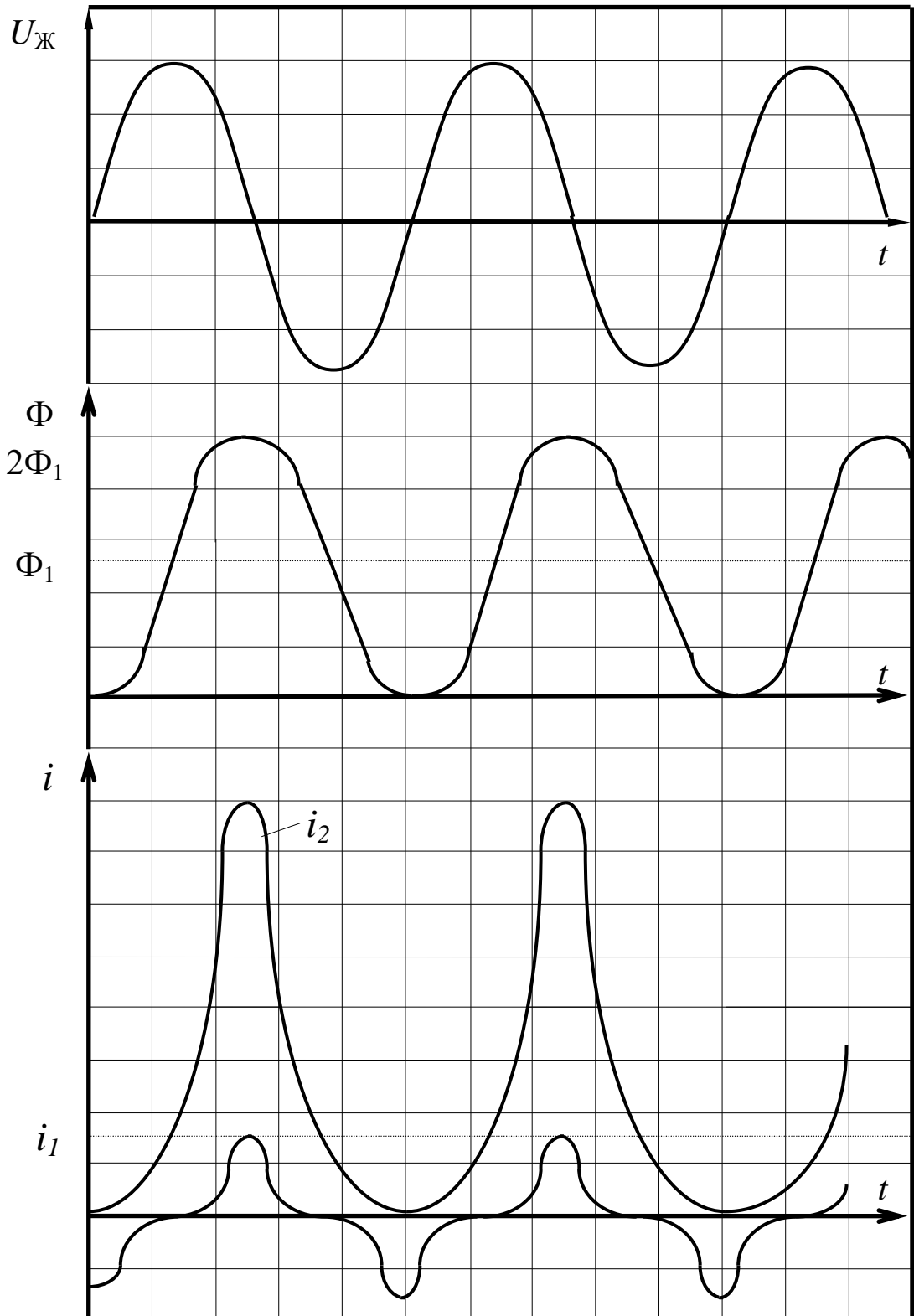


Рис. 2.12. Осцилограми магнітного потоку і струму в колі під час виникнення перехідних процесів при  $R = 0$ .

$M_t = 4$  мс/под.;  $M_{U_{\text{ж}}} = 100$  В/под.;  $M_i = 1$  А/под.



відрізняється від усталеного значення. При несиметричному розряді, має місце перезапалювання дугового розряду в тліючий для кутів  $\varphi \approx \{90^\circ; 270^\circ\}$  і тліючого розряду в дуговий для кутів  $\varphi \approx \{15 \dots 20^\circ; 195 \dots 200^\circ\}$ . У першому випадку відсутність аномальних струмів можна пояснити, користуючись виразами (2.39), (2.44). На основі цих же виразів отримуємо, що в другому випадку магнітний потік та струм кола близькі до максимальних значень.

На основі викладеного можна зробити висновок, що внаслідок специфіки своєї роботи в період розгоряння МГЛ є ініціатором виникнення в колі перехідних процесів, струми яких викликають насичення сердечника баластного дроселя. У зв'язку з цим індуктивний опір дроселя суттєво зменшується порівняно з таким для ненасиченого сердечника. Тому баластний дросель в колі з РЛ втрачає здатність виконувати функцію струмообмежувального елемента. За такої умови струм кола обмежується лише активним опором обмотки баластного дроселя та опором самої РЛ. Внаслідок їх нехтовно малих значень в колі виникають аномальні струми, які значно перевищують номінальне значення.

## 2.5. Методи запобігання аномальних струмів у колах з розрядними лампами

Проаналізувавши причини виникнення та процес формування аномальних струмів кіл з РЛ, пропонується розробити комплекс заходів з їх усунення, або хоч би зменшення несприятливої дії на комплект ПРА-РЛ.

Безперечно, найпривабливішим є шлях усунення вихідних передумов виникнення несиметричного режиму роботи. Розробниками РЛ приймаються заходи для недопущення адсорбції галогенідів на електроди. Сюди можна віднести застосування теплових екранів і утеплювальних покриттів, які сповільнюють остигання електродів у порівнянні з іншими елементами пальника [41]. Однак це лише зменшує ступінь отруєння. Усунути повністю

адсорбцію галогенідів дотепер не вдалося. Тому нижче пропонується низка способів, які дозволяють до певної міри розв'язати проблему аномальних струмів під час розгоряння МГЛ.

1. Дію аномальних струмів можна значно зменшити шляхом суттєвого збільшення пускового струму. Це дозволяє зменшити тривалість аномальних струмів завдяки інтенсивнішому розігріву електродів. Реалізація способу вимагає відповідної зміни конструкції ПРА.

2. Аномальні струми можна значно зменшити шляхом ввімкнення послідовно з РЛ резистора з подальшим його від'єднанням після закінчення несиметричної стадії горіння розряду.

Для визначення необхідного значення опору резистора потрібно розв'язати рівняння

$$K_{\mu} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = 1 + \exp\left(-\pi \frac{R}{\omega L}\right). \quad (2.48)$$

Розв'язавши дане рівняння відносно показника степені, отримаємо:

$$R = \frac{1}{\pi} \omega L \ln\left(\frac{1}{K_{\mu} - 1}\right). \quad (2.49)$$

Замість коефіцієнта самоіндукції  $L$ , який відповідає амплітудному значенню струму, зручніше користуватися коефіцієнтом самоіндукції  $L_1$ , що характеризує усталений струм. Їх відношення на основі виразу

$$K_{\alpha} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.50)$$

дорівнює

$$\frac{L}{L_1} = \frac{\Phi_2 I_2^{-1}}{\Phi_1 I_1^{-1}} = \frac{K_\alpha}{K_\mu}. \quad (2.51)$$

Підставивши  $L$  з (2.49), отримаємо відношення активного опору до реактивного. Це адекватно відношенню спаду напруги на резисторі, який викликаний намагнічувальним струмом  $I_\mu$ , до напруги мережі:

$$\frac{R}{\omega L_1} = \frac{R I_\mu}{\omega L_1 I_\mu} = \frac{U_R}{U_{\mathcal{K}}} = \rho = \frac{K_\mu}{\pi K_\alpha} \ln \left( \frac{1}{K_\mu - 1} \right). \quad (2.52)$$

Допустима кратність струму  $K_\alpha$  відома для кожного конкретного випадку. Знаючи  $K_\alpha$ , можна з характеристики намагнічування знайти відношення потоків  $K_\mu$ , а потім з виразу (2.52) - відношення опорів.

Активний опір кола, тобто опір разом із захисним опором, дорівнює

$$R = \rho \frac{U_{\mathcal{K}}}{I_\mu}. \quad (2.53)$$

3. Застосування лінійних баластних дроселів. Виникнуті струми періодичних перехідних процесів викликають насичення баластного дроселя, наслідком якого є поява в колі аномальних струмів. Зменшення амплітуди струмів можна досягти відповідним вибором робочої точки на ВАХ дроселя. Він полягає в тому, щоб при збільшенні магнітного потоку в магнітопроводі, яке викликане струмом перехідних процесів, робоча точка не зміщувалась в нелінійну область. Іншими словами, застосувати для стабілізації струму лампи лінійні баластні дроселі. Лінійна ВАХ вказаних баластів забезпечує відповідну лінійну зміну магнітного потоку в магнітопроводі під дією струмів періодичних перехідних процесів. Однак розробка лінійних баластів вимагає суттєвого

збільшення витрат міді та сталі для їх виготовлення. Це, ймовірно, є причиною їх незначного поширення.

У [71] пропонується для збільшення терміну служби МГЛ використовувати систему живлення з середньоквадратичною напругою 380 В і відповідним лінійним дроселем з великим індуктивним опором. Збільшення терміну служби ламп досягається шляхом зменшення кратності пускового струму  $\alpha$ , а також аномальних струмів. Крім цього, збільшується стабільність світлового потоку, покращуються умови перезапалювання і зменшуються пульсації світлового потоку. Однак пропонований комплект має низку суттєвих недоліків. Зменшується коефіцієнт потужності схеми, який становить 0,32 ... 0,35. Його компенсація вимагає підвищення потужності групових конденсаторних установок. Відбувається також значне збільшення втрат електричної енергії.

Вибір системи живлення з середньоквадратичною напругою 380 В зумовлений перспективою використання багатоелектродних МГЛ, для запалювання яких потрібна підвищена напруга живлення. Отже, лінійні дроселі можна рекомендувати для використання в комплекті з багатоелектродними лампами, коли відпадає потреба в ЗП. У цьому випадку вартість комплекта лінійний баласт - багатоелектродна МГЛ співмірна з вартістю стандартного комплекта.

4. Використання індуктивно-ємнісних баластів. На відміну від схем живлення ЛЛ для РЛВТ індуктивно-ємнісні баласты застосовуються значно рідше. Це пов'язане насамперед із значним збільшенням об'єму і маси за рахунок додаткового блоку конденсаторів.

Детальний аналіз індуктивно-ємнісних баластів, однак лише щодо несиметричного режиму горіння ЛЛ, проведений В.А.Волченком [23]. Ним зроблені такі висновки:

- у колах з індуктивно-ємнісним баластом можливе виникнення несиметричного режиму, якщо напруга перезапалювання суттєво відрізняється

в півперіоди і схема забезпечує досить високу напругу перезапалювання - напругу холостого ходу;

- наприкінці терміну служби внаслідок дезактивації одного з електродів виникає несиметричний режим роботи, який супроводжується значною зміною характеристик на контурах;

- відбувається перевантаження елементів схеми за струмом і напругою пропорційно до збільшення напруги перезапалювання розряду. Середньоквадратичне значення струму розряду зростає в 1,5 ... 1,7 раза, а спад напруги на дроселі в 4 ... 5 разів перевищує напругу живлення;

- несиметричний режим викликає суттєве перевантаження ПРА, зменшує його надійність і вимагає відповідного врахування при розробці комплекту. Проведені дослідження індуктивно-ємнісних баластів для МГЛ показали, що зроблені у [23] висновки справедливі і для РЛВТ. На несиметричній стадії горіння в режимі розгоряння також спостерігається перевантаження елементів схеми. Проте при цьому має місце не виникнення аномальних струмів, а перенапруга на дроселі. В порівнянні з індуктивним баластом несиметрична стадія горіння з індуктивно-ємнісним баластом менш шкідлива. Це є передумовою його рекомендації як способу зменшення несприятливої дії на РЛ режиму розгоряння;

- спосіб симетрування розряду. На сьогодні внаслідок специфіки МГЛ, під час розгоряння не можна уникнути несиметричної стадії горіння розряду з характерними для неї тліючим і дуговим розрядами. Нами встановлено, що перехідні процеси виникають після перезапалювання розрядів тліючий - дуговий та дуговий - тліючий. Перший з них характеризується наявністю аномальних струмів, а другий - їх відсутністю. Відмінність полягає в тому, що кут перезапалювання розрядів тліючий - дуговий  $\varphi = 15 \dots 20^\circ$ , а дуговий-тліючий  $\varphi \approx 90^\circ$ . Згідно з (2.44) вільна складова магнітного потоку магнітопроводу, а отже і струму лампи з виникненням перехідного процесу при під'єднанні дроселя до джерела змінної напруги чи перезапалюванні, матиме

максимальне значення для  $\varphi = \{0^\circ; 180^\circ\}$  і дорівнюватиме нулю для  $\varphi = \{90^\circ; 270^\circ\}$ .

Отже, усунути аномальні струми можна, якщо позбутися вільної складової магнітного потоку, тобто забезпечити перезапалювання лампи в режимі розгоряння при  $\varphi = \{90^\circ; 270^\circ\}$ . Реалізувати дану пропозицію можна шляхом примусового перезапалювання з використанням ключових елементів. На рис. 2.13 показана схема, яка дозволяє регулювати кут перезапалювання  $\varphi$ . Розглянемо її роботу.

При ввімкненні симистора в момент  $\varphi_{\text{вим}}$ , який відповідає природньому перезапалюванню лампи  $\varphi_{\text{пр}}$ , робота схеми не відрізняється від робочого режиму (рис. 2.14). Кут  $\varphi_{\text{вим}}$ , який відповідає цьому моменту, є мінімально можливим кутом відкриття симистора. Інакше лампа загасне внаслідок закриття симистора при переході струму лампи через нуль. Мається на увазі, що сигнали керування подаються на симистор у моменти часу, що відповідають кутам  $\varphi_{\text{вим}}$  та  $(\varphi_{\text{вим}} + \pi)$ . При збільшенні кута  $\varphi_{\text{вим}}$  перезапалювання лампи відбувається в момент відкриття симистора. Аналіз рис. 2.15 показує, що вольт-секундний інтеграл напруги на дроселі, який відповідає інтервалу  $\varphi_{\text{вим}} \dots \varphi_1$ , зменшується. Це викликає зменшення амплітуди струму лампи і одночасно паузу в кривій струму.

Пропонується використовувати метод примусового перезапалювання в режимі розгоряння РЛВТ для усунення аномальних струмів протягом цього часу. Кут відкриття симистора  $\varphi_{\text{вим}}$  вибирається, виходячи з таких умов:

- досягнення усунення аномальних струмів;
- запобігання погасання лампи.

Виходячи з цих умов, кут примусового перезапалювання лампи  $\varphi_{\text{вим}}$  повинен перевищувати для вказаного режиму природній кут перезапалювання  $\varphi_{\text{пр}}$ . Оскільки в режимі розгоряння відразу після пробою виникає дуговий розряд, перезапалювання якого відбувається для кута  $\varphi_{\text{пр}} \approx 90^\circ$ , тому кут

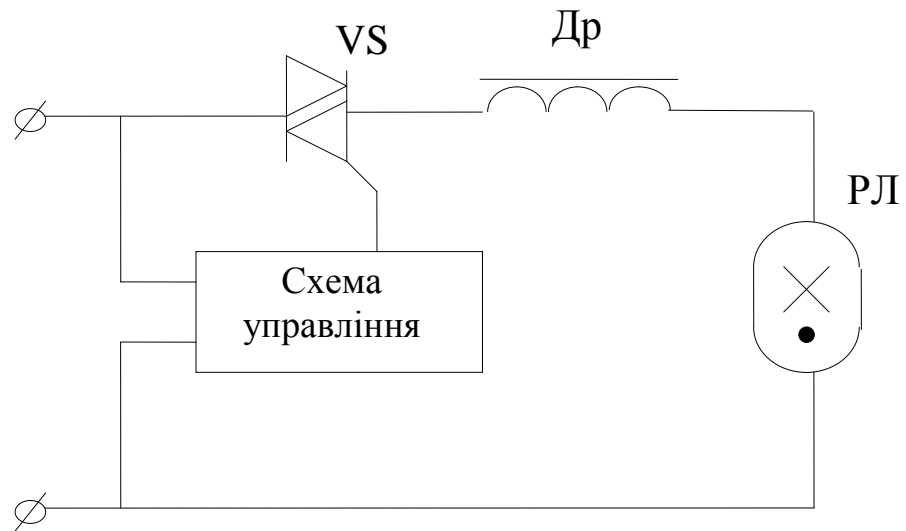


Рис. 2.13. Схема симисторно-індуктивного баласту.

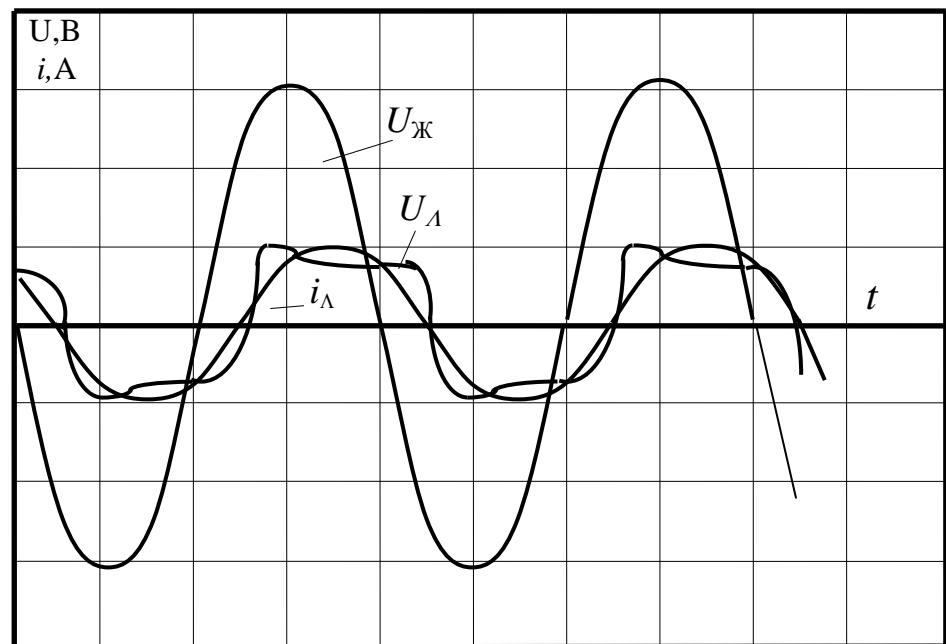


Рис. 2.14. Криві струмів та напруг для природнього перезапалювання РЛ.  
 $M_t = 5$  мс/под.;  $M_{U_{\text{ж}}} = 100$  В/под.;  $M_{U_{\text{Л}}} = 150$  В/под.;  $M_{i_{\text{Л}}} = 3$  А/под.

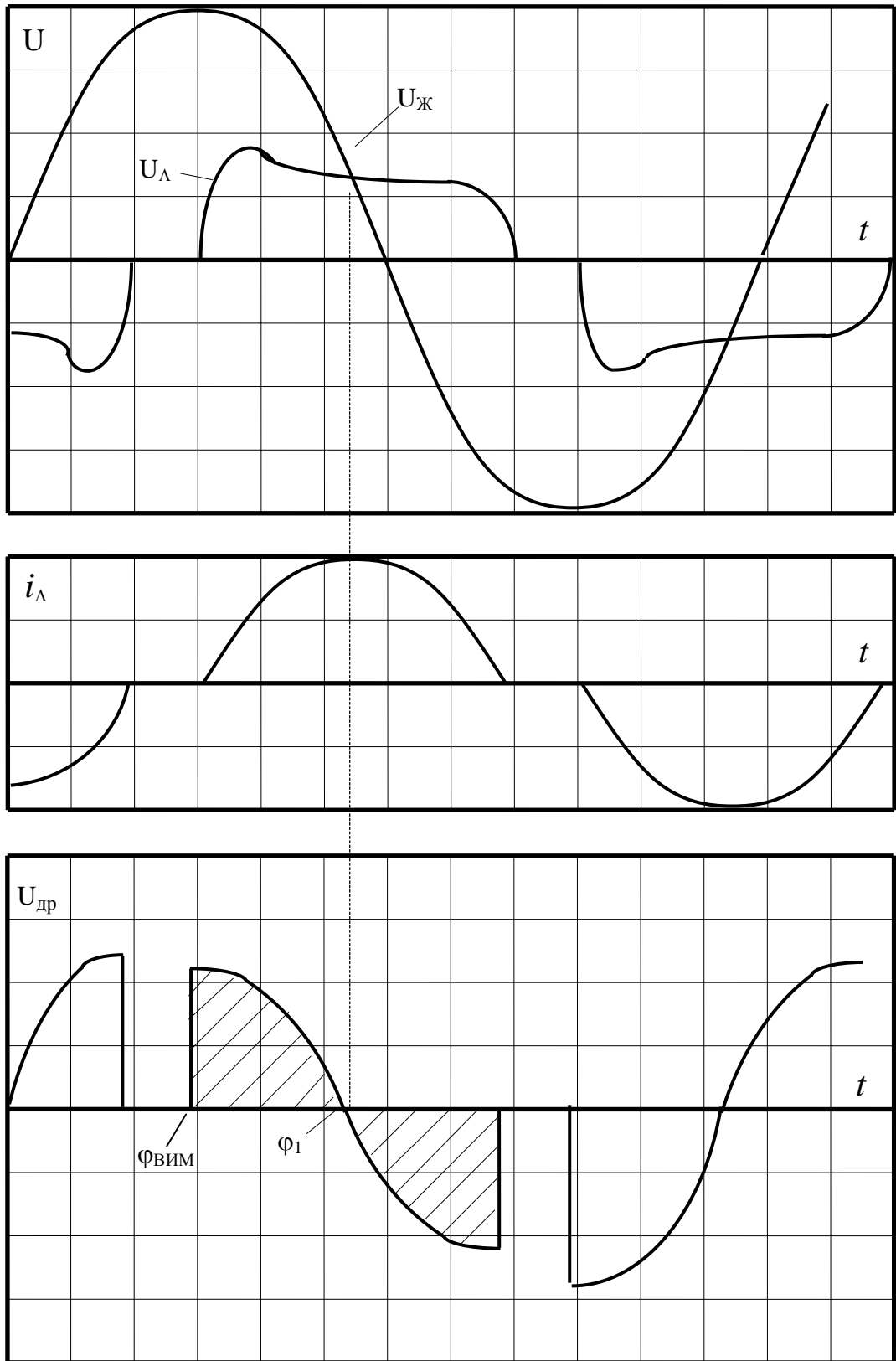


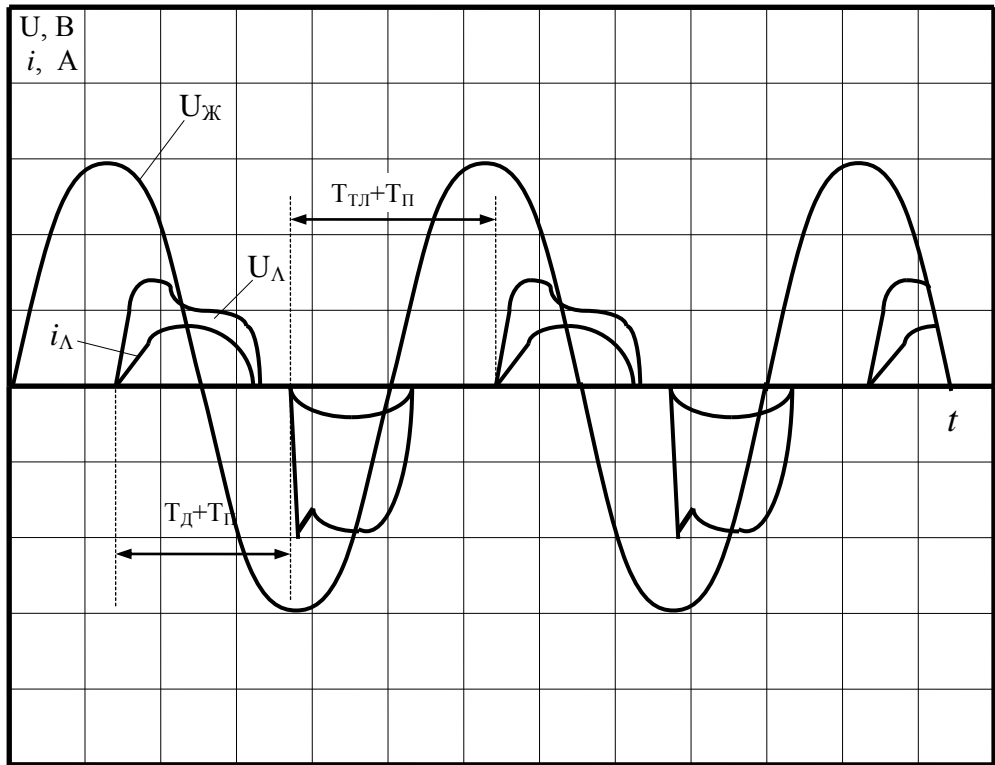
Рис. 2.15. Часові діаграми струмів та напруг у схемі рис. 2.13  
 $M_t = 1,7$  мс/под.;  $M_U = 77,5$  В/под



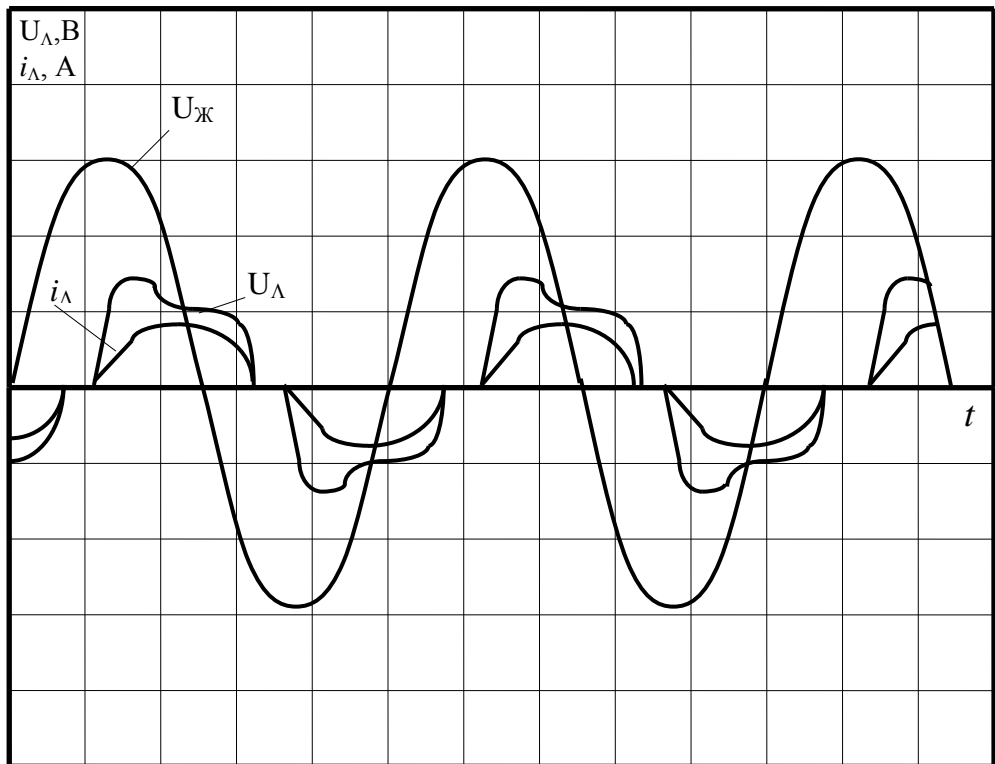
примусового перезапалювання повинен становити  $\varphi_{\text{вим}} > 90^\circ$ . Нами встановлено, що для усунення вільної складової струму періодичних перехідних процесів необхідно, щоб перезапалювання відбувалося для кутів  $\varphi = \{90^\circ; 270^\circ\}$ . Беручи до уваги, що пауза струму повинна бути незначною і становити  $3 \dots 8^\circ$ , кут примусового перезапалювання вибираємо в діапазоні  $\{93 \dots 100^\circ; 273 \dots 280^\circ\}$ . При ввімкненні симистора у вказані моменти часу в кривій струму лампи будуть присутні паузи на всіх стадіях розвитку розряду. При утворенні після пробою короткочасного дугового розряду пауза становить  $3 \dots 8^\circ$ , оскільки природній кут перезапалювання дорівнює в цей час  $\varphi \approx \{90^\circ; 270^\circ\}$ . З виникненням симетричного тліючого розряду пауза струму збільшується до  $70^\circ \dots 80^\circ$  і характеризується, як і на попередньому інтервалі, однаковою тривалістю для двох півперіодів. Запалюється розряд для  $\varphi_{\text{вим}} = \{93^\circ \dots 100^\circ; 273^\circ \dots 280^\circ\}$ , а погасає в діапазоні  $\{5^\circ \dots 10^\circ; 185^\circ \dots 190^\circ\}$ .

З появою на одному з електродів дугового розряду виникає несиметрія півперіодів горіння розрядів. Однак, тут є відмінність від звичайної схеми живлення, де збільшення тривалості дугового розряду  $T_d$  відбувається за рахунок зменшення тривалості тліючого розряду  $T_{\text{тл}}$ , тобто  $T_d > T_{\text{тл}}$ . У пропонованому методі, завдяки примусовому перезапалюванню у вказаному діапазоні, сумарна тривалість півперіодів горіння і паузи однакова, а саме  $T_d + T_{\text{п}} = T_{\text{тл}} + T_{\text{п}}$  (рис. 2.16 а). В залежності від виду розряду змінюється лише тривалість паузи. За результатами проведених досліджень встановлено, що відразу після запалювання МГЛ може працювати із значною паузою струму як в півперіод тліючого, так і дугового розрядів. Після нагріву холодного електрода до температури термоелектронної емісії в МГЛ встановлюється симетричний дуговий розряд з незначною, в  $3 \dots 8^\circ$ , паузою струму (рис. 2.16 б). При подальшому розгорянні МГЛ потреба у примусовому перезапалюванні відпадає, тому дія пристрою для здійснення примусового перезапалювання

припиняється. Режим роботи схеми в подальшому не відрізняється від режиму роботи звичайної схеми живлення.



а)



б)

Рис. 2.16. Осцилограми струму та напруги в схемі рис. 2.13 при несиметричному а) і симетричному б) розрядах у лампі

$M_t = 2 \text{ мс/под.}$  ;  $M_i = 3 \text{ А/под.}$  ;  $M_U = 78 \text{ В/под.}$  .

Застосування примусового симетрування розряду при розгорянні МГЛ, на відміну від інших методів, повністю усуває аномальні струми. На рис. 2.17 показана осцилограма струму МГЛ під час її розгоряння в схемі з примусовим симетруванням розряду. Вона свідчить про плавний перехід стадій розряду без виникнення аномальних струмів.

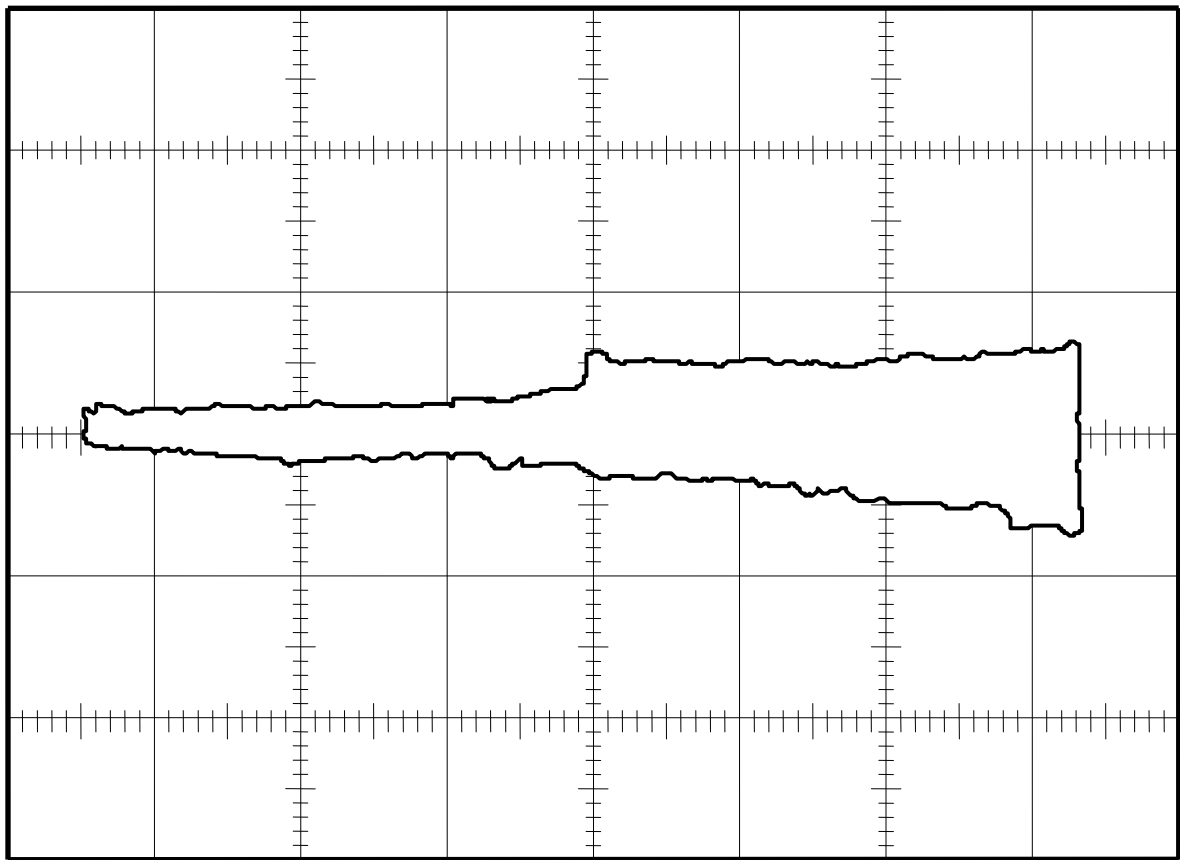


Рис. 2.17. Обвідна струму МГЛ під час розгоряння із примусовим симетруванням розряду

$$M_t = 500 \text{ мс/под.} ; M_{i,л} = 5 \text{ А/под.} .$$

симетрування розряду за допомогою ключових елементів є найефективнішим. На відміну від інших методів пропонуваній метод повністю усуває виникнення аномальних струмів. Крім цього він дає можливість, у випадку необхідності, реалізувати регулювання струму лампи. Однак, слід відзначити, що вибір того

чи іншого методу запобігання аномальних струмів визначається конкретними умовами його застосування.

## 2.6. Усталений режим

Стадія несиметричного розряду закінчується, як тільки температура холодного електрода досягає температури термоелектронної емісії. У МГЛ в обидва півперіоди формується дуговий розряд, який протягом декількох періодів стає симетричним. На стадії симетричного дугового розряду встановлюються всі електричні та світлотехнічні параметри РЛВТ. З підвищенням температури пальника зростають тиск пари ртуті та швидкість випаровування металогалогенних домішок. Опір розряду, а відповідно і напруга його горіння, повільно збільшується. Аналогічно змінюється світловий потік, тоді як струм МГЛ і спад напруги на дроселі зменшуються до робочих значень. На рис. 2.18 показана часова залежність напруги на лампі типу ДРИ-250. Окремі значення подані для вимірювань, виконаних з інтервалом 1 хв.

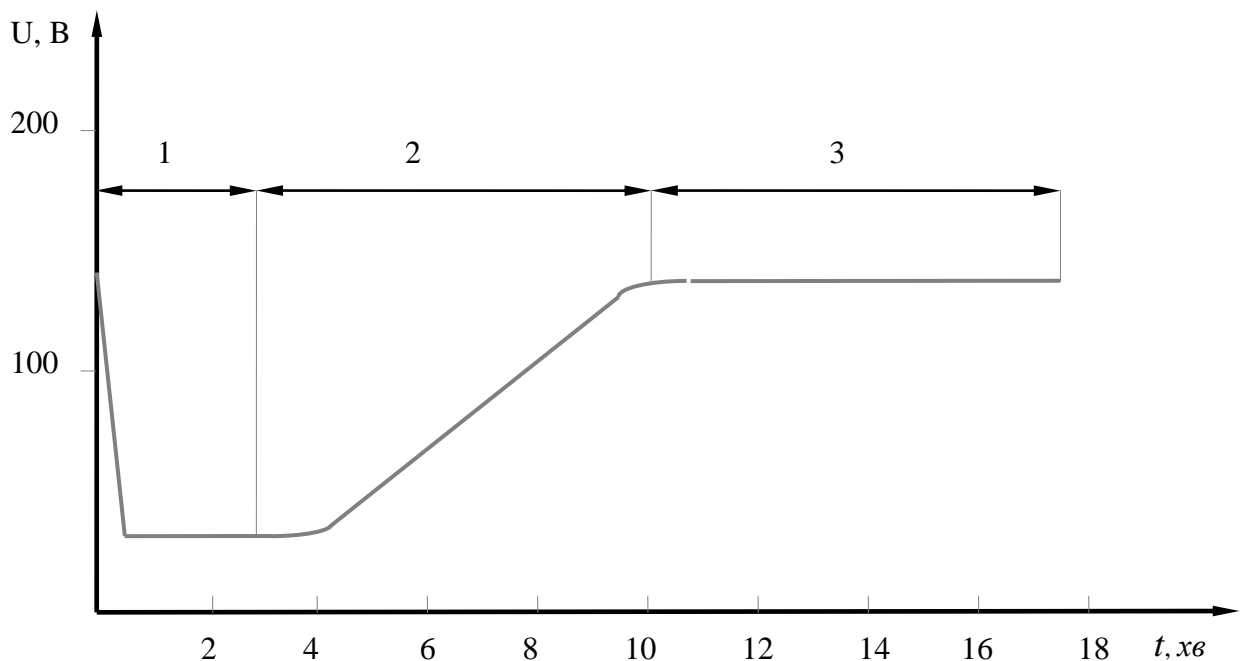


Рис. 2.18. Напруга на лампі ДРИ - 250 в режимі розгоряння.

Стадію симетричного дугового розряду під час розгоряння лампи можна розбити на кілька етапів:

- на початковому етапі МГЛ для дроселя представляє практично короткозамкнений контур, оскільки напруга на лампі становить 15 ... 20 В. Тому на дроселі спадає практично вся напруга живлення. Напруга на лампі має прямокутну форму, а струм в 1,5 ... 1,8 раза перевищує номінальне значення. Тривалість етапу становить 1 ... 3 хв;

- для другого етапу характерна інтенсивна зміна всіх характеристик МГЛ. Напруга горіння розряду зростає, її форма з прямокутної трансформується в трапецеїдну. Кут фазового зсуву напруги на лампі поступово зменшується від початкового значення  $90^\circ$ . Фотографуючи щохвилини осцилограми, нами отримані криві напруги на лампі для різних кутів перезапалювання (рис. 2.19). Тривалість другого етапу становить 2...10 хв в залежності від потужності ДС;

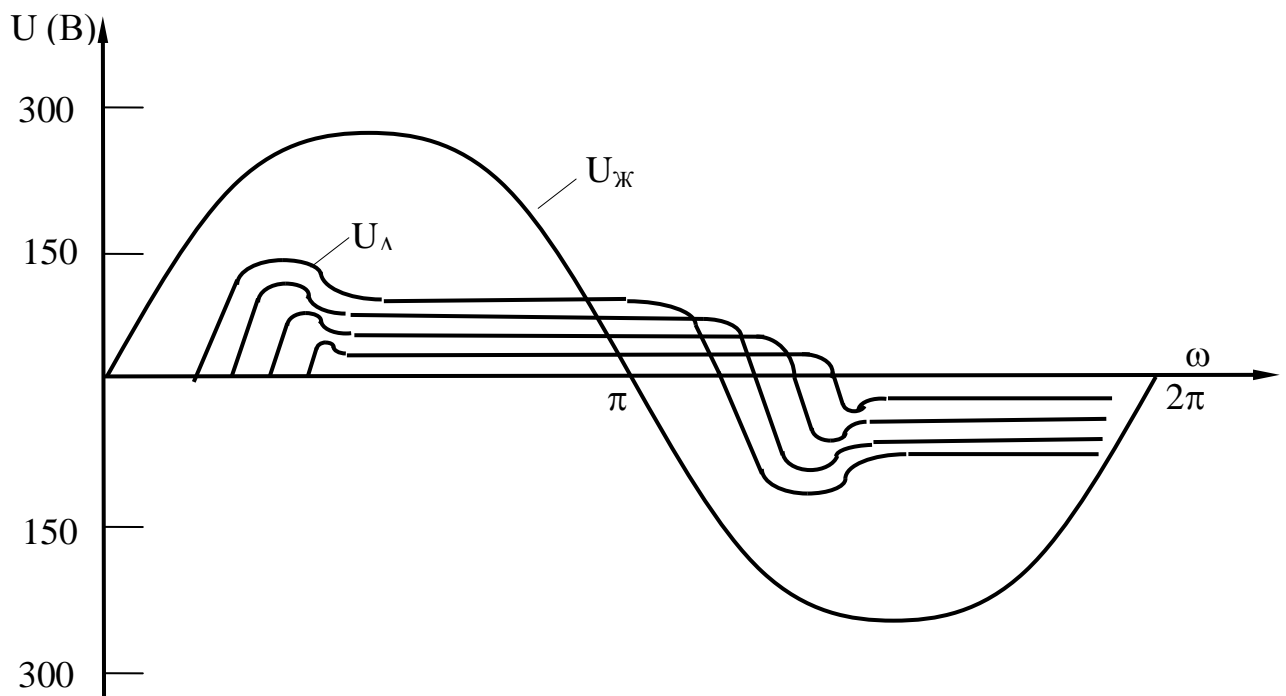


Рис. 2.19. Зміна кута перезапалювання МГЛ в процесі її розгоряння.

- під час третього етапу відбувається остаточна стабілізація характеристик МГЛ. У лампі встановлюється усталений режим. На рис. 2.20 наведені осцилограми напруги та струму МГЛ для даного режиму, а на (рис. 2.21) - її ВАХ. Усталений режим детально проаналізований в [44,75,81,84]. Тому на ньому не зупинятимемось.

Для аналізу процесів, які протікають під час розгоряння МГЛ, нами використана низка допущень - не врахована ВАХ МГЛ та ін. Це дозволило отримати лише якісну картину всіх процесів, оскільки похибка розрахунків перевищує 20%. Уточнений аналіз кіл, які містять РЛ, можливий лише при врахуванні ВАХ лампи. Розгляд цих питань проведено нижче.

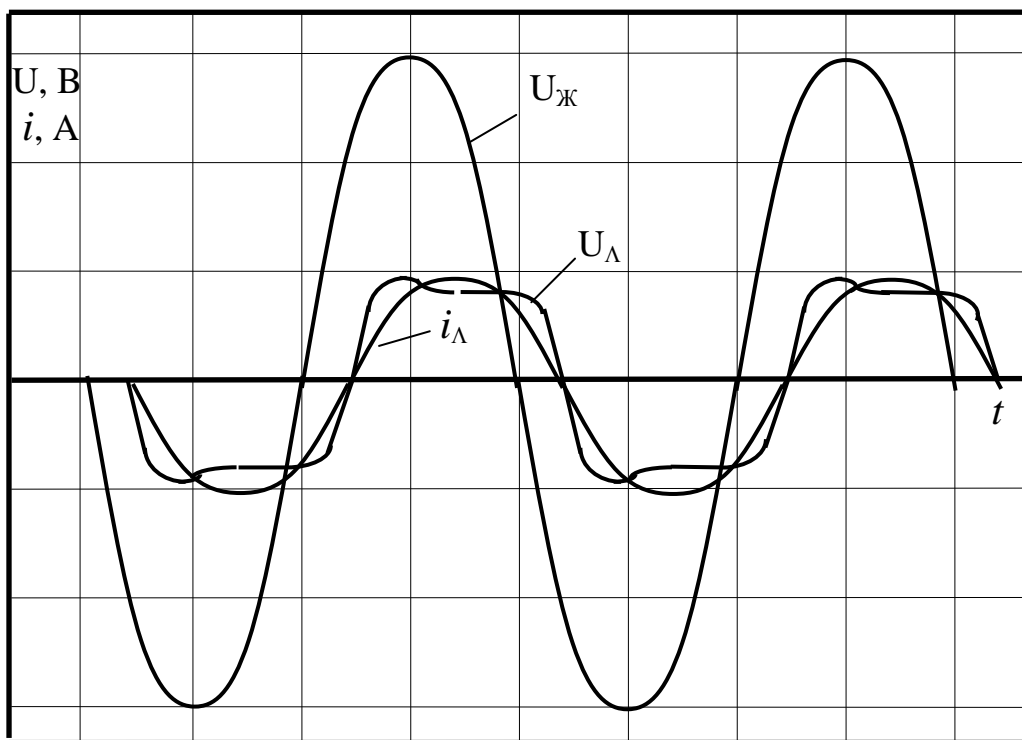


Рис. 2.20. Осцилограми напруги та струму МГЛ в усталеному режимі  
 $M_t = 5$  мс/под.;  $M_{i_{\text{Л}}} = 3$  А/под.;  $M_{U_{\text{Л}}} = 150$  В/под.;  $M_{U_{\text{Ж}}} = 100$  В/под..

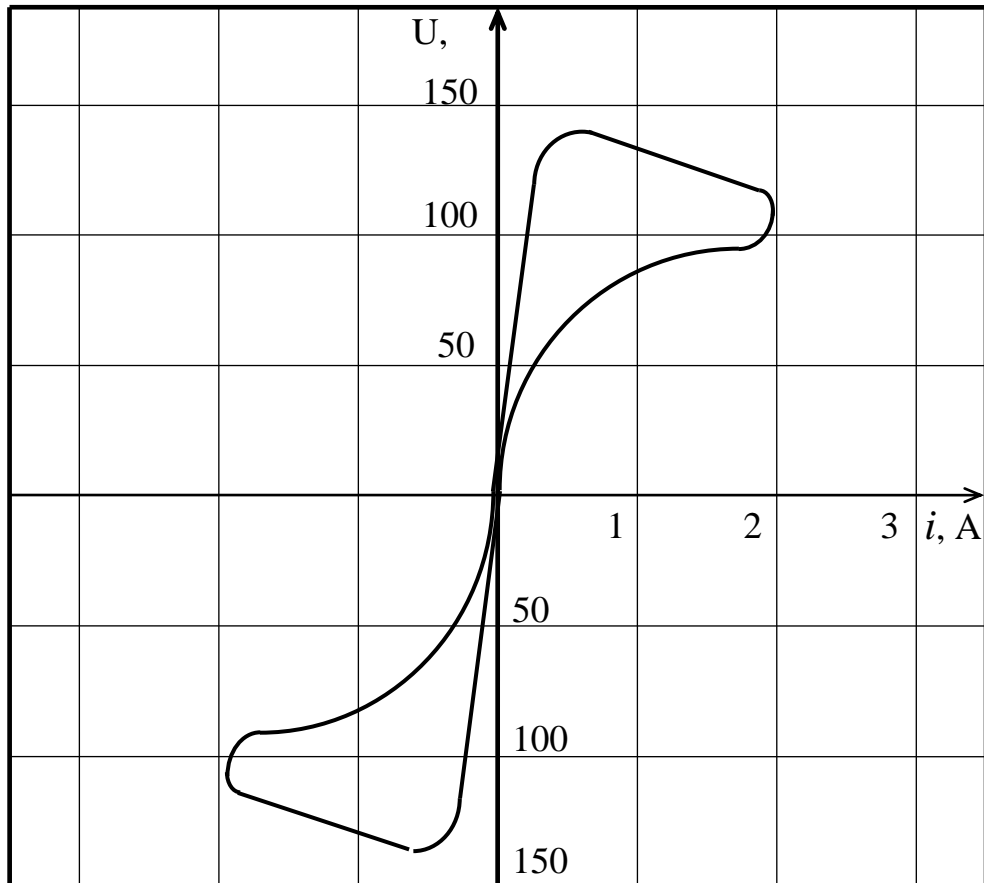


Рис. 2. 21. Вольт - амперна характеристика МГЛ в усталеному режимі.

## Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що виникнення аномальних струмів під час розгоряння МГЛ зумовлене насиченням баластного дроселя.

2. Отримано, що причиною насиченого дроселя є струми перехідних періодичних процесів для несиметричного режиму роботи лампи. Останній утворюється через нерівномірний нагрів електродів внаслідок їх отруєння галогенідами під час остигання після попереднього ввімкнення.

3. Теоретично доведено, що усунути чи по крайній мірі зменшити аномальні струми можна шляхом :

- суттєвого збільшення пускового струму;
- ввімкнення послідовно з дроселем резистора з подальшим його вимкненням;
- вибору робочої точки на ВАХ дроселя таким чином, щоб струми перехідних процесів не викликали насичення дроселя, тобто застосування лінійних дроселів;
- застосування індуктивно - ємнісних баластів;
- примусового симетрування розряду за допомогою ключових елементів.

4. Показано, що лінійні дроселі доцільно використовувати з багатоелектродними МГЛ, оскільки тоді вартість пропонованого комплекту ПРА - лампа співмірна з вартістю використовуваних комплектів.

5. Пропонується для усунення аномальних струмів використовувати метод примусового перезапалювання в режимі розгоряння РЛВТ.



## РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
КІЛ З ЕЛЕКТРОДУГОВИМ ПРОМІЖКОМ

Електрична дуга широко використовується в різних промислових та науково-дослідних установках: електродугових сталеплавильних печах, електрозварних пристроях, електродугових плазматорах, розрядних лампах. Це викликало необхідність детальних експериментально-теоретичних досліджень дуги. Промислова електрична дуга - один з часткових видів електричного розряду в газах. Поряд із загальними рисами, притаманними газовому розряду, дуга володіє низкою специфічних особливостей пов'язаних із суттєвою нестабільністю процесів, які протікають в ній. Це значно затрудняє теоретичне дослідження дуги. Складність створення загальної теорії полягає в тому, що для побудови потрібний сумісний розв'язок нелінійної і нестационарної системи рівнянь газової динаміки та електродинаміки, які описують процеси в самій дузі, а також нелінійної нестационарної системи рівнянь електричного кола, яке містить дуговий розряд.

## 3.1. Вибір методу розрахунку кола з розрядною лампою

На сьогодні розроблена низка моделей та методів розрахунку кіл, які містять РЛ. Їх детально розглянуто в [52, 54, 81, 98], тому проаналізуємо лише основні з них. Для розрахунку робочих режимів кіл з РЛ в основному використовуються два принципи:

- перший ґрунтується на представленні РЛ еквівалентним генератором з внутрішнім опором, що дорівнює нулю. При цьому приймається, що форма напруги на лампі не залежить від форми її струму. Відповідно до виду залежності, яка апроксимує реальну форму кривої напруги на лампі,

розрізняють чотири методи розрахунку: гармонічного аналізу, еквівалентних синусоїд, припасовування і операторний;

- в основу другого принципу, який більш строго відображає фізичні процеси, що протікають в позитивному стовпі лампи, покладена диференційна апроксимація динамічної ВАХ РЛ.

Розглянемо переваги та недоліки моделей і методів розрахунку, які використовують вказані принципи:

1. Метод гармонійного аналізу базується на припущенні, що напруга на дузі не залежить від її струму, а вольт - секундна характеристика дуги має прямокутну або трапецієвидну форму [75, 82, 83]. Апроксимована таким чином напруга на дуговому проміжку розкладається в ряд Фур'є. Перевагами методу слід вважати :

- можливість застосування складних трапецієвидних і чотирикутної апроксимацій форми напруги;
- можливість розрахунку розгалужених схем ПРА.

До недоліків методу відносяться:

- громіздкість основних аналітичних виразів, якщо їх вдається подати у вигляді скінченної суми ряду;
- ускладнення при розрахунках кіл, які містять нелінійний баласт і характеризуються паузами струму;
- значна похибка, яка для низки випадків зумовлена неточною апроксимацією напруги на дузі, особливо в нестационарних режимах;
- складність аналізу перехідних процесів і аномальних режимів роботи РЛ.

2. Метод еквівалентних синусоїд ґрунтується на заміні несинусоїдних форм кривих струму і напруги еквівалентними синусоїдами [62, 73]. Це дозволяє будувати векторні діаграми електричного кола і створює певні зручності для аналізу схем. Метод характеризується такими недоліками:

- неможливістю визначення миттєвих значень електричних величин;

- неможливістю досліджень аномальних режимів і режимів з паузами струму;
- значною похибкою при розрахунку простих лінійних схем, яка може становити  $\geq 15\%$ ;
- не дозволяє обчислити гармонійний склад струму лампи.

Метод використовується в основному для розрахунку схем на підвищених частотах при синусоїдній формі напруги живлення.

3. Метод припасовування вперше використаний Р. Караєвим і застосований А. Краснопольським для розрахунків кіл, які містять РЛ [44, 45, 49, 51]. При цьому напруга на лампі апроксимується залежністю відповідної форми, найчастіше трапецієвидної, та описується алгебраїчним виразом. Потім здійснюється інтегрування диференціальних рівнянь електричного кола.

Проте методу властиві суттєві недоліки:

- одно - півперіодна апроксимація;
- затруднення в отриманні простих формул при аналізі схем будь-якої складності.

Метод доцільно використовувати для аналізу схем, які описуються диференціальними рівняннями першого порядку і для апроксимації напруги на лампі використовуються прості залежності.

4. Операторний метод стосовно високочастотних ПРА розвинутий Д. Димитровим. Використовуючи зображення за Лапласом для напруги живлення і замінюючи лампу неспотвореним нелінійним резистором, знаходять корені характеристичного рівняння контура і зображення основних його електричних параметрів. Метод придатний для розрахунку кіл, які описуються диференціальними рівняннями не вище другого порядку [43].

5. Щодо методів, які ґрунтуються на принципі Штрауха, то вже на початку розрахунків необхідно знати форму напруги на лампі або, по крайній мірі, залежність напруги для різних режимів роботи. Цей недолік відсутній для

методу, який базується на інтегруванні диференційного рівняння РЛ [97]. В порівнянні з попередніми методами він має низку важливих переваг:

- можливість аналізу лінійних, нелінійних і параметричних кіл як в усталених, так і в перехідних режимах;
- мінімальна кількість необхідних експериментальних досліджень;
- висока точність розрахунку, яка характеризується похибкою в одиниці відсотків;
- вивільнення розробників від трудомістких оптимізаційних розрахунків.

Недолік методу:

- необхідність створення адекватних математичних моделей елементів кола;
- можливість виникнення нестійкості обчислення при використанні явних методів інтегрування.

Для складання диференційних рівнянь, які описують процеси в колі, найчастіше використовують рівняння Кірхгофа, метод контурних струмів, метод вузлових потенціалів і метод змінних стану. На даний час найбільш розроблені чисельні методи розв'язку систем диференційних рівнянь першого порядку, які зведені до так званої нормальної форми Коші, тобто розв'язуваних відносно похідних. Вказані три методи складання рівнянь приводять до систем диференційних рівнянь.

6. Від цього недоліку позбавлений метод змінних стану [49, 62]. Основна ідея цього методу полягає в наступному. З теорії кіл відомо, що перехідні процеси в будь-якій електричній схемі, яка містить реактивні елементи ємність та індуктивність, описуються диференційними рівняннями  $n$  - порядку. Тут  $n$  - кількість незалежних початкових умов дорівнює кількості незалежних початкових запасів енергії в схемі. Оскільки енергія запасється в реактивних елементах схеми, то порядок диференційних рівнянь дорівнює сумарній кількості ємностей з незалежними початковими зарядами  $Q$  та індуктивностей з незалежними початковими потокозчепленнями  $\Psi$ . Величини  $Q$  і  $\Psi$  визначають

всі ступені свободи схеми. Тому їх можна прийняти за незалежні змінні, інакше - змінні стану. Нехай ємності  $C$  та індуктивності  $L$  постійні. Оскільки  $Q = CU_c$ , а  $\Psi = Li_L$ , вважатимемо незалежними змінними стану напруги  $U$  на ємностях та струми індуктивностей  $i_L$ . Рівняння стану, складені на основі рівнянь Кірхгофа, мають вигляд:

$$C_K \frac{dU_{CK}}{dt} = \sum_{j=1}^K b_{kj} U_{cj} + \sum_{j=k+1}^n b_{kj} i_{Lj} + V_K(t), \quad (3.1)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = \sum_{i=k+1}^n b_{ij} i_{Lj} + \sum_{j=1}^K b_{ij} U_{cj} + V_n(t). \quad (3.2)$$

Даний вибір незалежних змінних  $U_c$  та  $i_L$  приводить диференціальні рівняння до нормальної форми Коші. Це дозволяє аналізувати як лінійні, так і нелінійні схеми в статичних та перехідних режимах на основі достатньо розроблених для рівнянь в нормальній формі Коші чисельних методів розв'язку. Методи чисельного інтегрування для аналізу динамічних властивостей об'єктів можуть застосовуватись безпосередньо до рівнянь змінних стану, сформованих для цілого об'єкту.

Точність методів аналізу із застосуванням диференціальних моделей в значній мірі залежить від адекватності моделей, насамперед від моделі електродугового проміжку [42]. При переході до нових схематичних конструкцій і технологічних рішень побудови пристроїв точність аналізу, як правило, знижується. Це пов'язане з появою невідповідності між математичною моделлю і реальним об'єктом. В цих випадках необхідно провести додаткове натурне моделювання, яке дозволяє здійснити відповідне коректування та уточнення моделей.

Виходячи з вище викладеного, можна зробити висновок, що для аналізу аномальних режимів роботи РЛ, які мають місце під час розгоряння, найприйнятнішим є метод із застосуванням диференційних математичних моделей елементів кола з подальшою комп'ютерною симуляцією [37]. Однак, не дивлячись на безперечні переваги розглянутого методу аналізу, у вітчизняній практиці він застосовується мало.

### 3.2. Структура математичної моделі високоінтенсивних джерел світла

Точність методу аналізу із застосуванням диференційних моделей в значній мірі визначається адекватністю моделей РЛ. Існуючі моделі ґрунтуються на розгляді електричної дуги як нелінійного, стаціонарного, пасивного, володіючого причинністю, двополюсника, в якому відбувається дисипація енергії з частковим її накопиченням [27]. У будь-якому складному процесі виділяються головні найхарактерніші параметри, так звані визначальні параметри [22]. Вони характеризують основні шляхи накопичення і втрати енергії, дають змогу пов'язати воєдино процеси, які відбуваються в газорозрядному проміжку, з параметрами зовнішнього кола [27, 49, 62, 72].

Класифікація існуючих моделей розрядних проміжків за визначальним параметром і способом отримання апроксимуючої рівності наведена в [20]. Згідно з нею до першої групи віднесені апроксимації, які отримані на основі рівняння теплового балансу позитивного стовпа розряду високого тиску. При цьому в апроксимуючому виразі визначальним параметром виступає теплова енергія, яка запасена в плазмі розряду. У [19] проведений аналіз такого роду апроксимацій. Він показав, що ці рівняння враховують інерційність плазми та її передісторію. Однак їх застосування для опису характеристик РЛ не може забезпечити задовільної точності. Це викликане насамперед тим, що при розгляді промислових дуг енергія, яка витрачається на випромінювання, є

незначною. У цей же час в розрядних джерелах світла вона перевищує втрати енергії всіх інших видів [84, 85]. З іншої сторони, запропоноване в [72] рівняння справедливе лише для стану плазми, який близький до повної термодинамічної рівноваги. В плазмі ж РЛ є значні градієнти температур і концентрацій частинок, переносу випромінювання. Тому плазма в РЛ може знаходитись в стані, який суттєво відрізняється від рівноважного. Порушення рівноваги особливо проявляється в перехідних електричних режимах, якщо напруга на лампі суттєво змінюється і відрізняється від усталеного значення. У [6] зроблені спроби врахувати специфіку РЛ. Для цього рівняння енергетичного балансу проінтегроване з врахуванням розрахункових і експериментальних залежностей основних коефіцієнтів - теплоємності, теплопровідності, тощо - від температури плазми. Результати обчислень для ДРЛ і ДНаТ показали задовільний збіг з експериментальними даними. Проте всі коефіцієнти, як розрахункові, так і експериментальні, взяті для режимів, що близькі до повної термодинамічної рівноваги. А це викличе значне збільшення похибки при аналізі нестационарних режимів, тим більше в МГЛ, де перехідні процеси значно складніші. Таким чином, з рівняння теплового балансу не вдається отримати на сьогодні задовільного диференційного рівняння для характеристики РЛ.

У другу групу об'єднані апроксимації, отримані на основі рівняння балансу заряджених частинок. В них за визначальний параметр взята середня концентрація електронів. На основі балансу заряджених частинок запропонована низка диференційних рівнянь, які апроксимують ВАХ РЛ [42, 95, 96, 97]. У своїй більшості ці моделі ґрунтуються на трьох постулатах, які висунув Френсіс:

- швидкість зростання концентрації електронів  $\frac{dn_e}{dt}$  пропорційна підведеній потужності

$$P_{\Lambda} = U_{\Lambda} i_{\Lambda}, \quad (3.3)$$

- швидкість зменшення концентрації електронів, тобто деіонізації, пропорційна концентрації електронів;
- опір розряду обернено пропорційний до концентрації електронів.

До недоліків цієї групи слід віднести:

- локальне визначення коефіцієнтів моделей;
- не здійснена перевірка в режимах з паузами струму, в імпульсних і несиметричних режимах.

До третьої групи відносяться моделі газового розряду, які будуються на основі декількох визначальних параметрів: концентрації електронів, збуджених і метастабільних атомів, середній температурі електронів та іонів [10, 16, 21, 49, 59]. Для концентрації частинок складаються рівняння балансу енергії. Вони, в загальному вигляді, записуються:

$$\frac{dn}{dt} = \sum_K a_K - \sum_S b_S, \quad (3.4)$$

де  $n$  - концентрація частинок,  $a_K$  - швидкості протікання процесів, які викликають утворення цих частинок,  $b_S$  - швидкості процесів, які приводять до зникнення згаданих частинок.

Рівняння балансу енергії для максвелівського розподілу частинок можна подати у вигляді:

$$\frac{dT}{dt} = \sum_K P_K - \sum_S P_S, \quad (3.5)$$



де  $P_K$  - потужність процесів, які забезпечують частинки енергією;  $P_S$  - потужність процесів, що розсіюють енергію частинок.

До цих рівнянь додається рівняння електропровідності:

$$J = en_e b_e E, \quad (3.6)$$

де  $J$  - густина струму,  $e$  - заряд електрона,  $b_e$  - рухливість електронів,  $E$  - напруженість електричного поля.

Інтегруючи вказані рівняння з врахуванням початкових та граничних умов по всьому обсягу дуги, можна отримати характеристики РЛ, включаючи її ВАХ. Однак рівняння не можна розв'язати в загальному вигляді. Навіть розв'язок їх шляхом чисельного інтегрування можливий лише при суттєвому спрощенні.

Пропоновані моделі стовпа розряду можуть забезпечити в майбутньому адекватний опис всіх основних процесів, які відбуваються в плазмі газового розряду. Однак на сьогодні їм притаманна низка недоліків:

- для отримання задовільної точності необхідно збільшити кількість і ускладнити диференціальні рівняння;
- для визначення коефіцієнтів моделей необхідно знати цілу низку атомних констант, багато з яких визначені на сьогодні лише приблизно;
- відсутній достатньо точний математичний опис процесів виходу випромінювання зі стовпа розряду;
- прийнятий максвелівський розподіл електронів за швидкостями в стаціонарних режимах загалом не виконується, а розрахунок за рівнянням Больцмана в цих режимах є утрудненим;
- чисельне інтегрування рівнянь по всьому об'єму плазми газового розряду досить трудомістке.

Все це приводить до того, що на сьогодні математичні моделі стовпа розряду придатні лише для визначення основних якісних закономірностей, які відбуваються в плазмі газового розряду. Щодо впливу різних факторів на характеристики розряду, то внаслідок високої складності і недостатньої точності вони непридатні для інженерних розрахунків кіл, які містять РЛ.

Таким чином, із всіх наявних моделей електричної дуги найприйнятнішими для МГЛ є моделі другої групи [62]. Серед них необхідно виділити модель, подану в [98]. Аналіз електричних характеристик РЛ вимагає врахування як електронів, так і іонів. Проте для спрощення розглядатимемо лише еквівалентну густину електронів. Також вважатимемо, що рухливість електронів постійна і не залежить від напруги на лампі. Швидкість зміни густини електронів в РЛ виражається у вигляді різниці швидкостей утворення і зникнення електронів за одиницю часу, які пропорційні до таких величин, а саме:

а) швидкість утворення:

- добутку напруги на лампі  $U_{\Lambda}$  та її струму  $i_{\Lambda}$ , тобто потужності лампи;
- квадрату струму лампи  $i_{\Lambda}^2$ ;

б) швидкість зникнення:

- дифузії електронів  $\beta_e n$ ;
- рекомбінації електронів та іонів  $\gamma_e n^2$

Тоді рівняння балансу густини електронів у часі набуває вигляду:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_e U_{\Lambda} i_{\Lambda} - \beta_e n - \gamma_e n^2, \quad (3.7)$$

або

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_e i^2 - \beta_e n - \gamma_e n^2. \quad (3.8)$$

Електрони зникають внаслідок дифузії під тиском пари всередині розрядного проміжку або завдяки рекомбінації. Тому з вище наведених формул можна отримати чотири спрощені вирази:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_e U_{\Lambda} i_{\Lambda} - \beta_e n, \quad (3.9)$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_e U_{\Lambda} i_{\Lambda} - \gamma_e n^2, \quad (3.10)$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_e i_{\Lambda}^2 - \beta_e n, \quad (3.11)$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_e i_{\Lambda}^2 - \gamma_e n^2. \quad (3.12)$$

Беручи до уваги, що миттєвий еквівалентний опір ДС дорівнює

$$r = \frac{U_{\Lambda}}{i_{\Lambda}} = \frac{F}{n}, \quad (3.13)$$

то можна визначити струм РЛ. Тут  $F$  - коефіцієнт пропорційності,  $n$  - густина електронів. Проте отримані рівняння характеризуються складністю застосування для аналізу кола ввімкнення. Це пояснюється необхідністю мати відомості про миттєву напругу лампи для кожного інтервалу часу. З метою спрощення теоретичного аналізу кіл з РЛ доцільно виразити електричні характеристики РЛ через еквівалентну провідність

$$G_{\Lambda} = \frac{i_{\Lambda}}{U_{\Lambda}} = F^{-1} n. \quad (3.14)$$

Тоді рівняння набуває вигляду:

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = AU_{\Lambda}i_{\Lambda} - BG_{\Lambda} - CG_{\Lambda}^2, \quad (3.15)$$

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = AU_{\Lambda}i_{\Lambda} - BG_{\Lambda}, \quad (3.16)$$

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = AU_{\Lambda}i_{\Lambda} - CG_{\Lambda}^2, \quad (3.17)$$

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = Ai_{\Lambda} - BG_{\Lambda} - CG_{\Lambda}^2, \quad (3.18)$$

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = Ai_{\Lambda} - BG_{\Lambda}, \quad (3.19)$$

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = Ai_{\Lambda} - CG_{\Lambda}^2. \quad (3.20)$$

Якщо у вищенаведених формулах відомі коефіцієнти А, В, С, то миттєву еквівалентну провідність можна виразити для кожного інтервалу часу через еквівалентну провідність і напругу на лампі за попередній інтервал часу. Коефіцієнти А, В, С визначаються з осцилограм  $U_{\Lambda}(t), i_{\Lambda}(t), G_{\Lambda}(t)$  в точках  $t_1, t_2, t_3$  (рис. 3.1). У вказаних точках

$$\frac{dU_{\Lambda}}{dt} = 0, \quad \frac{di_{\Lambda}}{dt} = 0, \quad \frac{dG_{\Lambda}}{dt} = 0. \quad (3.21)$$

З експериментально знятих осцилограм були визначені коефіцієнти А, В, С для ламп типів ДРЛ - 400, ДНаТ - 400. За цими коефіцієнтами обчислені електричні параметри РЛ, які працюють в комплексі з лінійним індуктивним баластом на промисловій частоті і середньоквадратичним значенням напруги, яке дорівнює 220 В [37]. Грунтуючись на аналізі наведених даних, отримано, що найкращий збіг характеристик РЛВТ забезпечує рівняння (3.20). Згідно з ним швидкість збільшення концентрації електронів пропорційна до квадрату струму лампи, квадрату середньої концентрації електронів. Отримані

результати узгоджуються з даними, наведеними в [98]. В цей же час швидкість деонізації пропорційна до квадрату середньої концентрації електронів. Це справедливо для

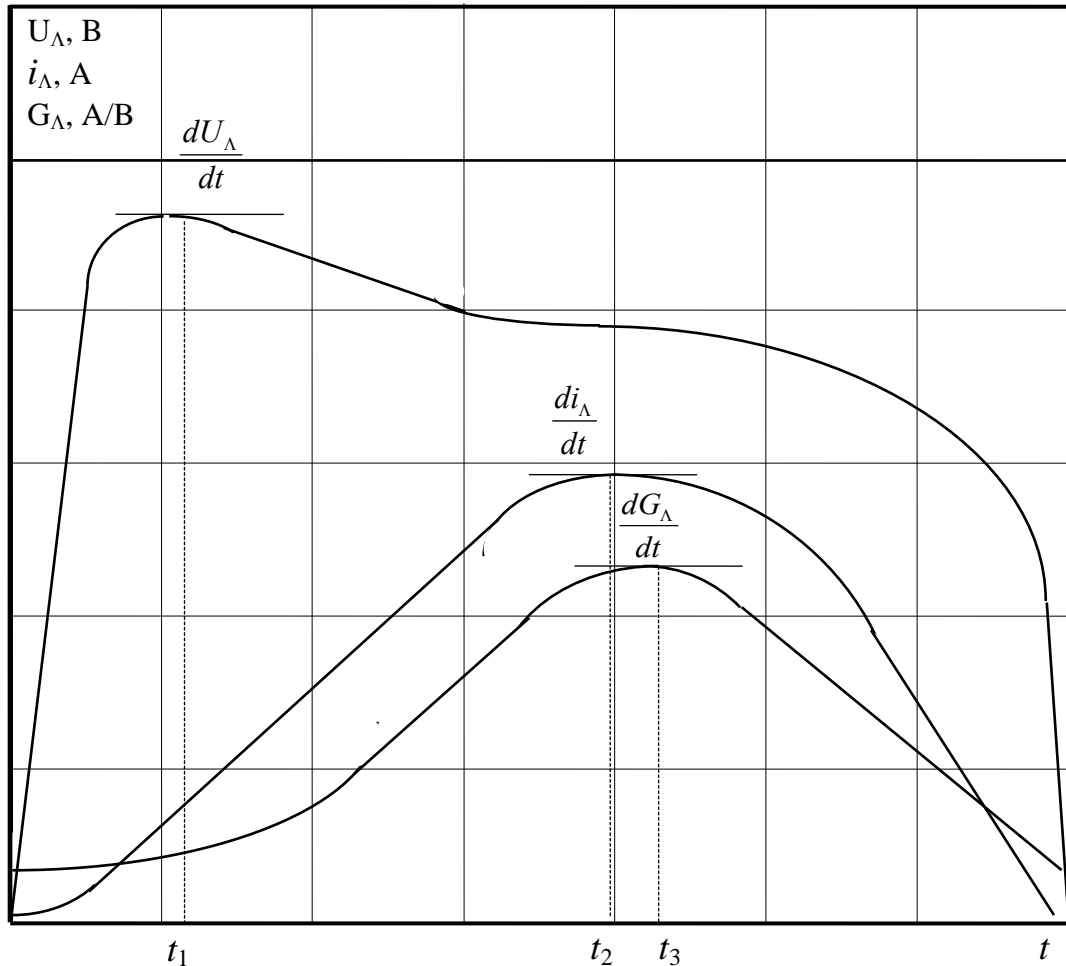


Рис. 3.1. Форма кривих напруги, струму та еквівалентної провідності розрядної лампи за півперіод змінного струму.

об'ємної рекомбінації, яка відіграє суттєву роль в джерелах світла високого тиску. Тому вказане рівняння можна прийняти за базове для моделі РЛВТ. На практиці часто доводиться проводити аналіз роботи РЛ з напругою горіння, яка

відрізняється від номінальної, тобто в аномальних режимах. Для зручності користування рівняння (3.20) слід перетворити. З цією метою підставляємо

$$i_{\Lambda} = U_{\Lambda \text{НОМ}} G_{\Lambda}, \tag{3.22}$$

Тут, індекс « ном » означає параметри лампи з номінальною напругою горіння. Індексом  $dG_{\Lambda}^*$  позначатимемо параметри лампи з напругою горіння, що відрізняється від номінальної. Оскільки  $G_{\Lambda}$  і  $U_{\Lambda}$  є періодичними функціями, тому проінтегрувавши (3.20), отримаємо:

$$\int_{G_{\Lambda}} \frac{dG_{\Lambda}}{G_{\Lambda}} = \int_{t_1}^{t_2} (U_{\Lambda \text{НОМ}}^2 - C) dt. \tag{3.23}$$

Якщо півперіод функції дорівнює  $\frac{T}{2}$ , то можна проінтегрувати обидві частини формули (3.23) від  $t = 0$  до  $t = \frac{T}{2}$ . Значення еквівалентної провідності для  $t = \frac{T}{2}$  повинні дорівнювати нулю. Тому ліва частина рівняння (3.23) дорівнюватиме нулю. З правої частини (3.23) випливає, що



Рис. 3.1. Форма кривих напруги  $U_{\Lambda \text{НОМ}}$  та еквівалентної провідності розрядної лампи за півперіод змінного струму.  $\int_{t_1}^{t_2} \frac{C T}{4} dt$  (3.24)

де  $U_{\Lambda \text{НОМ}}$  - середня напруга на лампі.

Звідси отримуємо

$$U_{\text{ЛНОМ}} = \sqrt{\frac{C}{A}} = \sqrt{\frac{T}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\text{ЛНОМ}} dt}. \quad (3.25)$$

Значення сталих визначаються, виходячи з наступного:

- миттєва напруга ламп з напругою горіння, що відрізняється від номінальної, дорівнює коефіцієнту  $K$ , помноженому на напругу, яку мала б лампа з номінальною напругою в будь-який момент часу

$$U_{\Lambda^*} = K U_{\text{ЛНОМ}}. \quad (3.26)$$

- миттєвий струм лампи з напругою, яка відрізняється від номінальної, дорівнює аналогічно

$$i_{\Lambda^*} = K^{-1} i_{\text{ЛНОМ}}. \quad (3.27)$$

З вище наведеного випливає, що потужність лампи визначається

$$P_{\Lambda^*} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\Lambda^*} i_{\Lambda^*} dt. \quad (3.28)$$

Середня напруга на лампі дорівнюватиме

$$U_{\Lambda^*} = \sqrt{\frac{T}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} (K U_{\text{ЛНОМ}})^2 dt} = K U_{\text{ЛНОМ}}. \quad (3.29)$$

Отже, коефіцієнт  $K$  дорівнює

$$K = \frac{U_{\Lambda^*}}{U_{\Lambda\text{НОМ}}}. \quad (3.30)$$

З іншого боку, миттєва провідність ламп з різною напругою записується:

$$G_{\Lambda^*} = \frac{G_{\Lambda\text{НОМ}}}{K^2}. \quad (3.31)$$

Тоді з рівнянь (3.20) і (3.31) математична модель лампи набуває вигляду

$$\frac{dG_{\Lambda^*}}{dt} = A_* i_{\Lambda^*}^2 - KC_* G_{\Lambda^*}^2. \quad (3.32)$$

Звідси

$$A_* = A_{\text{НОМ}}, \quad (3.33)$$

$$C_* = A_{\text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}^2. \quad (3.34)$$

Узагальнена модель ДС приймає вигляд

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = A(i_{\Lambda}^2 - U_{\Lambda}^2 G_{\Lambda}^2), \quad (3.35)$$

де  $i_{\Lambda}$ ,  $G_{\Lambda}$  - миттєві струм і провідність лампи,  $U_{\Lambda}$  - середня напруга на лампі, тобто напруга горіння розряду,  $A$  - коефіцієнт моделі.

Можна прийняти, що коефіцієнт  $A$  залежить від значення і форми напруги на лампі, від форми і габаритів розрядного проміжку, від тиску парів і їх складу, тощо. У [81] наведений детальний аналіз (3.35) для кіл з ДРЛ. Автор



запропонував методику визначення коефіцієнта  $A$  і навів розрахункові та експериментальні осцилограми. Вони підтверджують задовільний збіг моделі і реальної РЛ. Застосування моделі (3.35) для аналізу імпульсних схем живлення РЛ характеризується збільшенням похибки до 10 ... 15%. Це означає, що описана математична модель недостатньо точно описує процеси, які відбуваються в РЛ. Збільшення похибки пов'язане з інерційністю коефіцієнта  $A$ . Це пояснюється тим, що швидкість зміни зовнішніх збурень перевищує час релаксації для процесів у плазмі РЛ [60, 81]. Посилання на необхідність застосування математичної моделі другого порядку міститься і в [53], де досліджувались імпульсні напівпровідникові ПРА для ламп ДРЛ. За другий визначальний параметр в [49] запропоновано використовувати середню рухливість електронів  $b_{\text{ср}}$ . Тоді:

$$G_{\Lambda} = \frac{eb_{\text{ср}}n_{\text{ср}}}{l} S_{\Lambda}, \quad (3.36)$$

де  $l$  і  $S_{\Lambda}$  - довжина і поперечний переріз стовпа розряду.

Введемо безрозмірну величину

$$\beta = \frac{b_{\text{ср}}}{b_0}, \quad (3.37)$$

де  $b_0$  - середня рухливість електронів для усталеного режиму.

Тоді,

$$G_{\Lambda} = \beta g = \frac{i_{\Lambda}}{U_{\Lambda}}. \quad (3.38)$$

Система диференціальних рівнянь, які описують ВАХ РЛ, має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dg}{dt} = g^2 M_1(U_\Lambda) \\ \frac{d\beta}{dt} = M_2(U_\Lambda)(\beta_{уст} - \beta) \end{cases} \quad (3.39)$$

Для апроксимації нелінійних коефіцієнтів запропоновані вирази [49]:

$$\begin{aligned} M_1(U_\Lambda) &= \frac{AU_\Lambda^2(\overline{U_\Lambda} - 1)}{0,4 + 0,6\overline{U_\Lambda}} \\ M_2(U_\Lambda) &= \left(1,5 + 3(\overline{U_\Lambda})^{1,5}\right) \cdot 10^4 \\ \beta_{уст} &= 0,4 + 0,6\overline{U_\Lambda} \end{aligned} \quad (3.40)$$

де  $\overline{U_\Lambda} = \frac{U_\Lambda}{U_0}$  - зведена напруга на лампі,  $U_0$  - усталена напруга на лампі для постійного струму,  $\beta_{уст}$  - усталене значення при  $U_\Lambda = \text{const}$ .

Запропонована математична модель (3.39) є значно складнішою в порівнянні з (3.35) і вимагає крім того низки додаткових експериментальних досліджень. Тому є сенс визначити межі використання кожної з них. У [81] відзначається, що інерційність коефіцієнта А спостерігається для тривалостей фронтів імпульсу  $\tau_\Phi = 5$  мкс. Отримані дані свідчать про те, що час релаксації становить 5 ... 10 мкс [73]. Після аналізу експериментальних характеристик РЛ нами отримані аналогічні результати.

Отже, модель, що описується системою рівнянь (3.39), доцільно застосувати для аналізу схем живлення РЛ, в яких тривалість фронту імпульсу менша, ніж 10 мкс. У всіх інших випадках, в тому числі і при живленні від

джерела струму синусоїдної форми частоти 50 Гц, математична модель (3.35) забезпечує достатню точність розрахунків - похибка не перевищує 3 ... 4%.

Внаслідок того, що аналізовані схеми працюють на частоті 50 Гц, в подальшому використовується математична модель, що описується (3.35). Перш ніж здійснити оптимізаційні обчислення згідно з моделлю, необхідно визначити невідомі коефіцієнти і залежності.

### 3.3. Установка для дослідження характеристик високоінтенсивних джерел світла

У більшості практичних випадків застосування електричної дуги має місце нерівноважна низькотемпературна плазма. Причиною її виникнення є дифузія тепла, некомпенсований вихід випромінювання, тощо. Комплекс вимог, необхідних для рівноваги плазми дуги, виконується лише в поодиноких випадках: піч Кінга, ударна труба, еталон рівноважного випромінювання на базі капілярної сильнострумової дуги. Не випадково дві останні установки є імпульсними пристроями. Лише таким чином вдається обійти одну з важливих причин нерівноважності плазми - передачу енергії на стінки посудини [60]. Якщо характерний час життя плазми менший, ніж час передачі енергії стінкам, то можна знехтувати впливом останніх і досліджувати так званий квазістаціонарний стан плазми.

Збурювальним зовнішнім фактором найзручніше використовувати імпульс струму з тривалістю фронтів меншою, ніж час іонізаційної релаксації плазми [75]. Виходячи з вище викладеного, дослідження проведені на установці, яка реалізує так званий інтервальний метод вивчення параметрів електричної дуги [39, 48]. Суть методу полягає в наступному [50]. Створюється початковий режим роботи лампи, який характеризується певним набором заданих параметрів  $I_0$ ,  $U_0$ ,  $P_0$ , ... та формується кінцевий режим, що має інший

набір параметрів  $I_2, U_2, P_2, \dots$ . При цьому окремі параметри можуть дорівнювати початковим параметрам, приміром  $U_2 = U_0$ . Інші параметри отримують значення, які відрізняються від початкових в строго визначене число разів, наприклад в  $\sqrt{e}, e, e^2$ , тощо. Між початковим і кінцевими режимами лампи в інтервалі  $0 - t_1$  створюється третій проміжний режим з параметрами  $I_1, U_1, P_1, \dots$ , який є досліджуваним. Змінюючи тривалість інтервалу  $0 - t_1$ , можна досягти переходу системи від досліджуваного стану до кінцевого без перехідного процесу. Слід відзначити, що інтервальний метод придатний для дослідження інерційних параметрів розряду, які мають виражені часові залежності.

В інтервалі  $0 \leq t \leq t_1$  провідність лампи  $G_\Lambda$  змінюється за експоненційним законом

$$G_\Lambda = G_0 \exp \left( \frac{t}{\tau_\Lambda \left( \frac{U_1}{U_0} - 1 \right)} \right), \quad (3.41)$$

де  $\tau_\Lambda$  - постійна часу діонізації лампи.

В момент  $t = t_1$  напруга на лампі дорівнює

$$U_\Lambda(t)|_{t=t_1} = \frac{I_2(1 - K_1)}{G_0 \exp \left( \frac{t_1}{\tau_\Lambda \left( \frac{U_1}{U_0} - 1 \right)} \right) - I_2 \frac{K_1}{U_0}}, \quad (3.42)$$

де  $K_1$  - безрозмірний коефіцієнт, який враховує зміну рухливості електронів при відхиленні напруги від усталеного значення.

Аналіз останнього виразу показує, що для  $I_0 \cdot I_2^{-1} = e$  і  $t = \tau_\Lambda (1 - U_{\Lambda*})$  напруга на лампі встановлюється без перехідного процесу, тобто  $U_\Lambda(t) = U_0$ . Тут  $U_{\Lambda*} = U_\Lambda U_0^{-1}$ . Для  $t_1 > \tau_\Lambda (1 - U_{\Lambda*})$ , або  $t_1 < \tau_\Lambda (1 - U_{\Lambda*})$  виникає характерний перехідний процес (рис. 3.2, 3.3).

Електрична провідність розрядного проміжку дорівнює

$$\frac{dG_\Lambda}{dt} = M_1(U_\Lambda)G_0, \quad (3.43)$$

де  $M_1(U_\Lambda)$  - нелінійна функція, яка визначає швидкість зміни електричної провідності плазми.

На установці для дослідження характеристик ДС (рис. 3.4) постійний струм формується джерелом живлення ДЖ1 і може регулюватися зміною опору струмообмежувального резистора R. Для динамічної стабілізації струму послідовно з резистором R ввімкнений дросель, який характеризується високим коефіцієнтом самоіндукції ( $L > 10$  Гн) і низькою міжвитковою ємністю. Модуляція постійного струму здійснюється електронними ключами ЕК1 та ЕК2. Амплітуда струму ключів регулюється зміною напруги джерела живлення ДЖ1. Генератори імпульсів використовуються для періодичної комутації ключів за заданою програмою.

Установка характеризується такими параметрами:

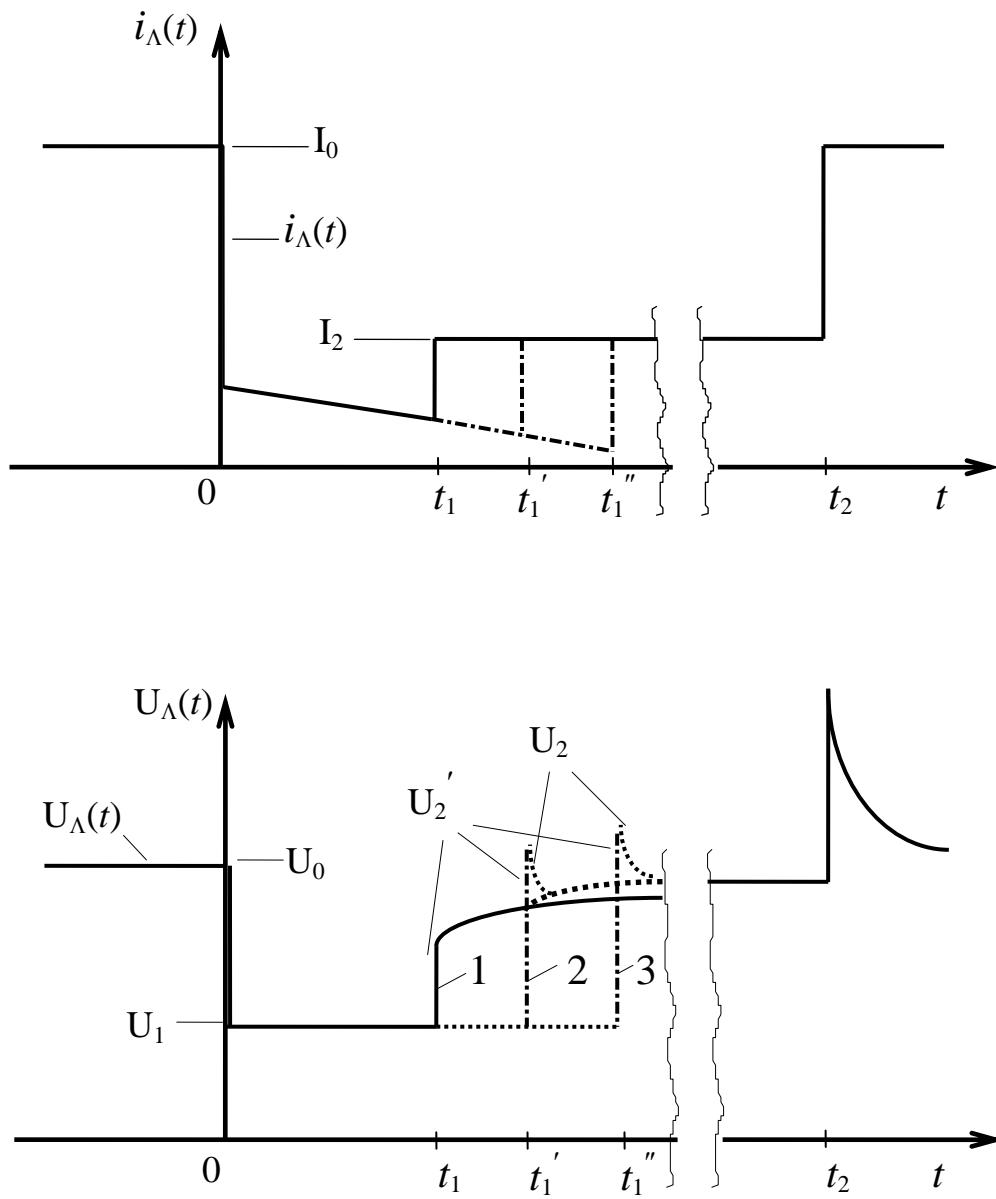


Рис. 3.2. Форма напруги на МГЛ при складній формі струму

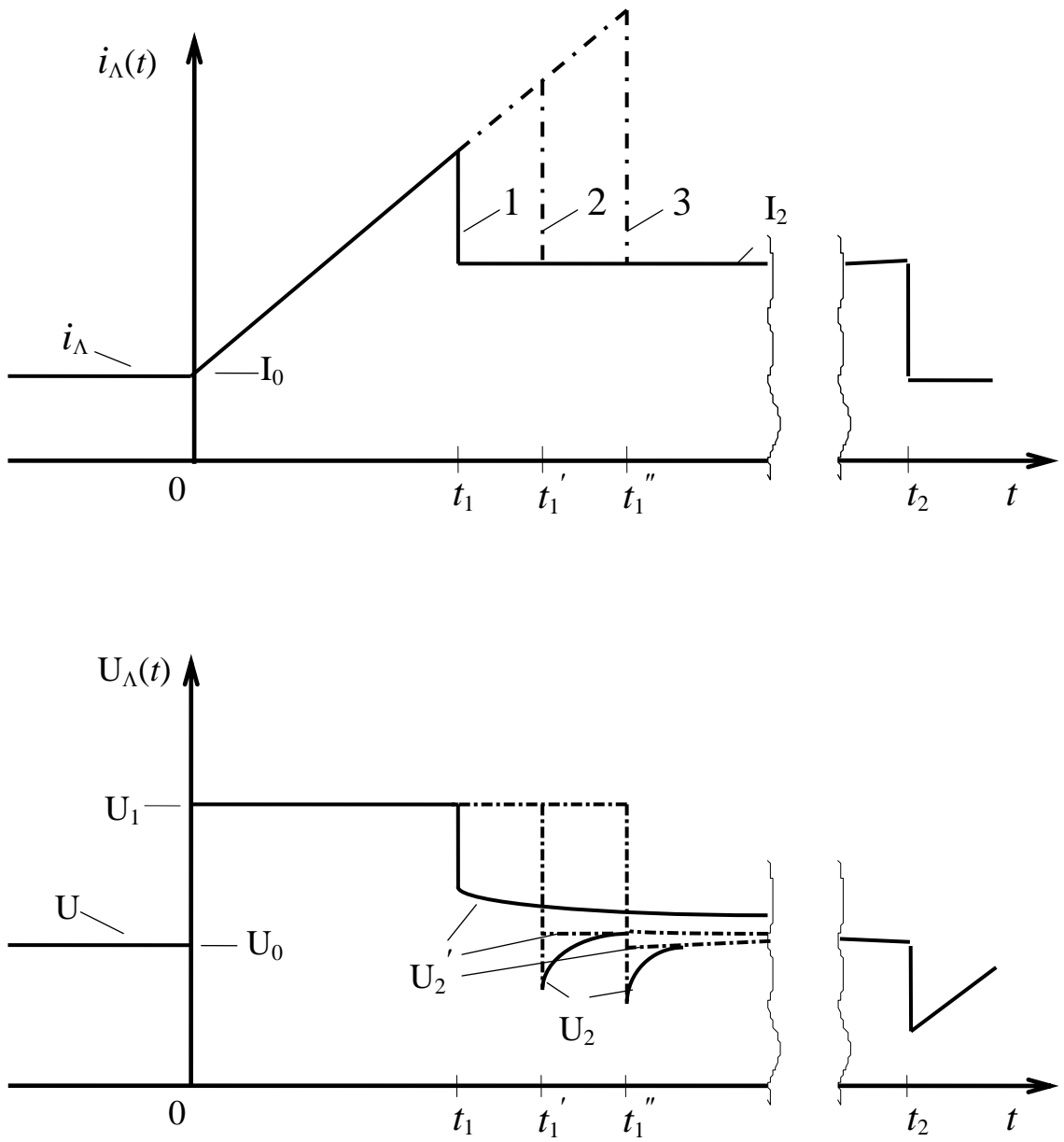


Рис. 3.3. Форма напруги на МГЛ при складній формі струму

- межі регулювання струму навантаження, А	0,05 ... 1,1
- глибина модуляції струму, %	0 ... 100
- тривалість фронтів імпульсу струму, мкс	0,2 ... 100
- тривалість імпульсів струму, мкс	1 ... 5·10 <sup>6</sup>
- шпаруватість	1 ... 5000

На установці передбачене проведення таких досліджень.

1. Дослідження імпульсних характеристик РЛ низького і високого тисків. Потужність досліджуваних ДС залежить від потужності ДЖ1 і допустимої потужності розсіювання ключів. Принцип роботи установки для визначення характеристик РЛ інтервальним методом такий. У вихідному стані через РЛ протікає постійний струм  $I_0$ , який дорівнює номінальному струму лампи  $I_{ном}$  (рис. 3.5а). Протягом 15 ... 20 хв, до усталення всіх параметрів РЛ, цей струм регулюється зміною вихідної напруги джерела живлення ДЖ1 і резистором R. При цьому обидва ключі закриті. При подачі імпульсу керування ключ відкривається і частина струму розгалужуватиметься у вітку ключа. Після закриття ключа через РЛ знову протікатиме струм  $I_0$ . Якщо тривалості імпульсів керування неоднакові, то формується імпульс струму РЛ складної форми (рис. 3.5 б, в, г). Спостереження за процесами, що відбуваються під дією збурювальних імпульсів, здійснюється за допомогою двопробовим осцилографом.

2. Дослідження явища пробією РЛВТ. У даному випадку використовується лише один ключ, який у вихідному стані повністю відкритий. Струм  $I_0$  протікає по колу ключа. Коли ключ закривається, коло, що містить індуктивність, розімкнеться. Струм у ній зменшиться від початкового значення

$$I_0 = \frac{U_{ДЖ1}}{R} \quad (3.44)$$



до нового усталеного значення

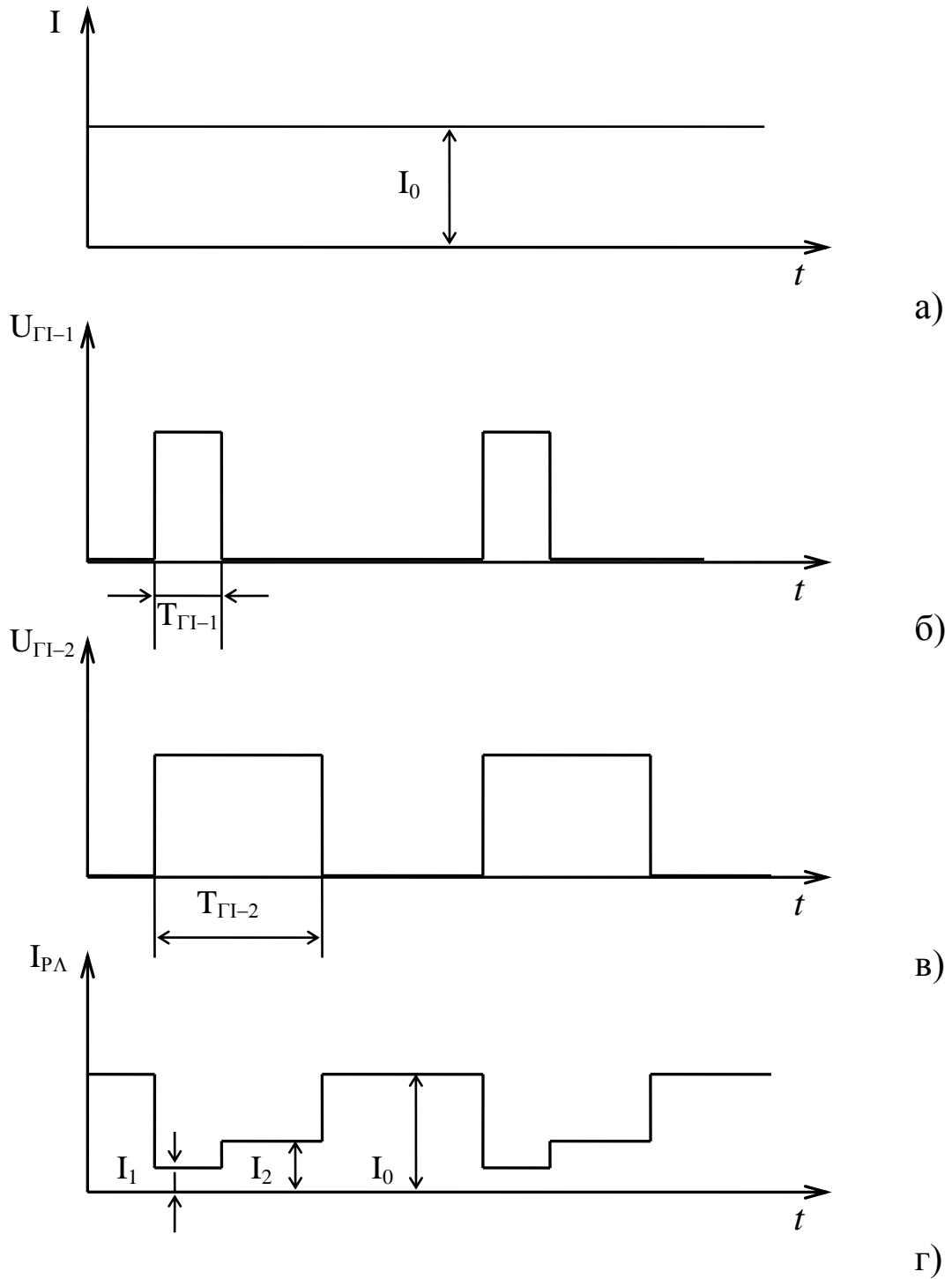


Рис. 3.5. Часові діаграми роботи схеми рис. 3.4:

- а) струм РЛ при закритих ключах;
- б) вихідний сигнал генератора імпульсів ГІ-1;
- в) вихідний сигнал генератора імпульсів ГІ-2;
- г) струм РЛ при частково відкритих ключах.

$$I' = 0 . \quad (3.45)$$

При цьому виникає вільний струм з початковим значенням

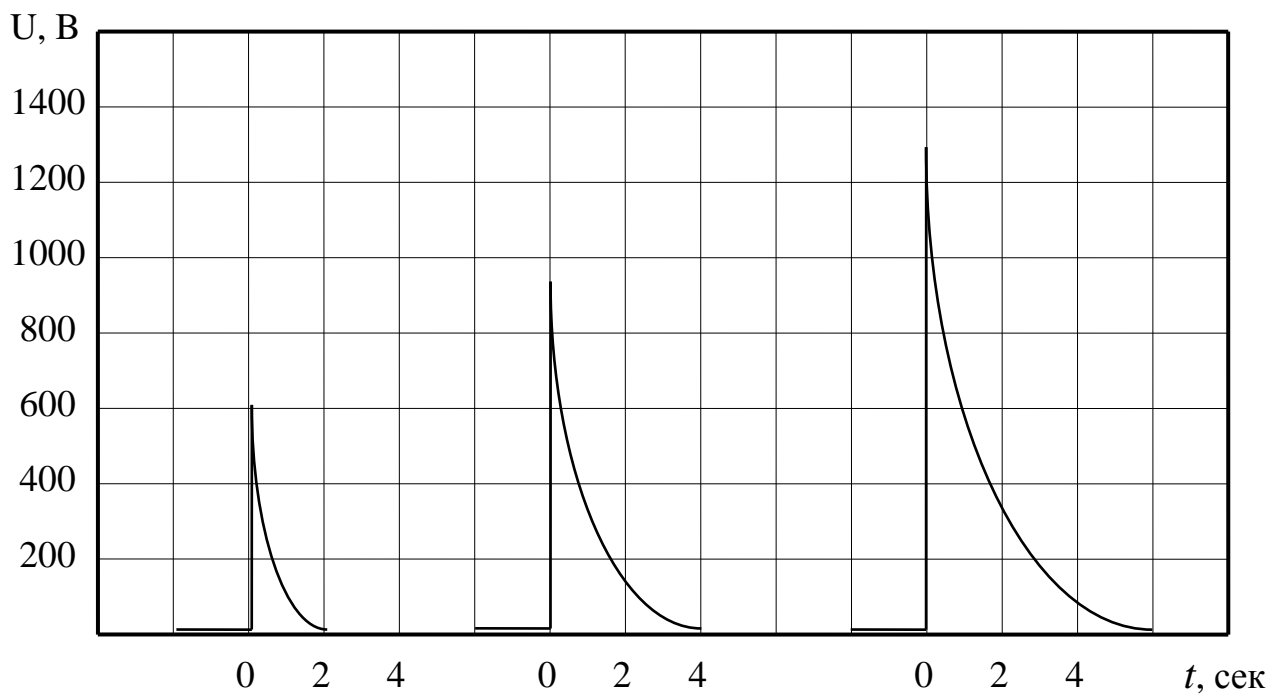
$$I'' = I_0 - I' . \quad (3.46)$$

Опір кола одночасно зростає до безмежності. Згідно з (3.45) і (3.46) напруга на РЛ повинна досягти в момент розмикання найбільшого значення. При подачі на РЛ напруги, яка перевищує напругу пробою, відбувається пробій лампи. Внаслідок цього опір кола зменшується. За допомогою стабілітрона VD1 і резистора R можна сформувати високовольтні імпульси потрібних амплітуди і тривалості (рис. 3.6). Генератор імпульсів керування забезпечує частоту імпульсів в діапазоні 1 Гц ... 50 КГц, які можна синхронізувати з промисловою частотою.

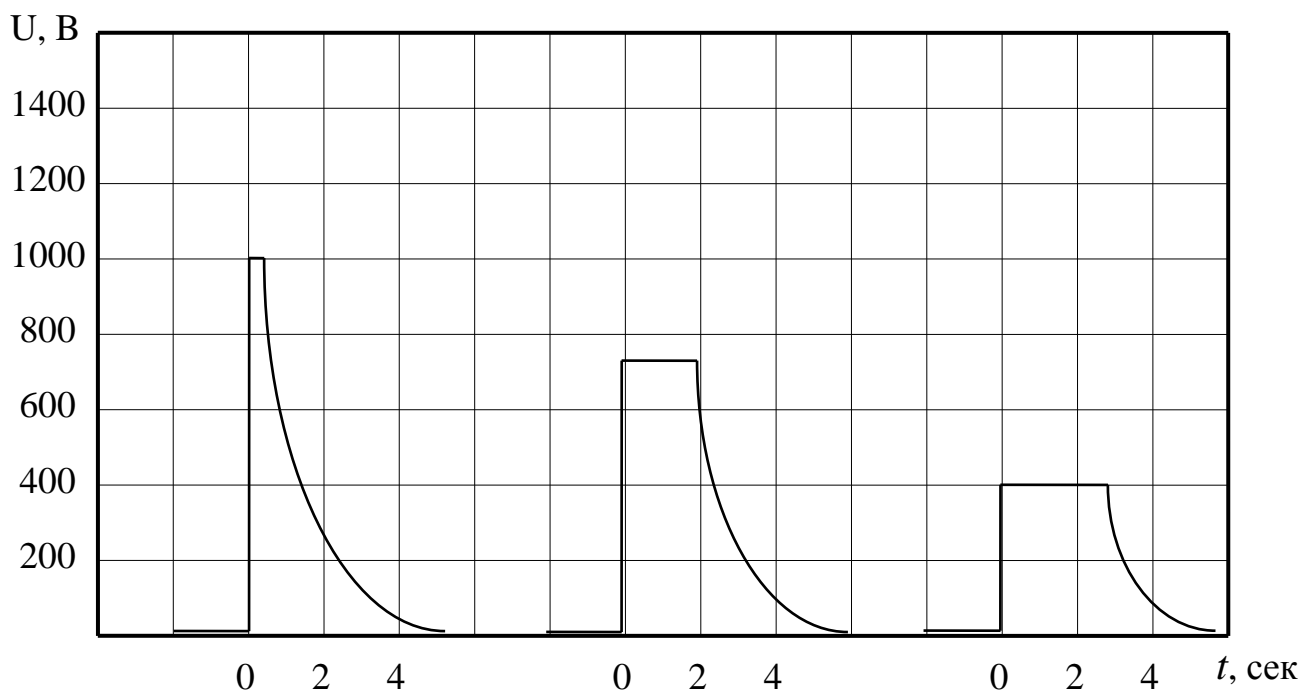
3. Дослідження характеристик РЛ на підвищених частотах. При цьому використовується один з електронних ключів, за допомогою яких формуються імпульси синусоїдної та прямокутної форм частоти 1 Гц ... 50 КГц. Установка дає змогу проводити дослідження режимів РЛ різних типів.

#### 3.4. Експериментальні імпульсні характеристики високоінтенсивних джерел світла.

Константи та функції, які входять в диференційні моделі РЛ, навіть для однакової індуктивності баластного дроселя залежать від напруги живлення і типу РЛ. Можна передбачити, що вони залежать від форми і габаритів пальника, тиску парів, домішок, тощо. Тому проведення аналізу з допомогою диференційної математичної моделі вимагає точних знань про те, як змінюються сталі та функції в залежності від цих факторів.



а)



б)

Рис. 3.6. Форма високовольтних імпульсів у схемі рис. 3.4:

а) без обмеження амплітуди;

б) з обмеженням амплітуди.

Порівнюючи отримані на експериментальній установці осцилограми струму МГЛ і напруги на ній (рис. 3.7) з аналогічними осцилограмами, наведеними в [49, 81] для ЛЛ і ДРЛ, слід відзначити такі особливості:

- для ЛЛ справджується нерівність  $\frac{U_m}{U_0} > \frac{I_0}{I_1}$ , що пояснюється зміною рухливості електронів  $b_e$  ;
- для ДРЛ має місце рівність  $\frac{U_m}{U_0} = \frac{I_0}{I_1}$ , що дозволило в [81] констатувати про постійність рухливості електронів. Однак це справедливо лише для тривалості фронту імпульсу  $\tau > 10$  мкс;
- для МГЛ, як видно з рис. 3.8 - рис. 3.10,

$$\text{при} \quad \frac{I_0}{I_1} < 2 \quad \frac{U_m}{U_0} < \frac{I_0}{I_1}, \quad (3.47)$$

$$\text{при} \quad \frac{I_0}{I_1} = 2 \quad \frac{U_m}{U_0} = \frac{I_0}{I_1}, \quad (3.48)$$

$$\text{при} \quad \frac{I_0}{I_1} > 2 \quad \frac{U_m}{U_0} > \frac{I_0}{I_1}. \quad (3.49)$$

Звідси випливає, що в МГЛ, на відміну від ДРЛ, провідність лампи залежить від рухливості електронів. Однак вона не настільки сильна, як у ЛЛ. Тому початково впливом рухливості електронів на провідність МГЛ можна знехтувати.

Аналіз отриманих імпульсних характеристик МГЛ дозволяє підтвердити справедливість деяких висновків, поданих в [49, 81] для ЛЛ і ДРЛ, стосовно МГЛ:

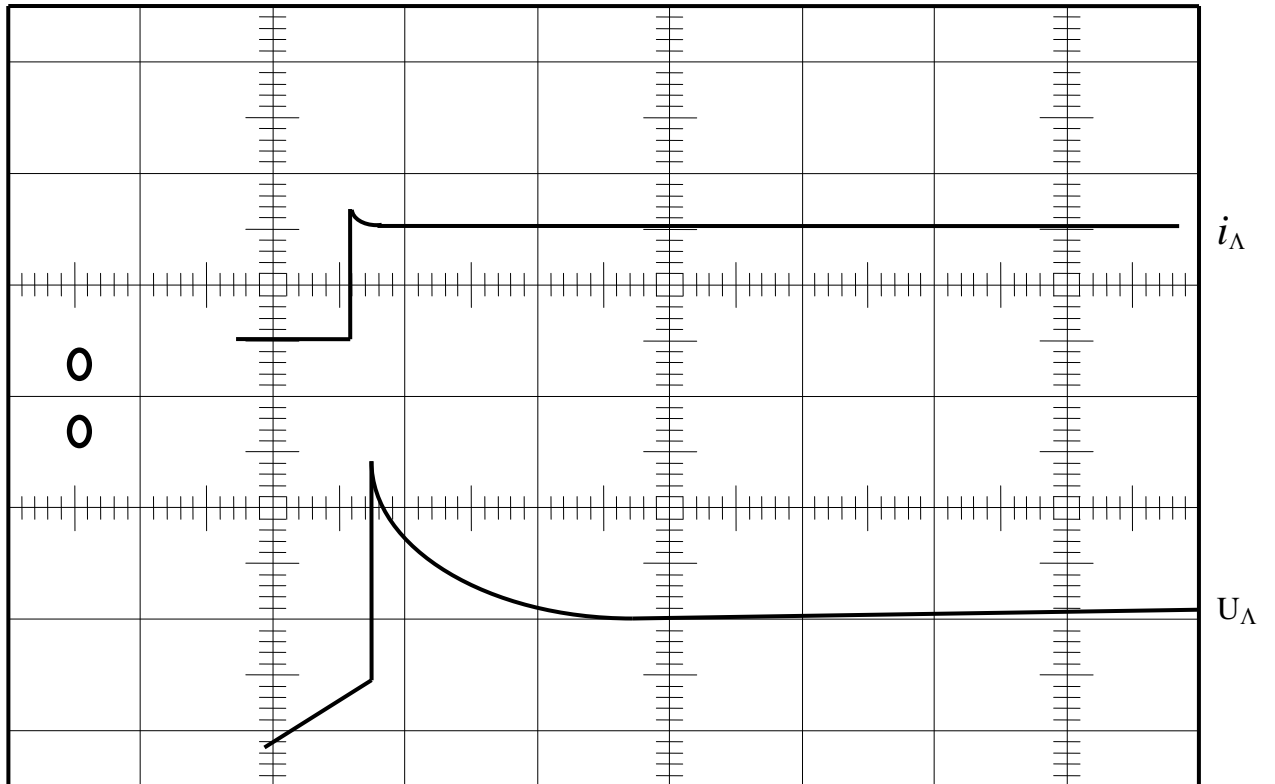


Рис. 3.7. Обвідні струму та напруги на МГЛ.

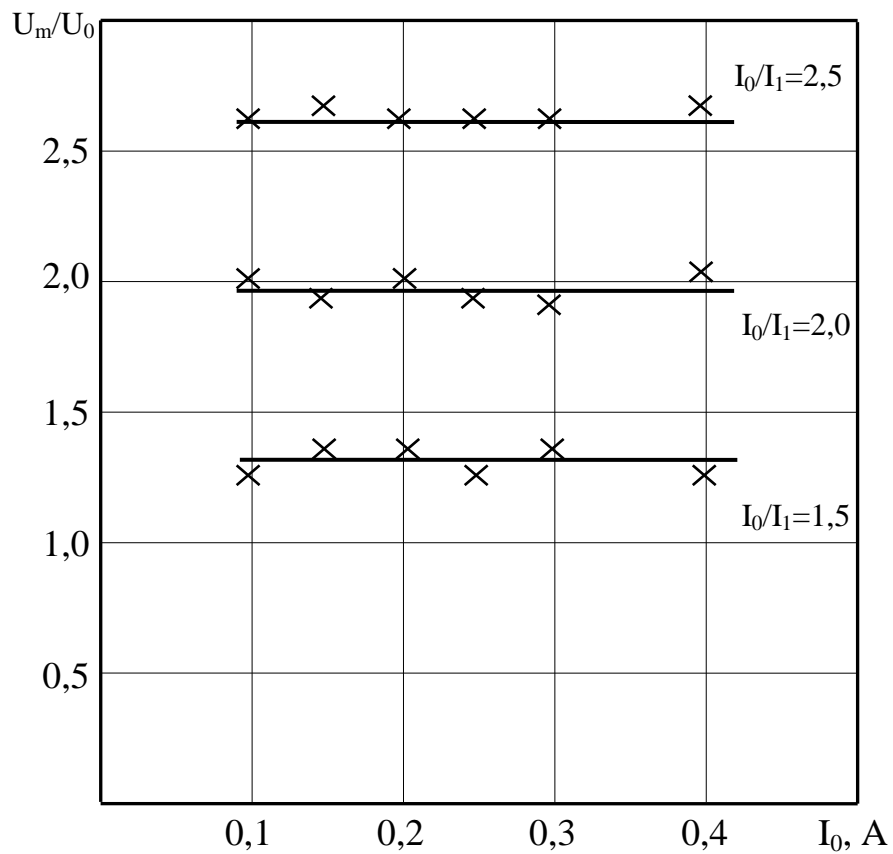


Рис. 3.8. Залежність амплітуди імпульсу перенапруги від початкового струму для МГЛ.

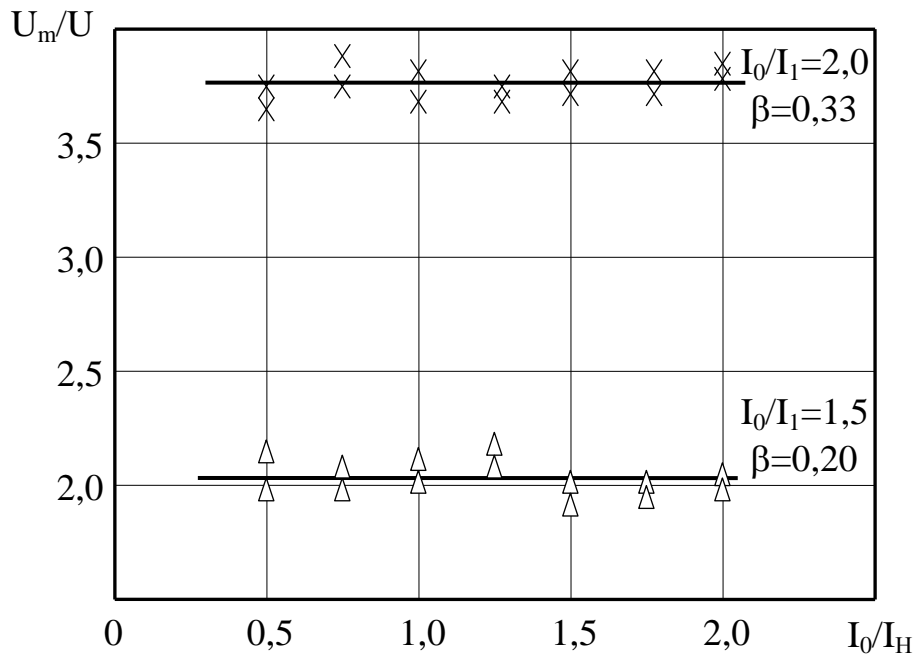


Рис. 3.9. Залежність амплітуди імпульсу перенапруги від відносного значення початкового струму для ЛЛ.

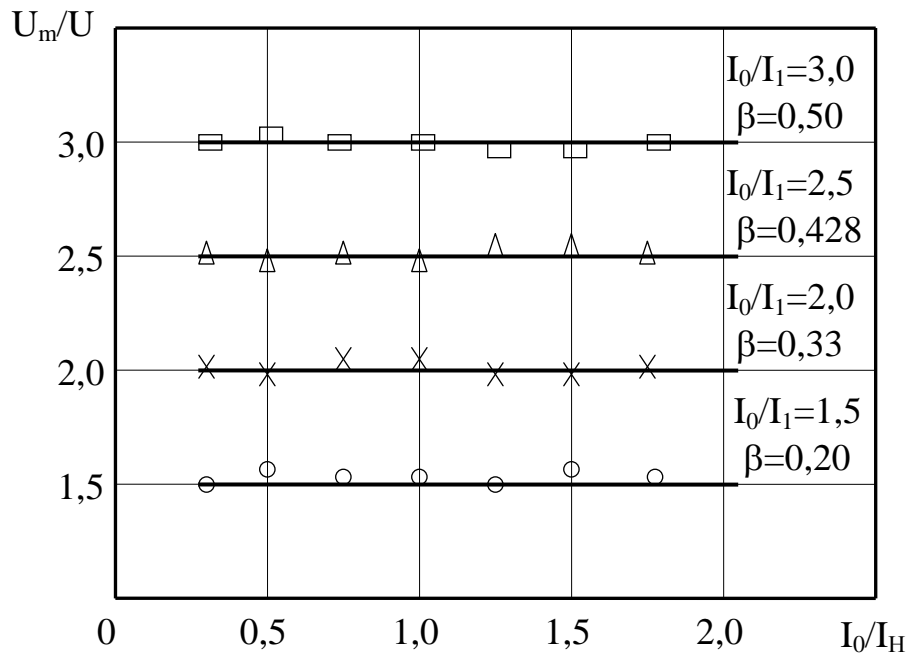


Рис. 3.10. Залежність амплітуди імпульсу перенапруги від відносного значення початкового струму для ДРЛ.

1. Імпульс перенапруги  $U_m$  не залежить від значень струмів  $I_0$  та  $I_1$ , а залежить лише від їх відношення  $\frac{I_0}{I_1}$ .
2. Амплітуда імпульсу перенапруги  $U_m$  залежить від постійної часу наростання струму  $\tau_\phi$ . Найбільша перенапруга спостерігається для найменшої досягнутої на установці постійної часу  $\tau_\phi = 0,2$  мкс.
3. При збільшенні амплітуди імпульсу перенапруги скорочується його тривалість на рівні 0,2 ... 0,7 від амплітуди, яка також залежить від типу лампи.
4. Імпульс перенапруги зростає із збільшенням тривалості імпульсу струму лише до певних меж (рис. 3.11).

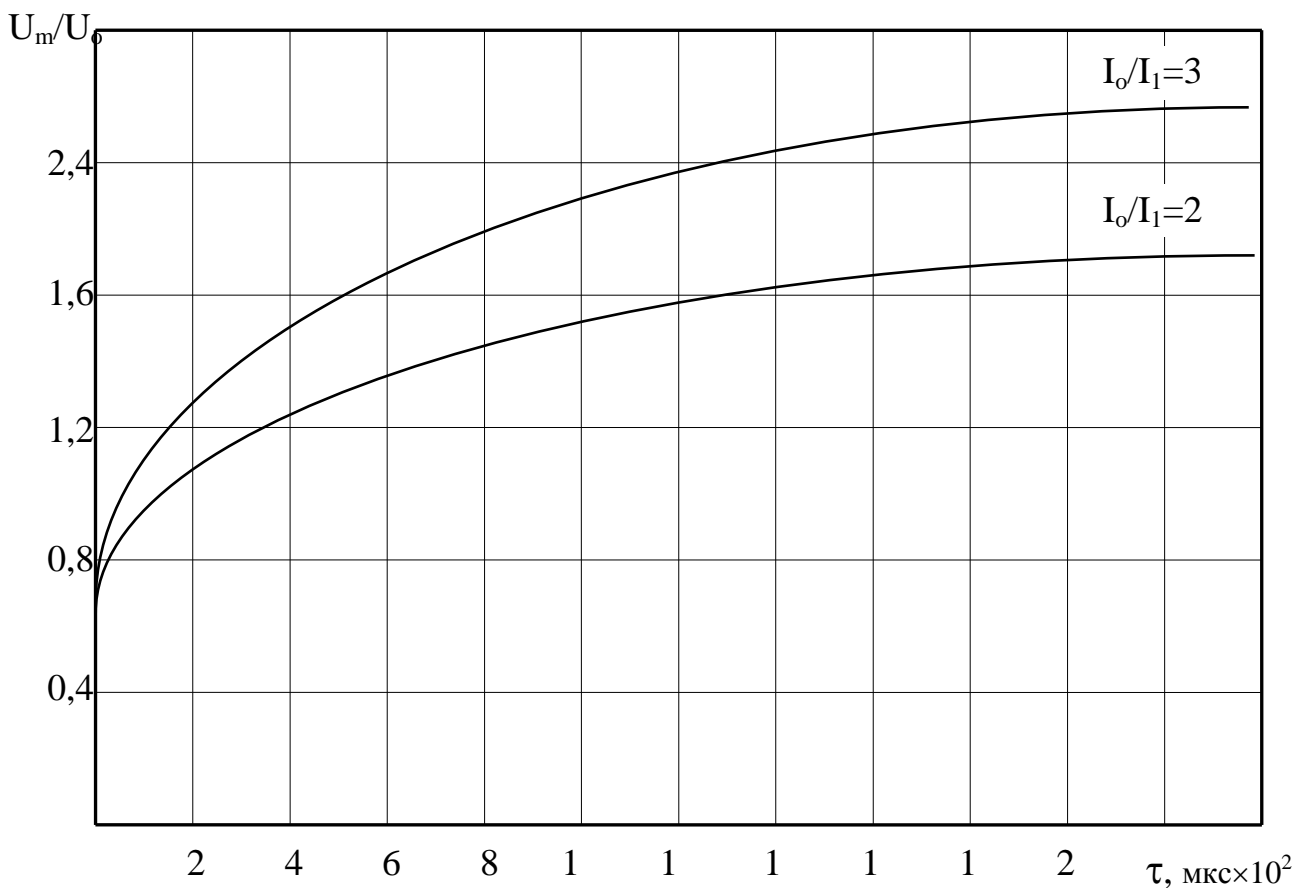


Рис. 3.11. Залежність імпульсу перенапруги від довжини імпульсу струму

Визначення характеристик ВДС проведено за такою методикою: РЛ запалюється і протягом відносно тривалого проміжку часу, який становить 15 ... 20 хв, в ній підтримується постійний струм  $I_0$ . Потім на РЛ подається імпульс струму складної форми (рис. 3.2, 3.3). В залежності від тривалості інтервалу  $[t_1, t_2]$  можливе виникнення трьох характерних імпульсів напруги:

1. Напруга на лампі  $U_\Lambda(t)$  плавно зростає (рис. 3.12).
2. Процес встановлення напруги на лампі  $U_\Lambda(t)$  є коливальним (рис. 3.13).
3. Процес встановлення напруги на лампі  $U_\Lambda(t)$  є періодичним з мінімальною постійною часу (рис. 3.14).

Аналогічна картина спостерігається для  $U_{\Lambda*} = \frac{U_\Lambda}{U_0} > 1$  (рис. 3.15 - 3.17).

Коефіцієнт  $A$ , який входить в диференційні математичні моделі (3.35), (3.39), визначається з формули

$$\frac{1}{G_\Lambda(t)} = \frac{1}{G_0} - AtU_0^2 \left( \frac{U_\Lambda}{U_0} - 1 \right) \quad (3.50)$$

для моменту часу  $t_2$  (рис. 3.2, 3.3). В подальшому для підвищення точності коефіцієнт  $A$  уточнений за значеннями електричних величин  $I_\Lambda, P_\Lambda, U_{др}$  при роботі лампи зі зразковим вимірювальним дроселем.

Аналіз отриманих результатів показав, що для  $U_{\Lambda*} < 1$  коефіцієнт  $A$  має слабо виражену залежність від  $U_{\Lambda*}$ . Однак для  $U_{\Lambda*} > 1$  коефіцієнт  $A$  різко зростає (рис. 3.18). Наведена залежність апроксимована виразом

$$A = (-0,10A_*^8 + 0,66A_*^7 - 0,54)10^4 + (-0,18A_*^6 + 0,28A_*^5 - 0,25A_*^4 + 0,14A_*^3 - 0,45A_*^2 + 0,79A_*)10^5; \quad (3.51)$$



$$\text{де } A_* = \frac{A}{A_{НОМ}}.$$

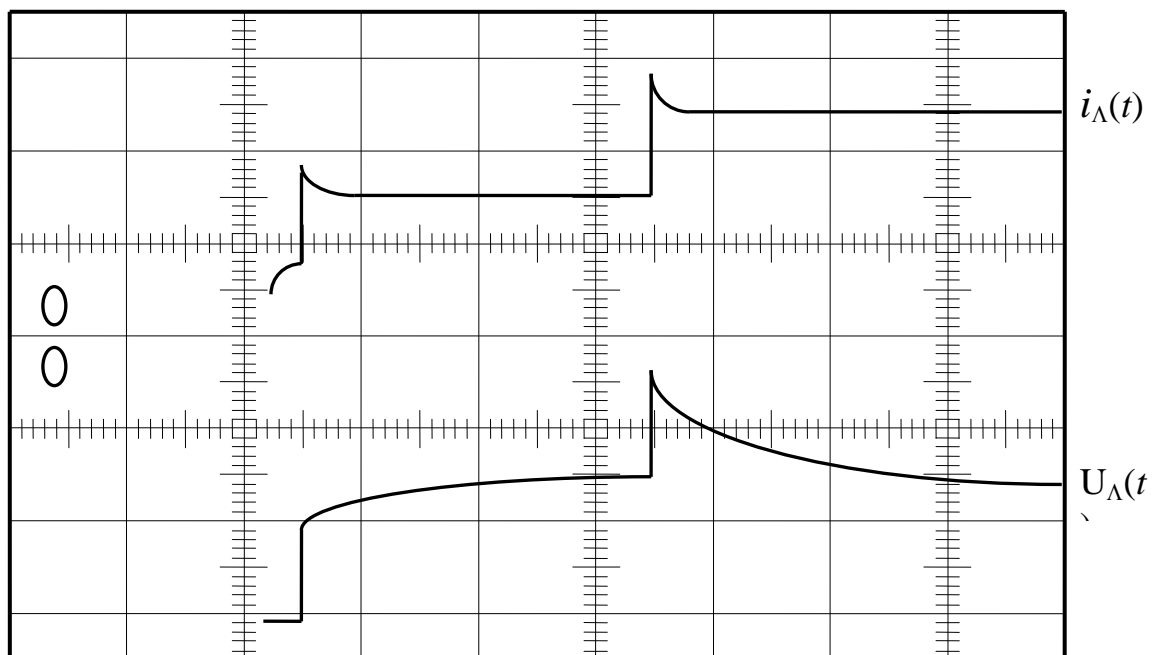


Рис. 3.12. Осцилограмми струму  $i_{\Delta}$  та напруги  $U_{\Delta}$  для МГЛ

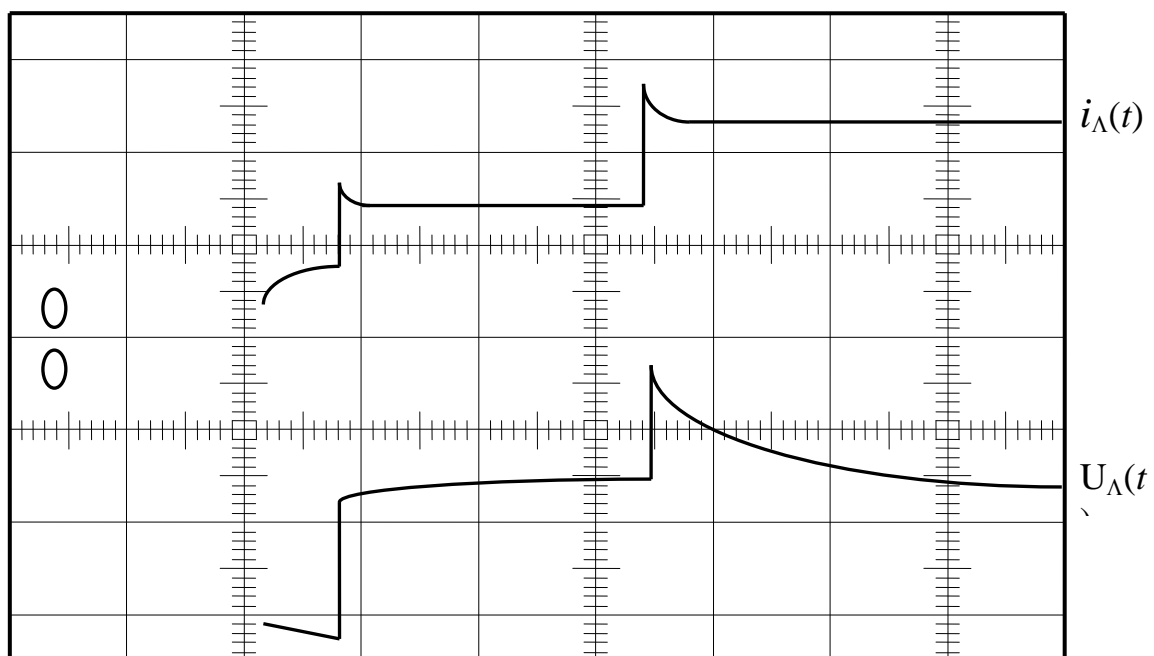


Рис. 3.13. Осцилограмми струму  $i_{\Delta}$  та напруги  $U_{\Delta}$  для МГЛ

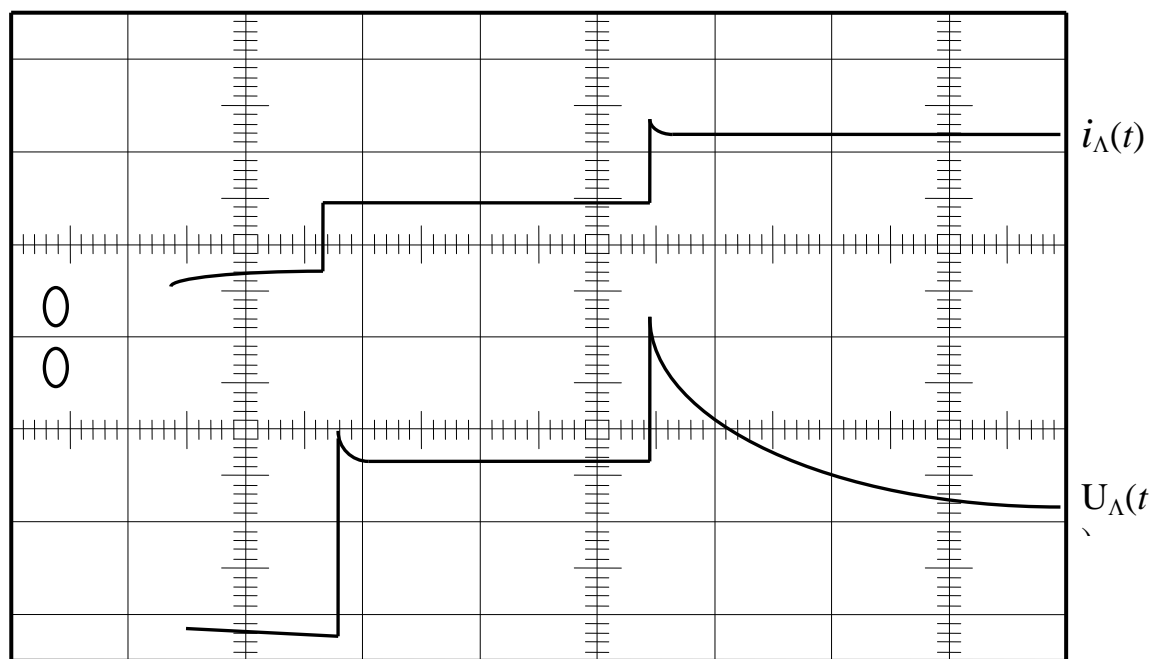


Рис. 3.14 Обвідні струму  $i_{\Delta}$  та напруги  $U_{\Delta}$  для МГЛ

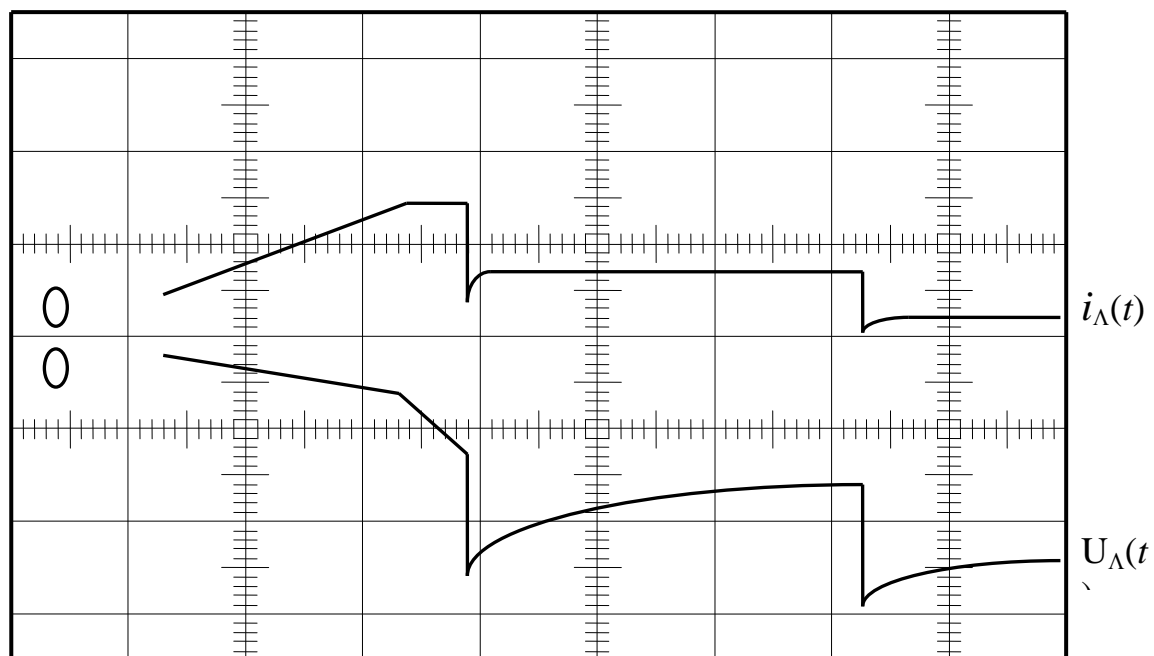


Рис. 3.15. Осцилограми струму  $i_{\Delta}$  та напруги  $U_{\Delta}$  для МГЛ

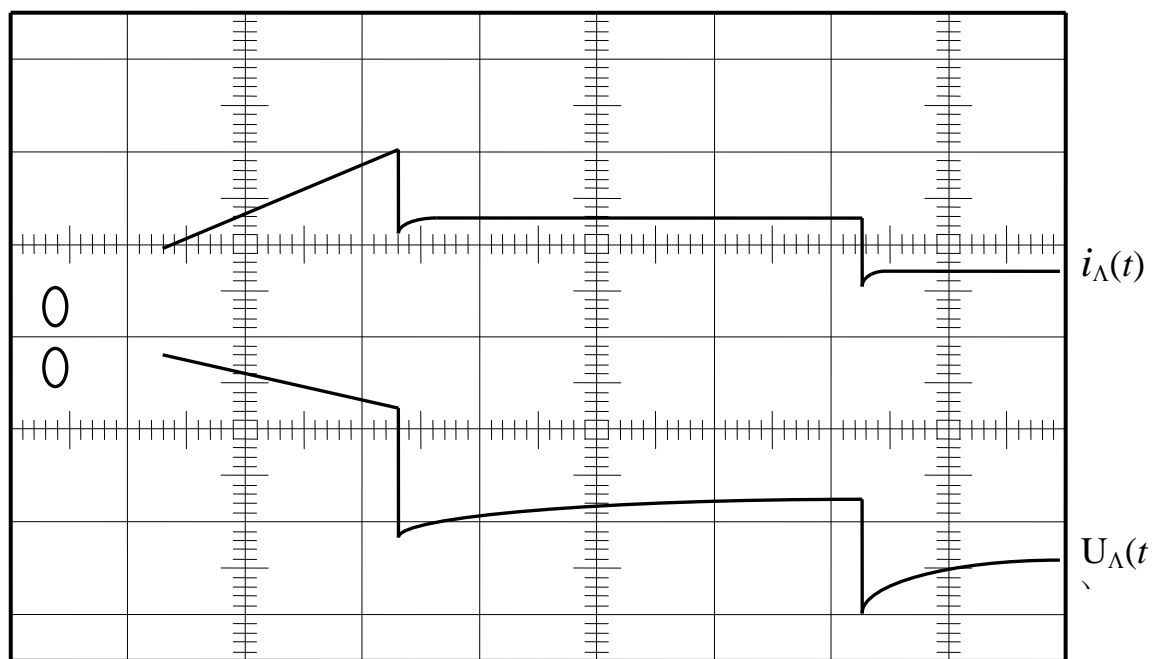


Рис. 3.16 Осцилограми струму  $i_{\Delta}$  та напруги  $U_{\Delta}$  для МГЛ

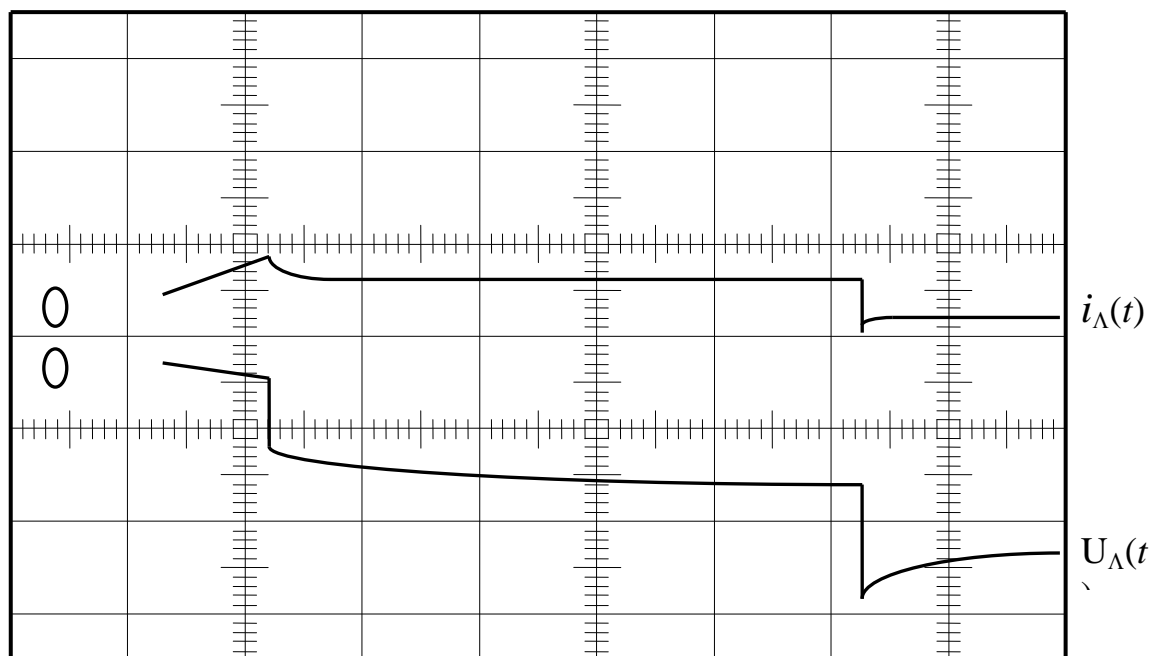


Рис. 3.17. Осцилограми струму  $i_{\Delta}$  та напруги  $U_{\Delta}$  для МГЛ

За значеннями коефіцієнта  $A$ , розрахованими по найкраще збіжних теоретичних і експериментальних даних для ламп типу ДНаТ, ДРЛ та МГЛ, побудовані та апроксимовані залежності коефіцієнта  $A$  від потужності лампи (рис. 3.19):

$$A_{МГЛ} = 0,53 \cdot 10^{-4} P_{\Lambda^*}^8 + (-0,21 P_{\Lambda^*}^7 + 0,36 P_{\Lambda^*}^6) 10^{-2} - 0,34 P_{\Lambda^*}^5 + 1,91 P_{\Lambda^*}^4 - 6,89 P_{\Lambda^*}^3 + 15,42 P_{\Lambda^*}^2 - 21,63 P_{\Lambda^*} + 18,16 \quad (3.52)$$

$$A_{ДНаТ} = -0,13 \cdot 10^{-3} P_{\Lambda^*}^8 + 0,54 \cdot 10^{-2} P_{\Lambda^*}^7 - 0,92 \cdot 10^{-1} P_{\Lambda^*}^6 + 0,86 P_{\Lambda^*}^5 - 4,71 P_{\Lambda^*}^4 + 15,19 P_{\Lambda^*}^3 - 26,04 P_{\Lambda^*}^2 - 15,15 P_{\Lambda^*} - 24,65 \quad (3.53)$$

$$A_{ДРЛ} = -0,53 \cdot 10^{-3} P_{\Lambda^*}^8 + (0,21 P_{\Lambda^*}^7 - 0,35 P_{\Lambda^*}^6) 10^{-2} + 3,11 P_{\Lambda^*}^3 - 16,24 P_{\Lambda^*}^4 + 48,86 P_{\Lambda^*}^3 - 79,17 P_{\Lambda^*}^2 + 52,82 P_{\Lambda^*} - 0,64 \quad (3.54)$$

де  $P_{\Lambda^*} = \frac{P_{\Lambda}}{100}$ .

Використовуючи експериментальні дані, за напругою  $U_2'$  в момент  $t_1''$  (рис.3.2, 3.3) можна знайти коефіцієнт  $\beta$ :

$$\beta = \frac{U_0}{U_2'} \quad (3.55)$$

Зміною тривалості інтервалу  $[t_1, t_1'']$  отримана залежність  $\beta = f(U_{\Lambda^*})$  (рис. 3.20). Апроксимований вираз, який відповідає цій залежності, має вигляд:

$$\beta = -0,31 \cdot 10^2 U_{\Lambda^*}^8 + (0,21 U_{\Lambda^*}^7 - 0,59 U_{\Lambda^*}^6 + 0,92 U_{\Lambda^*}^5 - 0,84 U_{\Lambda^*}^4 + 0,47 U_{\Lambda^*}^3 - 0,15 U_{\Lambda^*}^2 + 0,26 U_{\Lambda^*}) 10^3 - 130 \quad (3.56)$$

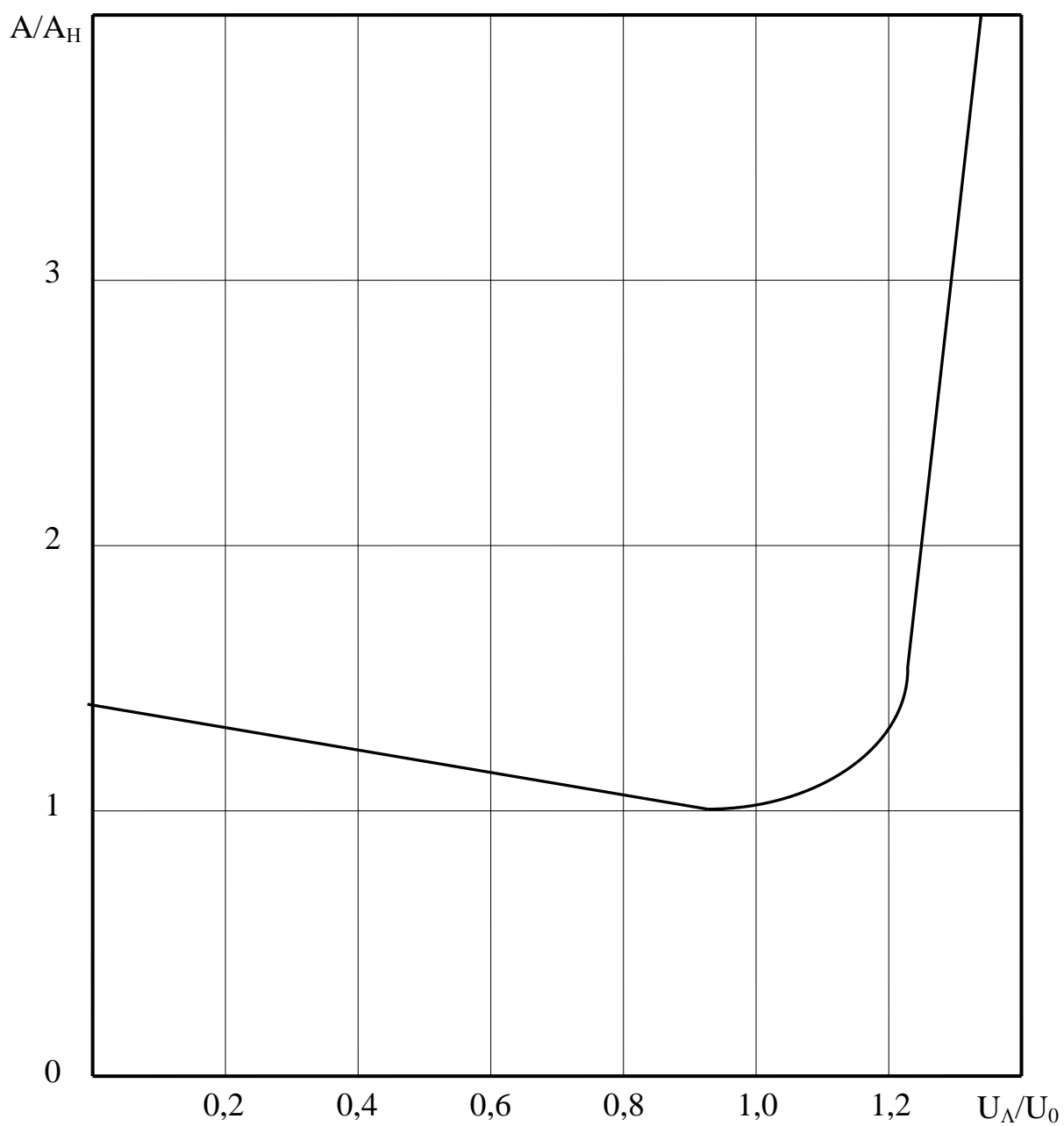


Рис. 3.18. Залежність коефіцієнта  $A$  від напруги на лампі

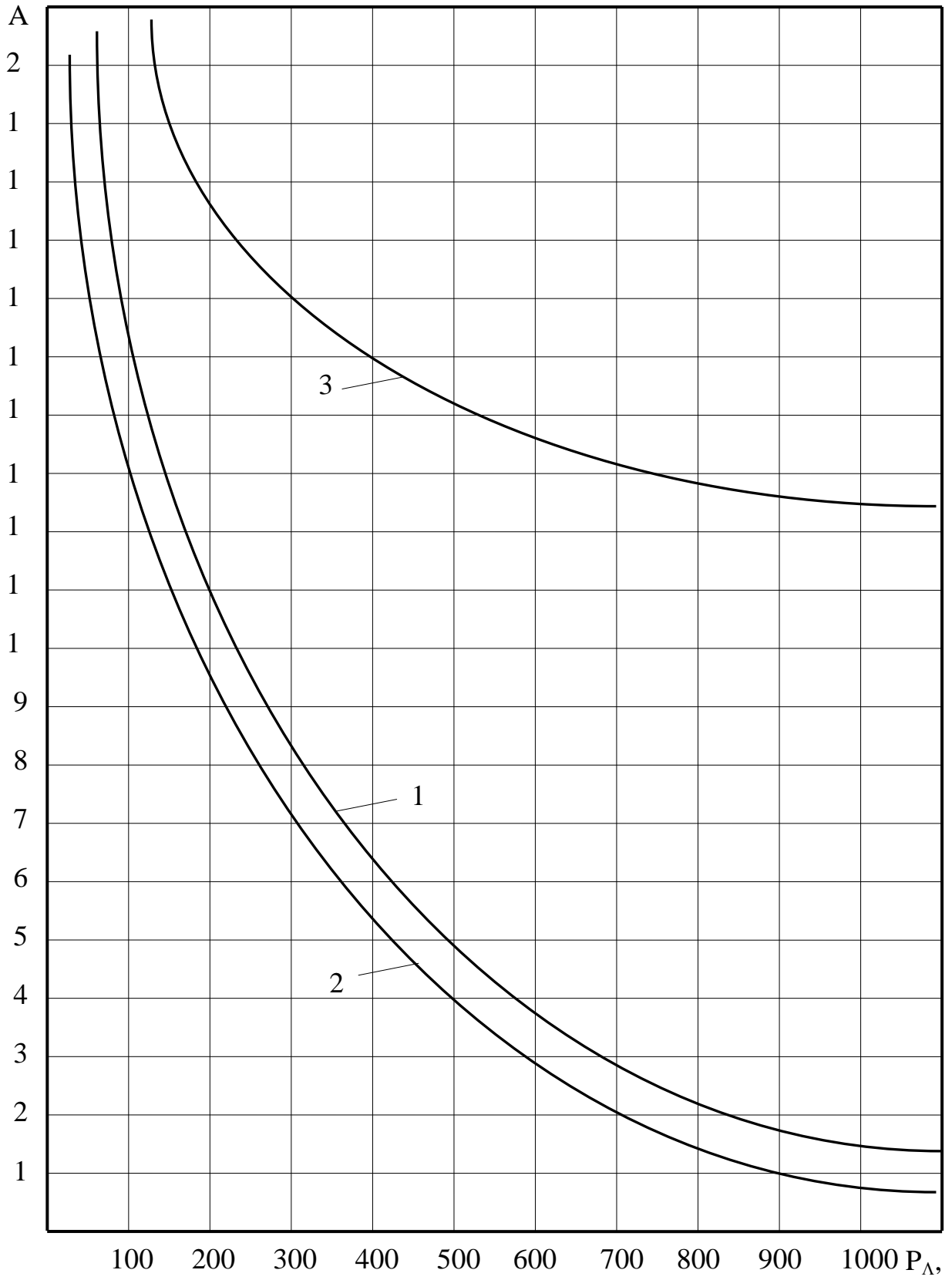


Рис. 3.19. Залежність коефіцієнта A від потужності РЛ  
1 - ДРЛ, 2 - МГЛ, 3 - ДНаТ

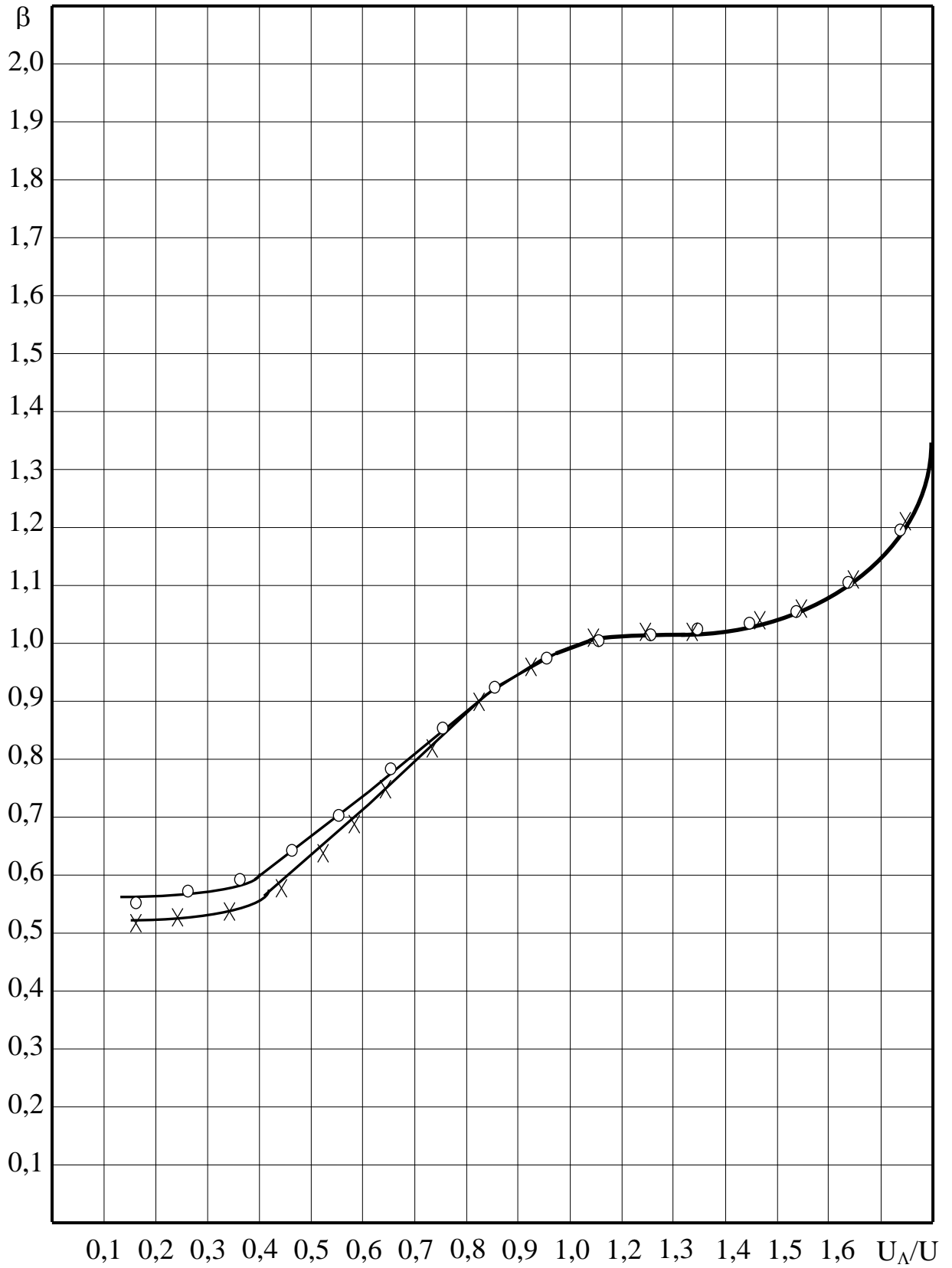


Рис. 3.20. Експериментальна залежність коефіцієнта  $\beta$  від відношення  $U_L/U_0$  для МГЛ



На рис. 3.21 показана залежність  $M_2(U_\Lambda)$ , а апроксимований вираз описується так:

$$M_2(U_{\Lambda^*}) = (1,5 + 3U_{\Lambda^*}^{1,5})10^4. \quad (3.57)$$

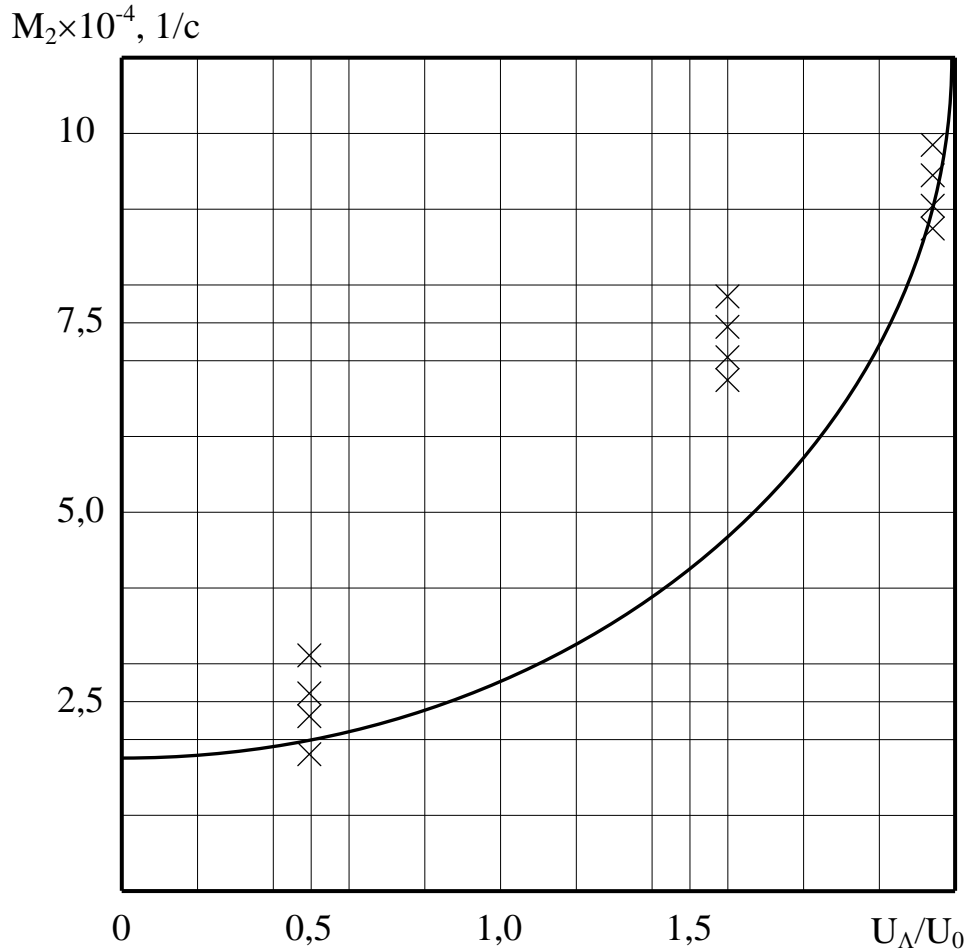


Рис. 3.21. Експериментальна залежність коефіцієнта  $M_2$  від відношення  $U_\Lambda/U_0$  для МГЛ

Отримані залежності дозволяють скоротити обсяг експериментальних робіт з визначення коефіцієнтів математичної моделі для ламп нових типоміналів, а також використати диференційні математичні моделі РЛ (3,35) і (3,39) для аналізу кіл, які містять ВДС.

### 3.5. Система для світлотехнічних досліджень

Для правильного вибору гоніофотометра необхідно володіти достатнім обсягом інформації про його технічні характеристики і економічні показники. Ми вважаємо, що повинна бути надана така інформація:

- параметри механічної конструкції;
- межі кутів вимірювання;
- межі вимірюваних величин;
- похибки вимірювань;
- тип і характеристика фотоелектричного вимірювального перетворювача;
- особливості керування;
- тип комп'ютера;
- витрати часу на виготовлення;
- вартість.

Враховуючи актуальність проблеми, нами виконані роботи з розробки сучасного фотометричного обладнання, а саме:

- гоніофотометричної системи з використанням комп'ютерної техніки;
- спрощеної гоніофотометричної системи з різними варіантами керування її роботою.

Функціональна схема запропонованої комп'ютеризованої гоніофотометричної системи показана на рис. 3.22, де 1 - блок живлення і керування, 1.1 - блок стабілізованої напруги, 1.2, 1.3 - блоки керування кроковими двигунами, 2 - комп'ютерний блок, 2.1 - інтерфейс, 2.2 - комп'ютер, 2.3 — 2.5 - аналогово-цифрові перетворювачі, 3 - гоніофотометр, 3.1, 3.2 - датчі початкового положення, 3.4, 3.5 - крокові двигуни, 3.6 - світильник зі схемою вимірювального перетворення електричних величин, 4 - блок фотоелектричного вимірювального перетворення, 4.1 - кремнієвий фотоелемент з відкорегованою

спектральною характеристикою, 4.2 - термостабілізатор, 4.3 - попередній підсилювач, 4.4 - перетворювач струм - напруга.

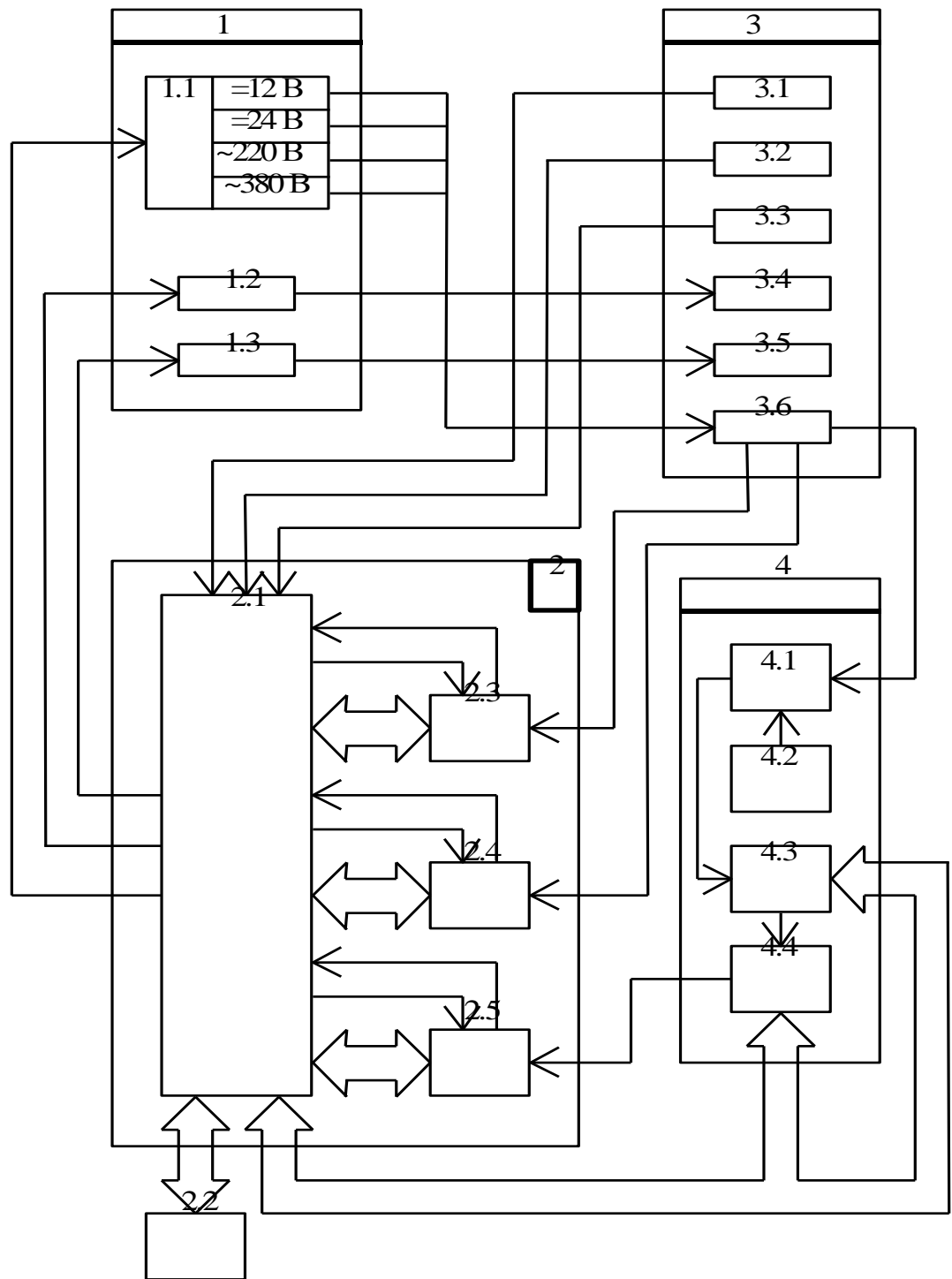


Рис. 3.22. Функціональна схема компютеризованої гоніофотометричної системи

Система дозволяє для джерел світла і СП із світловим отвором до 1600

мм:

- зняти і визначити тип кривої сили світла;
- виміряти світловий потік;
- визначити клас СП за розподілом сили світла;
- визначити коефіцієнт корисної дії;
- виміряти габаритну яскравість;
- визначити захисний кут;
- виміряти освітленість на заданій висоті;
- побудувати просторові криві освітленості;
- виміряти електричні величини лампи і СП.

Механічна конструкція гоніофотометричної системи містить одну або дві металеві дуги, по яких переміщується візок із фотометричною головкою, пристрій для кріплення і повороту ДС чи СП навколо вертикальної осі.

У системі передбачене використання термостабілізованого кремнієвого фотоелемента з виправленою спектральною характеристикою і блок керування та реєстрації і обробки вимірювальної інформації на базі персонального комп'ютера типу Pentium.

Комп'ютеризована гоніофотометрична система характеризується такими параметрами:

- |   |                          |
|---|--------------------------|
| - похибка вимірювань не перевищує                           | ±5 %;                    |
| - межі вимірювання сили світла                              | 10...10 <sup>6</sup> кд; |
| - роздільна здатність за освітленістю                       | 0,1 лк;                  |
| - діапазон кутів вимірювання                                | :                        |
| а) в екваторіальній площині                                 | 0...360°;                |
| б) в меридіанній площині                                    | 0...170°, 190...360°;    |
| - роздільна здатність по кутах                              | 0,1°;                    |
| - тривалість вимірювань в автоматичному режимі не перевищує | 20 хв.;                  |

- температура стабілізації фотоелемента

35,0±0,1°C;

- максимальна вага СП

50 кг.

Враховуючи економічний стан підприємств галузі та високу вартість розглянутої гоніофотометричної системи, вважаємо доцільним розмістити обладнання такого високого класу в регіональних і центральному сертифікаційних центрах.

Для проведення світлотехнічних вимірювань на підприємствах галузі розроблена спрощена гоніофотометрична система [29]. Вона дозволяє фотометрувати СП із світловим отвором менше, ніж 700 мм і масою менше, ніж 25 кг. Метрологічні характеристики спрощеної системи аналогічні до характеристик попередньої гоніофотометричної системи. Відмінність полягає в тому, що в спрощеній системі фотоелектричний вимірювальний перетворювач нерухомий.

Конструктивно система складається із стола для закріплення СП і розміщення механізмів повороту СП навколо вертикальної та оптичної осей, а також стійки із фотометричною головкою. Тип стола візковий з фіксацією положення. Конструкція гоніофотометра забезпечує суміщення світлового центру СП з вертикальною віссю його обертання. Передбачено три варіанти керування роботою гоніофотометра: ручний, напівавтоматичний від програматора і автоматичний від персонального комп'ютера.

Для напівавтоматичного керування система комплектується електроприводом і блоком керування. Останній забезпечує можливість вибору кроку зняття показів з дискретністю 1°, а також можливість реверсу електроприводу. Результати вимірювань у першому і другому варіантах подаються значеннями освітленості чи сили світла у цифровому вигляді і у формі графіку сили світла.

При автоматичному керуванні система комплектується автоматизованим електроприводом і персональним комп'ютером. Роботою гоніофотометра, зняттям, корекцією і обробкою результатів вимірювань керує комп'ютер за вибраним оператором алгоритмом. Результати вимірювань подаються у вигляді протоколу в табличній і графічній формах.

Пропоновані системи відповідають рекомендаціям публікацій МКО і стандартів щодо гоніофотометрії. Невідповідність в низці випадків положення СП при фотометруванні їх робочому положенню враховується з допомогою відповідних коефіцієнтів. Внаслідок фінансової неспроможності більшості підприємств галузі придбати для фотометричних лабораторій гоніофотометр дзеркальний чи прямого фотометрування і недоцільності проведення всіх світлотехнічних вимірювань в єдиному центрі пропонуємо обладнати лабораторії однотипним фотометричним обладнанням, а відповідним службам доопрацювати методику визначення поправок для різних типів розрядних ламп. Це дозволить при порівняно невеликих фінансових витратах підприємств галузі отримувати достеменну вимірювальну інформацію про фотометричні величини та характеристики ДС і СП.

## Висновки до розділу 3.

1. Показано, що для аналізу і розрахунку кіл, які містять РЛ, на всіх інтервалах роботи і особливо в аномальних режимах, в режимах з паузами струму доцільно використовувати диференційну апроксимацію ВАХ ДС.

2. Отримано, що для РЛВТ і, зокрема, для МГЛ, найприйнятнішими є математичні моделі, в яких за визначальний параметр прийнята середня концентрація електронів чи провідність лампи.

3. Використовуючи визначальним параметром середню концентрацію електронів, доведена можливість побудови математичної моделі першого і другого порядків для кіл, які містять РЛВТ.

4. Проаналізований процес формування математичної моделі РЛ при вираженні електричних параметрів лампи через еквівалентну провідність, що дозволило визначити межі застосування математичної моделі РЛ першого і другого порядків.

5. На основі результатів досліджень імпульсних характеристик РЛ отримані коефіцієнти і залежності математичної моделі РЛ, що дозволяє скоротити обсяг експериментальних робіт для ламп нових типоміналів, а також використати диференційну модель лампи для аналізу кіл, що містять РЛ.

6. Запропонована гоніофотометрична система для проведення світлотехнічних вимірювань.

## РОЗДІЛ 4

### ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

#### 4.1. Визначення миттєвих електричних величин високоінтенсивних джерел світла

Згідно з вищевикладеним, на сьогодні щодо МГЛ, найбільш адекватні математичні моделі (3.35), (3.39). При живленні РЛВТ від мережі змінного струму частоти 50 Гц і при використанні баластним елементом дроселя доцільно використовувати математичну модель першого порядку (3.35). При цьому досягається суттєвого скорочення обсягу експериментальних робіт і зберігається досить висока точність аналізу, адже похибка не перевищує  $\pm 3 \dots 4\%$ .

Для складання диференційних рівнянь, які описують процеси в колі з РЛ, використаний метод змінних стану. Отримана таким чином система диференційних рівнянь розв'язується шляхом чисельного інтегрування на комп'ютері.

Існує значна кількість методів чисельного інтегрування систем диференційних рівнянь. Відмінність між ними полягає у формулах обчислення наступного наближеного значення, способах оцінки локальної похибки, стратегією вибору кроку, тощо. Загалом ефективність методу визначається трьома компонентами: точністю, стійкістю і економічністю. Вони, зазвичай, забезпечуються за пріоритетністю. Стійкість безперечно повинна забезпечуватись завжди.

У даних дослідженнях доцільно застосовувати метод Рунге-Кутта четвертого порядку. Перевагами цього методу слід вважати:

- простоту, з точки зору програмної реалізації алгоритму;
- високу точність ;



- простоту зміни кроку інтегрування;
- крок інтегрування  $h$ , для якого проявляється нестійкість обчислювального процесу, максимальний:

$$h \leq 2,71 \tau_{min}, \quad (4.1)$$

де  $\tau_{min}$  - мінімальна постійна часу схеми.

Точність обчислень суттєво залежить від вибраного кроку. Необхідний крок можна визначити за формулою:

$$h = h_1 \left( \frac{\varepsilon_{доп}}{\varepsilon_1} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4.2)$$

де  $h_1, \varepsilon_1$  - крок і похибка на попередньому кроці.

Як показали проведені нами дослідження, необхідна точність отримується для кількості кроків інтегрування  $\geq 200$  на період напруги живлення.

Суть пропонованого методу полягає в наступному: якщо задати в будь-який момент часу  $t_0$  початкове значення еквівалентної провідності розрядного проміжку  $G_0$  і відповідний крок обчислень, то шляхом розрахунку на комп'ютері методом Рунге-Кутта четвертого порядку можна отримати миттєву еквівалентну провідність в момент часу  $t=t_0+h$ . З диференціальних рівнянь, які описують процеси в колі, можна визначити миттєвий струм лампи, а потім і напругу на ній. Аналогічним чином визначають миттєві значення шуканих величин для кожного такту на всьому інтервалі інтегрування.

При чисельному аналізі на основі математичного моделювання значні труднощі представляє вибір початкових значень. Оскільки початкову

провідність РЛ не можна вибрати з такою точністю, щоб режим встановився в першому періоді, то виникає перехідний процес. Він полягає в зміні провідності від початкового заданого значення до значення, яке відповідає стану РЛ в даний момент часу. Чим точніше задані початкові умови, тим менший час обчислень. Тому доцільно їх визначити з метою усунення в подальшому неоправданих втрат машинного часу. Миттєві напруга і струм лампи описуються періодичною функцією, період якої співпадає з періодом напруги джерела живлення. Провідність є періодичною функцією з періодом, який вдвічі менший.

Умова закінчення перехідного процесу записується таким виразом:

$$\left| G_{\Lambda}(N\pi) - G_{\Lambda}((N+1)\pi) \right| \leq \varepsilon_{\text{доп}} , \quad (4.3)$$

де  $N$  - ціле число.

Для РЛ моменти часу, коли

$$\frac{di_{\Lambda}}{dt} = 0 , \quad (4.4)$$

$$\frac{dG_{\Lambda}}{dt} = 0 \quad (4.5)$$

настають майже одночасно. Тому з (3.35) отримуємо

$$U_0 = \frac{i_{\Lambda 0}}{G_0} . \quad (4.6)$$

Час початку обчислень дорівнює

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left( \frac{U_0}{U_m} \right). \quad (4.7)$$

Беручи до уваги практично синусоїдну форму струму, вважатимемо, що початковий струм  $i_{\Lambda 0}$  дорівнює максимальному струму  $i_{m0}$ . Тоді

$$G_0 = \frac{i_{\Lambda 0}}{U_m \sin \omega t_0} = \frac{\sqrt{2} i_{m0}}{U_m \sin \omega t_0}. \quad (4.8)$$

У цьому випадку час, який вимагається для настання збіжності, дорівнює приблизно двом періодам напруги живлення. В результаті проведених досліджень встановлено, що в діапазоні початкових значень  $G_0 = 5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ Ом}^{-1}$  спостерігається збіжність протягом 2 ... 3 періодів. Якщо  $G_0 > 0,1 \text{ Ом}^{-1}$ , то внаслідок виникнення нестійкості процесу обчислень збіжність відсутня. Якщо ж  $G_0 < 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}$ , то настання збіжності запізнюється.

#### 4.2. Ефективні співвідношення параметрів кіл з розрядними лампами високого тиску в усталеному режимі

Для стабілізації струму РЛ можуть використовуватись такі основні типи баластів: активний, активно-ємнісний, індуктивний, індуктивно-ємнісний, напівпровідниковий. Внаслідок специфіки роботи МГЛ найбільшого поширення набули індуктивний та індуктивно-ємнісний, а в деяких галузях (телебачення, кіно, тощо) напівпровідникові баласты. На рис. 4.1 показана розрахункова еквівалентна схема кола, яка містить індуктивний баласт і РЛ.

Рівняння стану даного кола мають вигляд:

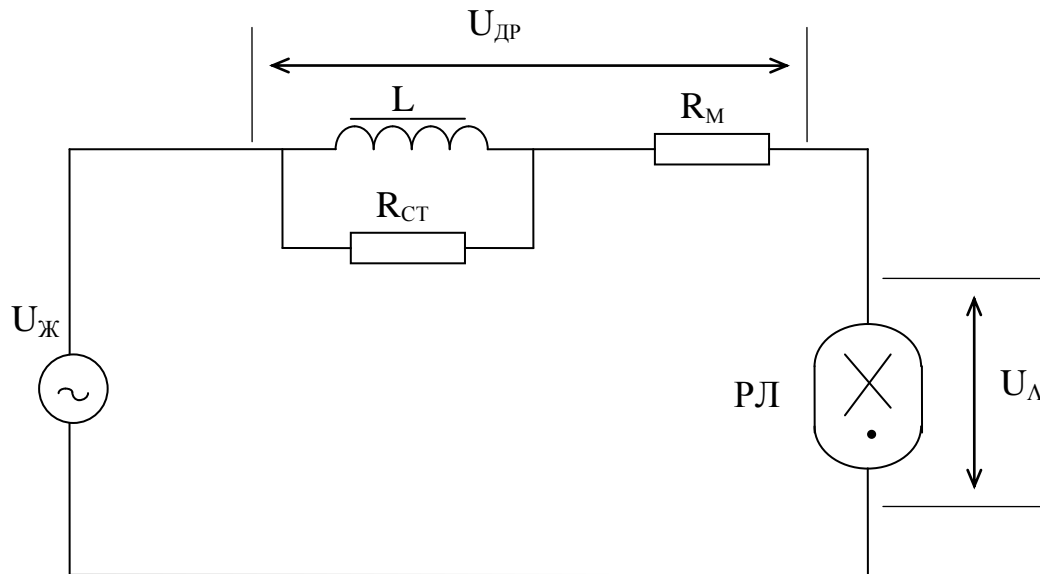


Рис. 4.1. Розрахункова еквівалентна схема кола з індуктивним баластом та РЛ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{\Lambda}}{dt} = \left( \frac{R_{CT}}{R_M + R_{CT} + G_{\Lambda}^{-1}} U_{\text{ж}} - \frac{(R_M + G_{\Lambda}^{-1}) R_{CT}}{R_{CT} + R_M + G_{\Lambda}^{-1}} i_L \right) L^{-1} \\ i_{R_{CT}} = \frac{L}{R_{CT}} + \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dG_{\Lambda}}{dt} = A(i_{\Lambda}^2 - U_{\Lambda}^2 G_{\Lambda}^2) \end{array} \right. , \quad (4.9)$$

де  $U_{\text{ж}}$  - середньоквадратична напруга живлення, В;  $R_M$  - активний опір обмотки дроселя, Ом;  $R_{CT}$  - активний опір, з допомогою якого враховуються втрати в магнітопроводі, Ом.

При цьому

$$R_{CT} = \frac{U_{\text{ДР}}}{P_{CT}} , \quad (4.10)$$

$$P_{CT} = P_{DP} - P_M, \quad (4.11)$$

де  $U_{DP}$  - спад середньоквадратичної напруги на дроселі, В;  $P_{CT}$  - втрати потужності в сталі магнітопровода, Вт;  $P_M$  - втрати потужності в обмотці дроселя, Вт;  $P_{DP}$  - втрати потужності в дроселі, Вт.

На рис. 4.2 показані розрахункові залежності миттєвих електричних величин РЛ в схемі, наведеній на рис. 4.1. В усталеному режимі похибка розрахунку не перевищує 4%. ВАХ застосовуваних дроселів нелінійні, тому дану нелінійність слід враховувати при проведенні розрахунків. Це здійснюється шляхом застосування відповідної апроксимації кривої намагнічування. У даному випадку застосована лінійно-гіперболічна апроксимація [46], яка дозволяє з необхідною точністю відобразити хід зміни кривої намагнічування як при наявності, так і при відсутності немагнітного проміжку в магнітному колі дроселя.

Проаналізуємо результати вимірювань з метою встановлення впливу нелінійності баластного дроселя на характеристики комплексу ПРА - РЛ. На відміну від аналітичних досліджень, проведених в [81] для ДРЛ, зміна повітряного проміжку здійснена за підтримки струму лампи в межах номінального значення. Останнього досягнуто шляхом відповідної зміни кількості витків обмотки дроселя. Це дозволяє оцінити не лише якісну картину впливу нелінійності дроселя, але й визначити кількісно наявні зміни. Вони мають важливе значення в умовах виробництва, коли необхідно знати до яких конкретно результатів приведе та чи інша зміна конструкції виробу. На рис. 4.3, 4.4, 4.5 показані осцилограми струму лампи та напруги на ній, а також напруга на дроселі для змін нелінійності баластного дроселя.

Експлуатація РЛ супроводжується відхиленнями напруги відносно номінального значення. У поєднанні з технологічними похибками, які

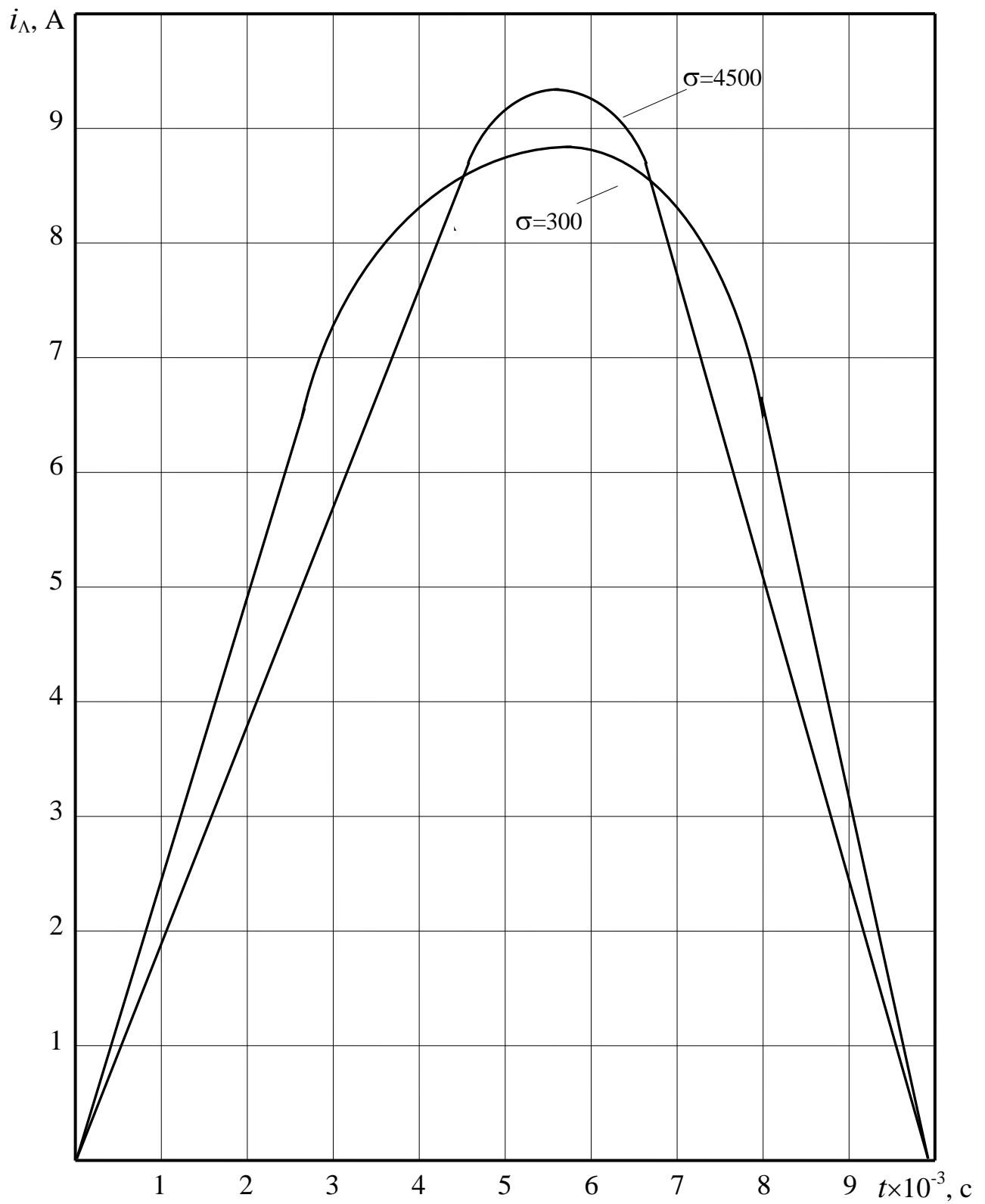


Рис. 4.3. Форма струму лампи при зміні повітряного проміжку  $\sigma$

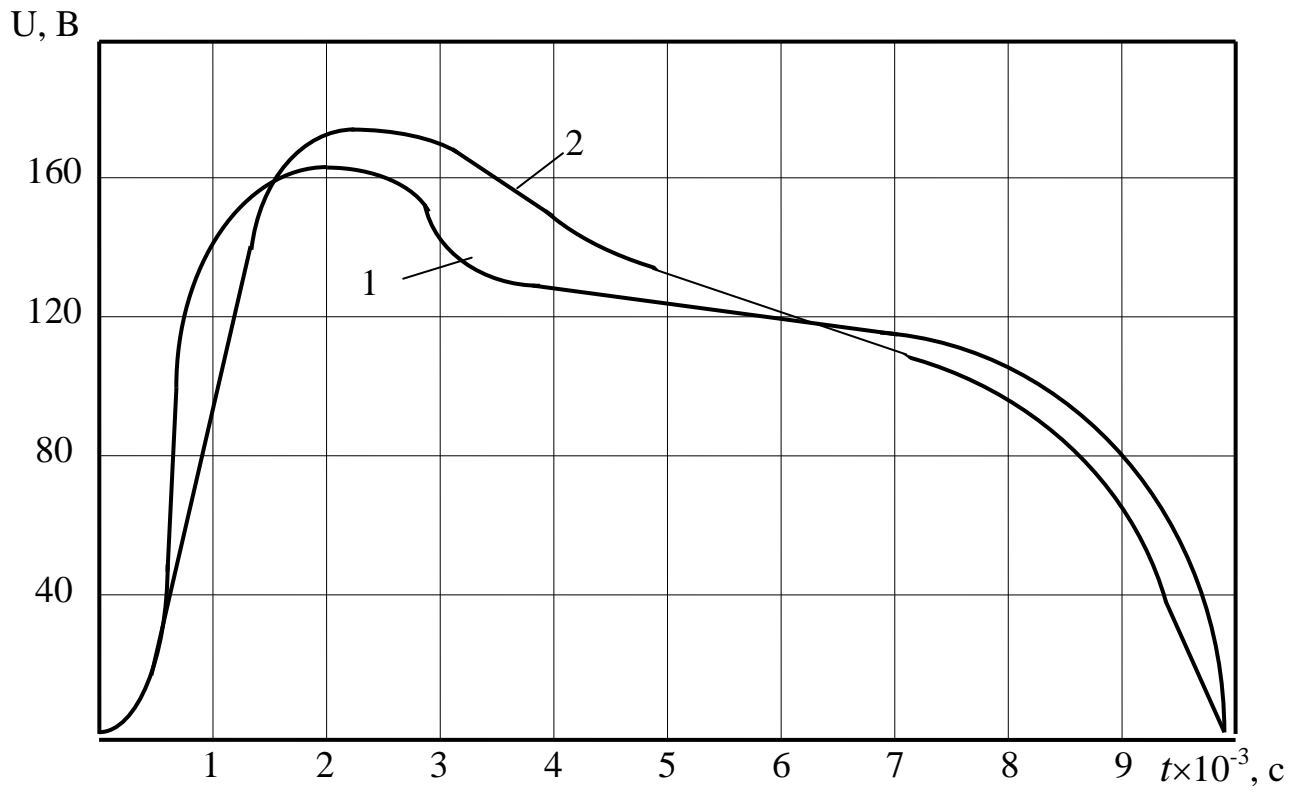


Рис. 4.4. Форма напруги на лампі при зміні повітряного проміжку  
1 -  $\sigma = 4500$ ; 2 -  $\sigma = 300$

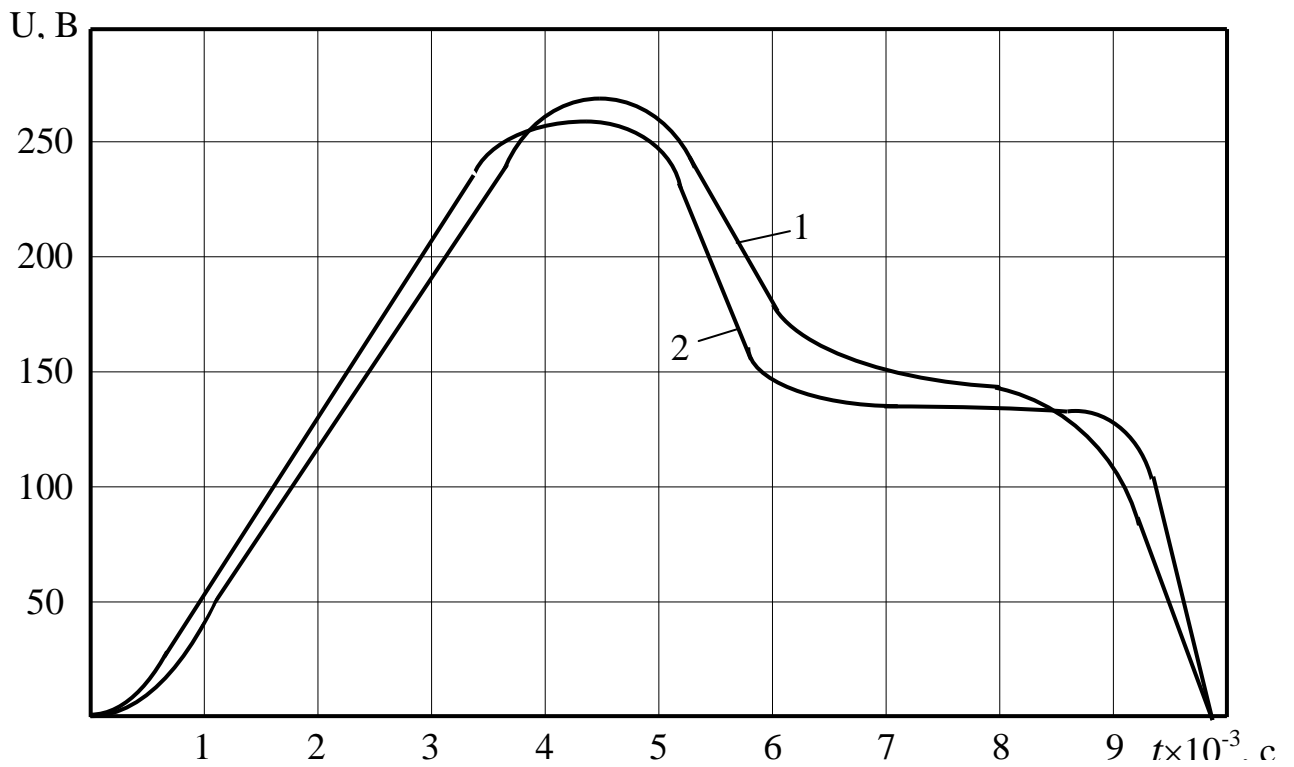


Рис. 4.5. Форма напруги на дроселі при зміні повітряного проміжку  
1 -  $\sigma = 4500$ ; 2 -  $\sigma = 300$

виникають при виготовленні дроселів, це суттєво впливає на параметри комплексу ПРА - РЛ. Тому передусім проектувальникам необхідно мати інформацію про ці зміни. Отримані в результаті моделювання залежності струму і потужності лампи від зміни індуктивності дроселя і напруги джерела живлення в діапазоні 198 В ... 242 В, показані на рис. 4.6, 4.7. З наведених графіків можна визначити коефіцієнти чутливості струму та потужності лампи відносно напруги живлення і зміни коефіцієнта самоіндукції. Аналіз наведених залежностей показує, що зміна напруги живлення на 10% викликає зміни струму і потужності МГЛ на 18%. Для відхилення коефіцієнта самоіндукції дроселя на 5% струм і потужність лампи змінюється відповідно на 21% і 20%.

При проектуванні комплексу ПРА - РЛ часто приходиться розв'язувати низку суперечливих задач. Від того, наскільки вдало вдається проектуванню знайти їх оптимальне співвідношення, залежить ефективність виробу. В комплекті ПРА - РЛ одним з вихідних параметрів, які мають суттєвий вплив на характеристики комплексу, є відносне горіння розряду.

На рис. 4.8 показані форми струму та напруги на лампі, отримані шляхом зміни напруги живлення. Якщо коефіцієнт  $m = \frac{U_{\Lambda}}{U_0}$  наближається до одиниці, то запізнення по фазі напруги на лампі по відношенню до напруги живлення є незначним і напруга перезапалювання близька до миттєвої напруги живлення. При цьому легко виникає загасання лампи, форма струму спотворюється, коефіцієнт амплітуди струму збільшується.

На рис. 4.9 показані залежності відношень  $\frac{U_{ДР}}{U_{Ж}}$ ,  $\frac{U_{ДР} + U_{\Lambda}}{U_{Ж}}$ ,  $\frac{U_{ДР} I_{\Lambda}}{P_{\Lambda}}$  від коефіцієнта  $m$ . Їх аналіз показує, що зі збільшенням відносної напруги горіння вказані відношення мають тенденцію до зменшення. Це очевидно, якщо напруга на лампі наближається до напруги живлення. Для  $m = 0,58$  реактивна потужність дроселя дорівнює 1,34 В·А на 1Вт потужності лампи, а для  $m = 0,75$  лише 0,72 В·А. Якщо виходити з точки зору маси, габаритів та економічності



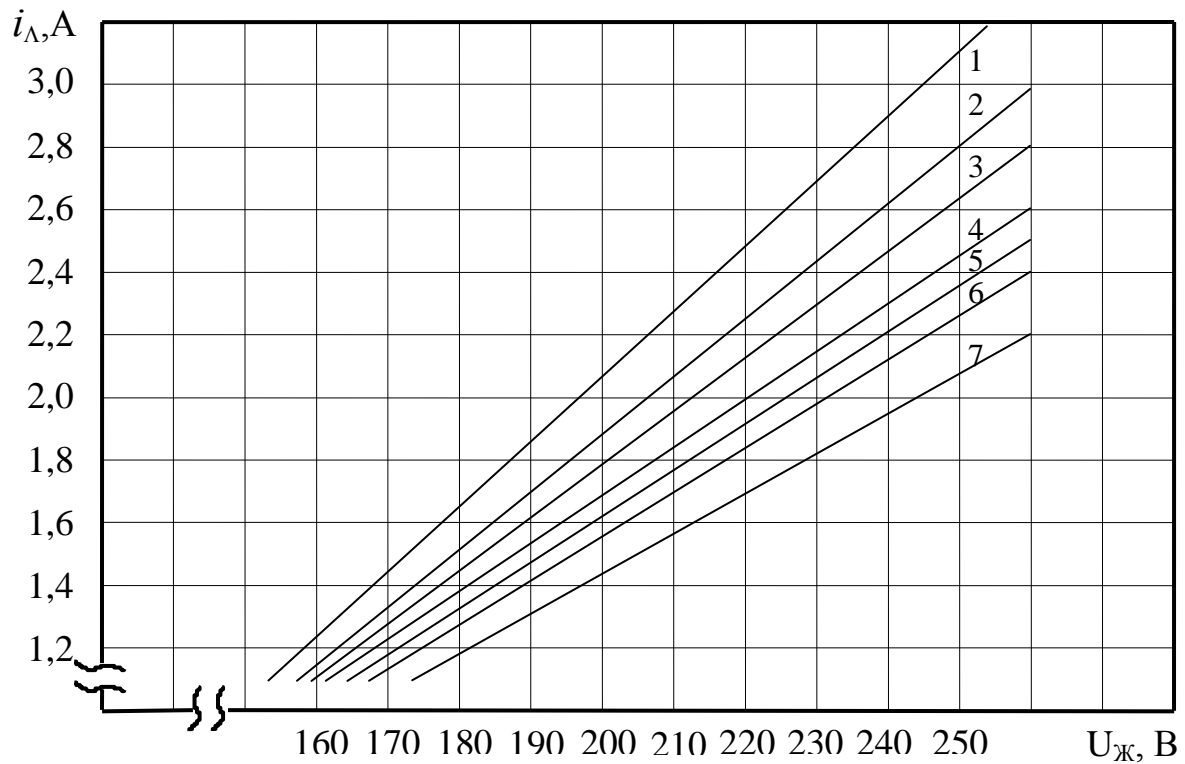


Рис. 4.6. Залежність струму лампи від напруги живлення при зміні індуктивності дроселя

1 -  $L_{\text{НОМ}-30\text{В}}$ , 2 -  $L_{\text{НОМ}-20\text{В}}$ , 3 -  $L_{\text{НОМ}-10\text{В}}$ , 4 -  $L_{\text{НОМ}}$ , 5 -  $L_{\text{НОМ}+10\text{В}}$ , 6 -  $L_{\text{НОМ}+20\text{В}}$ , 7 -  $L_{\text{НОМ}+30\text{В}}$

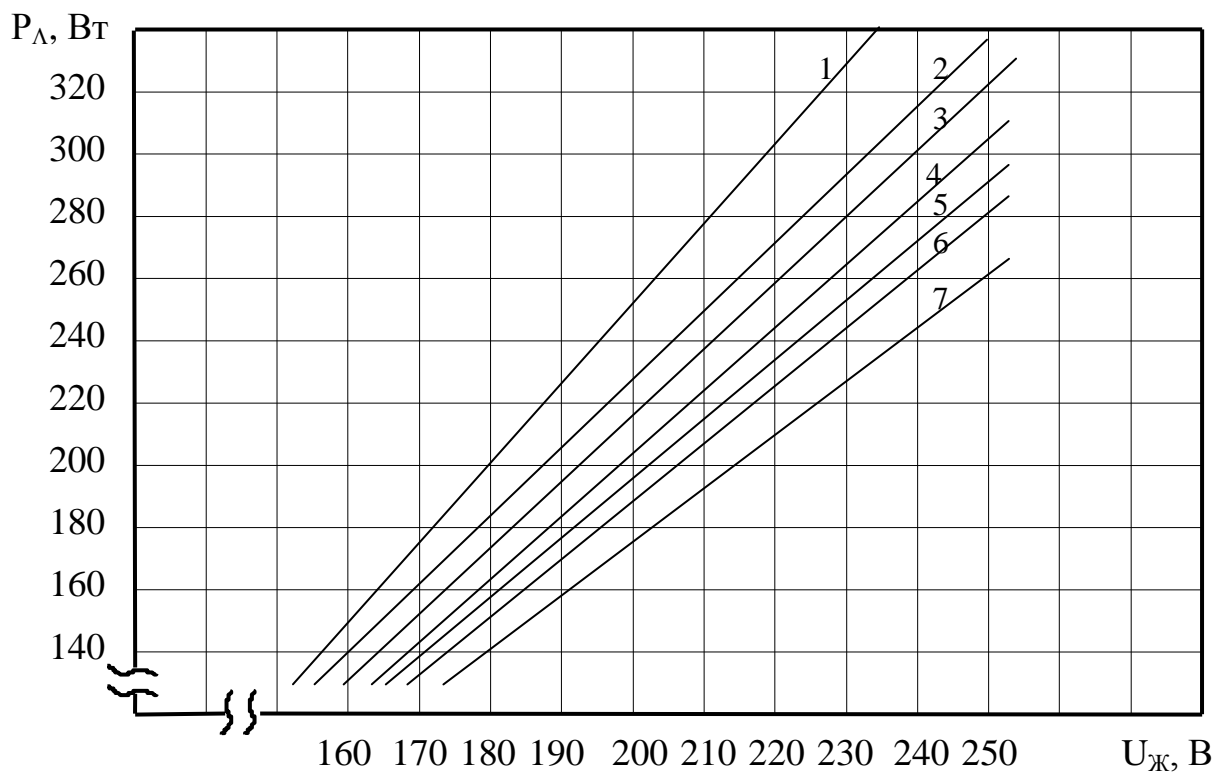
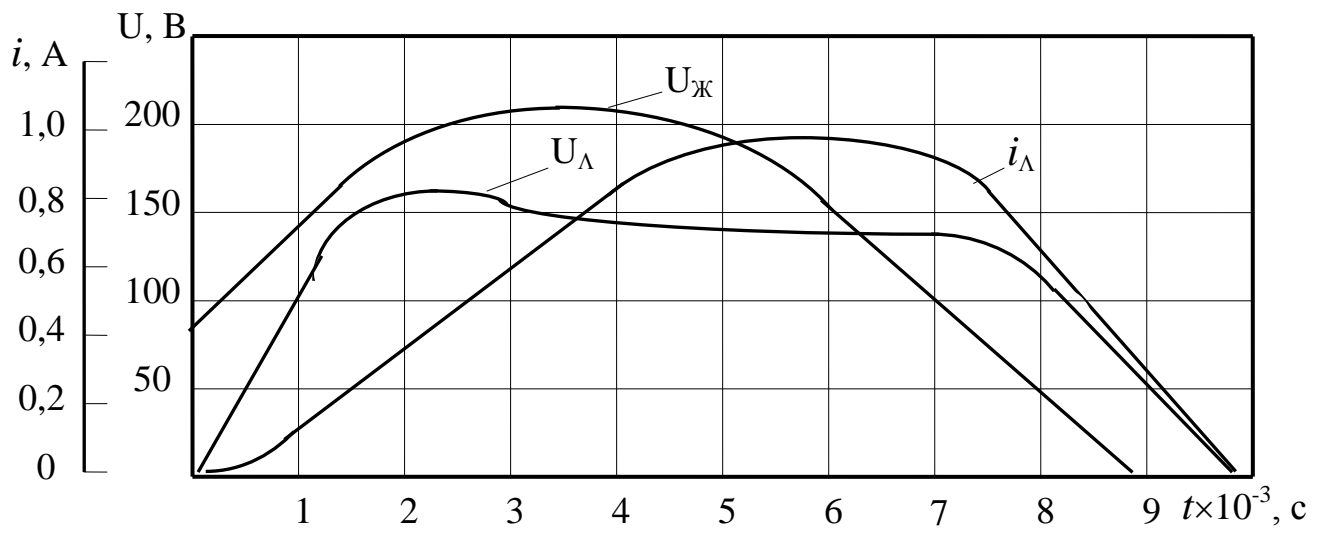
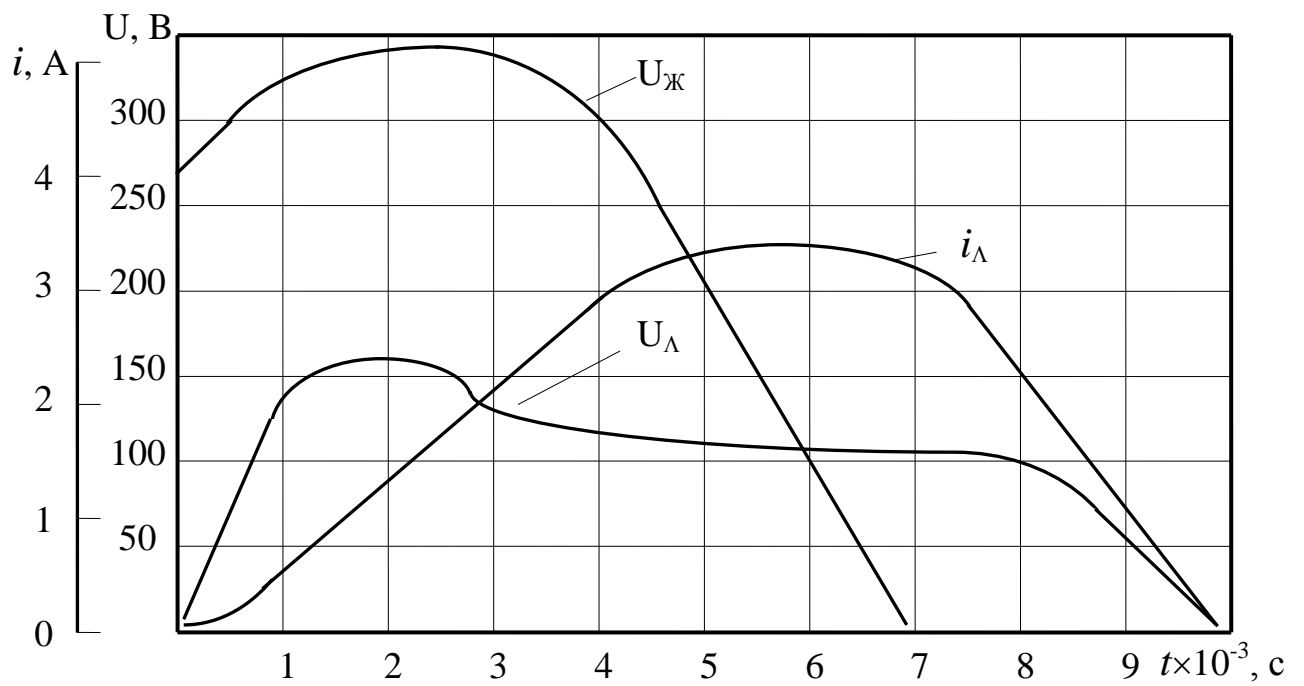


Рис. 4.7. Залежність потужності лампи від напруги живлення при зміні індуктивності дроселя

1 -  $L_{\text{НОМ}-30\text{В}}$ , 2 -  $L_{\text{НОМ}-20\text{В}}$ , 3 -  $L_{\text{НОМ}-10\text{В}}$ , 4 -  $L_{\text{НОМ}}$ , 5 -  $L_{\text{НОМ}+10\text{В}}$ , 6 -  $L_{\text{НОМ}+20\text{В}}$ , 7 -  $L_{\text{НОМ}+30\text{В}}$



a)



б)

Рис. 4.8. Форма струму та напруги на лампі, отримані шляхом моделювання:

а) при  $m=0,78$ ; б) при  $m=0,58$

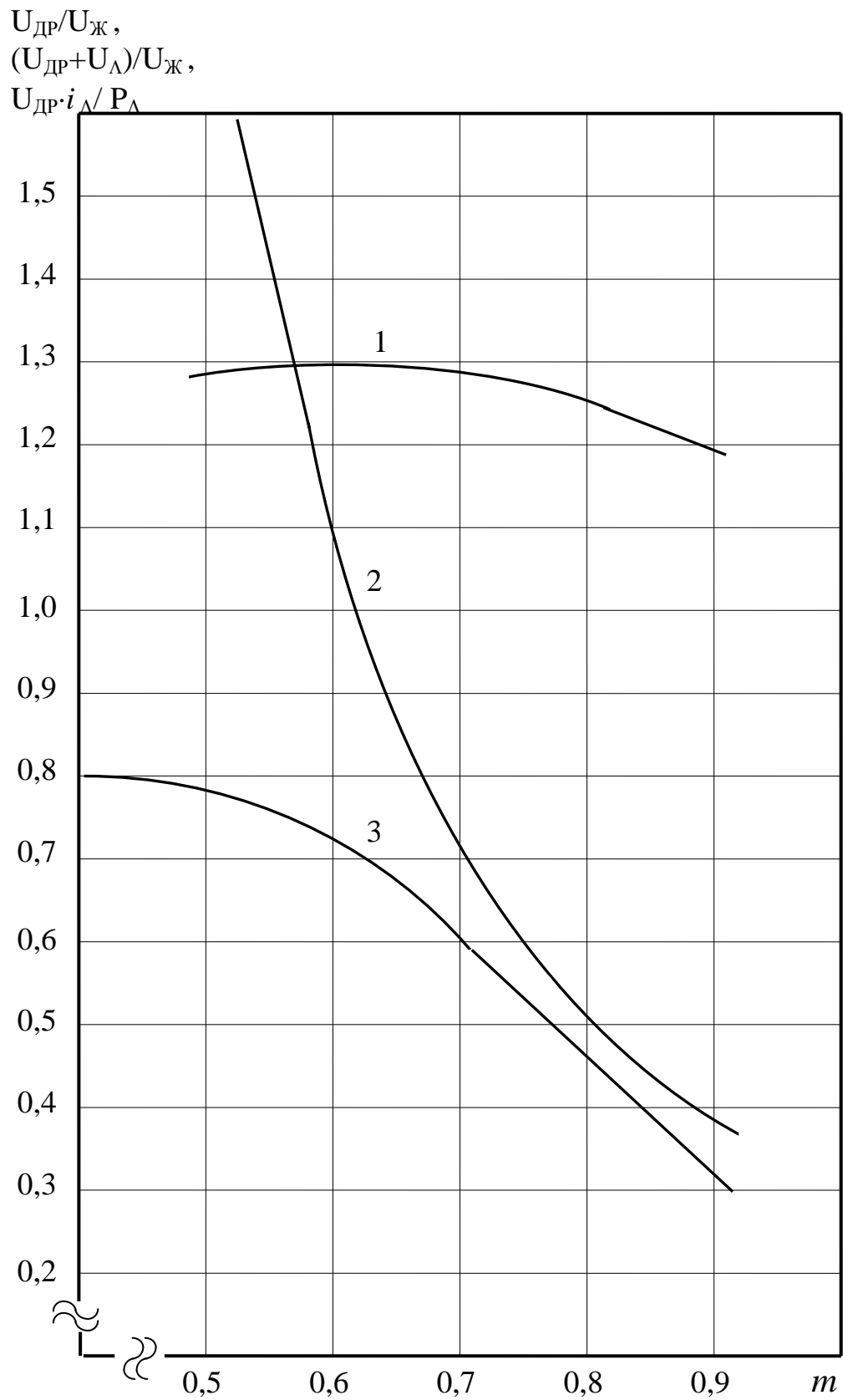


Рис. 4.9. Залежність розподілу напруги та потужності від відношення  $m$ :  
 1 -  $U_{\text{ДР}}/U_{\text{Ж}}$ ; 2 -  $(U_{\text{ДР}}+U_{\Lambda})/U_{\text{Ж}}$ ; 3 -  $U_{\text{ДР}} \cdot i_{\Lambda} / P_{\Lambda}$

баласту, то чим ближчий до одиниці  $m$ , тим краще. Однак на практиці необхідно враховувати і інші фактори, які розглянуті нижче.

На рис. 4.10 наведені залежності зсуву фаз, коефіцієнтів потужності схеми і лампи від коефіцієнта  $m$ . Їх аналіз свідчить, що із збільшенням відносної напруги горіння зсув фаз зменшується. Завдяки цьому покращується коефіцієнт потужності схеми. Коефіцієнт потужності лампи погіршується внаслідок спотворення струму лампи.

На рис. 4.11 показані залежності коефіцієнтів форми струму і напруги та коефіцієнтів амплітуди струму і напруги. Вони вказують, що форма напруги майже не змінюється, а форма струму значно спотворюється, оскільки амплітуда струму приймає великі значення і коефіцієнт амплітуди змінюється у широкому діапазоні.

На рис.4.12 показана залежність коефіцієнта чутливості потужності  $\lambda_{I_\Lambda U_{ж}}$  від коефіцієнта  $m$ . Наведені вище характеристики кола досліджені для змін коефіцієнта  $m$  за рахунок зміни напруги живлення.

Іншим поширеним типом баласту є індуктивно-ємнісний баласт (рис. 4.13). Система диференціальних рівнянь, яка описує наведене коло, має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{R_{cT}U_{ж} - R_{cT}U_c - (R_M + G_\Lambda^{-1})i_L R_{cT}}{L(R_M + R_{cT} + G_\Lambda^{-1})} \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{U_{ж} - U_c + R_{cT}i_L}{C(R_M + R_{cT} + G_\Lambda^{-1})} \\ \frac{dG_\Lambda}{dt} = A(i_\Lambda^2 - U_\Lambda^2 G_\Lambda^2) \end{cases} \quad (4.12)$$

На рис. 4.14 зображені залежності напруги на дроселі, а на рис.4.15- залежності реактивної потужності баласту для змін коефіцієнта  $m$ . Їх аналіз показує, що напруга на дроселі  $U_{дp}$  і відповідно  $U_{дp}I_\Lambda$  зменшується із збільшенням коефіцієнта  $m$ , а величини  $U_c$  та  $U_c I_\Lambda$  практично не змінюються.

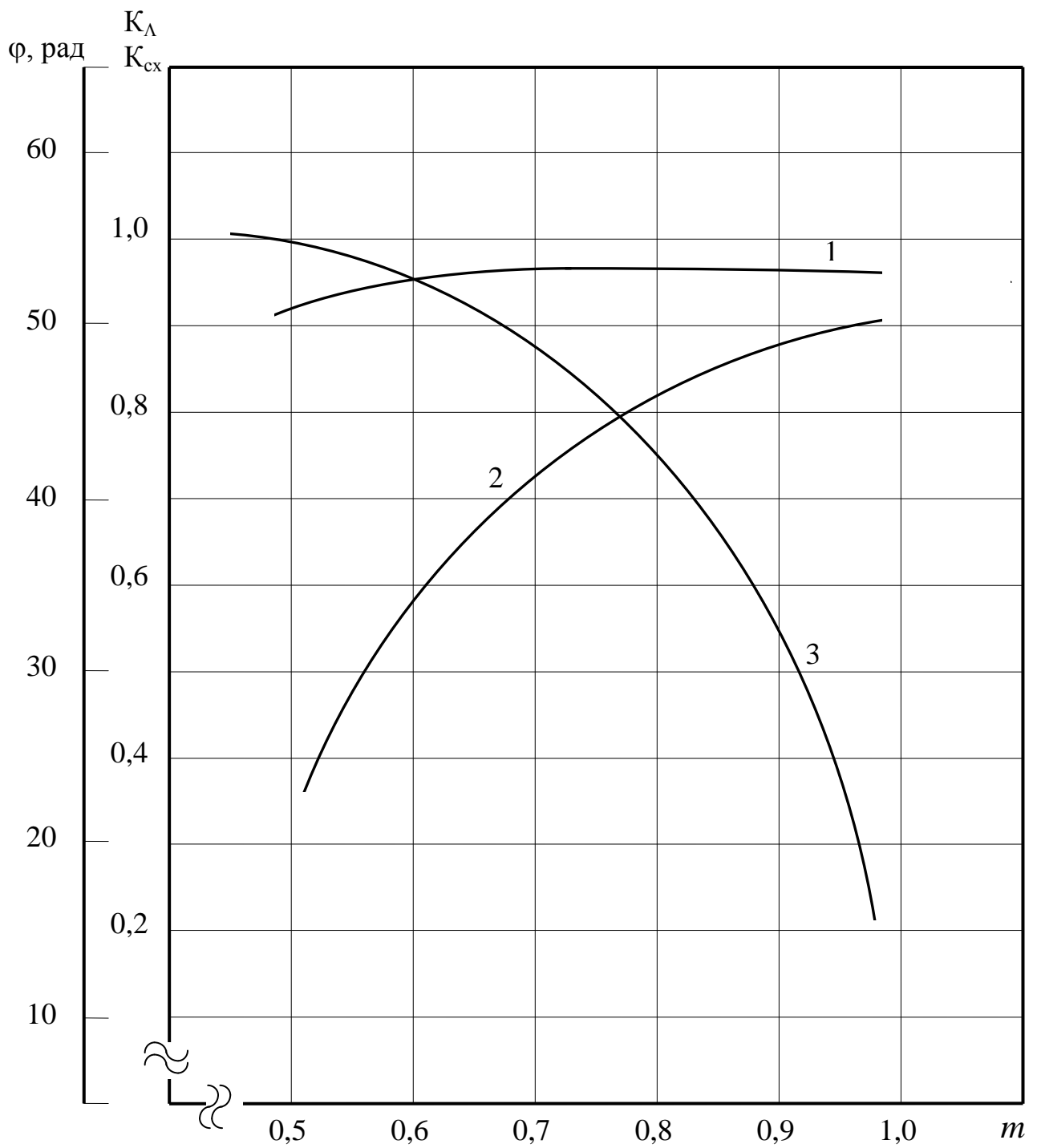


Рис. 4.10. Залежність кута зсуву фаз і коефіцієнта потужності від  $m$ :  
1-  $K_{\Lambda}$ , 2 -  $K_{cx}$ , 3 -  $\varphi$

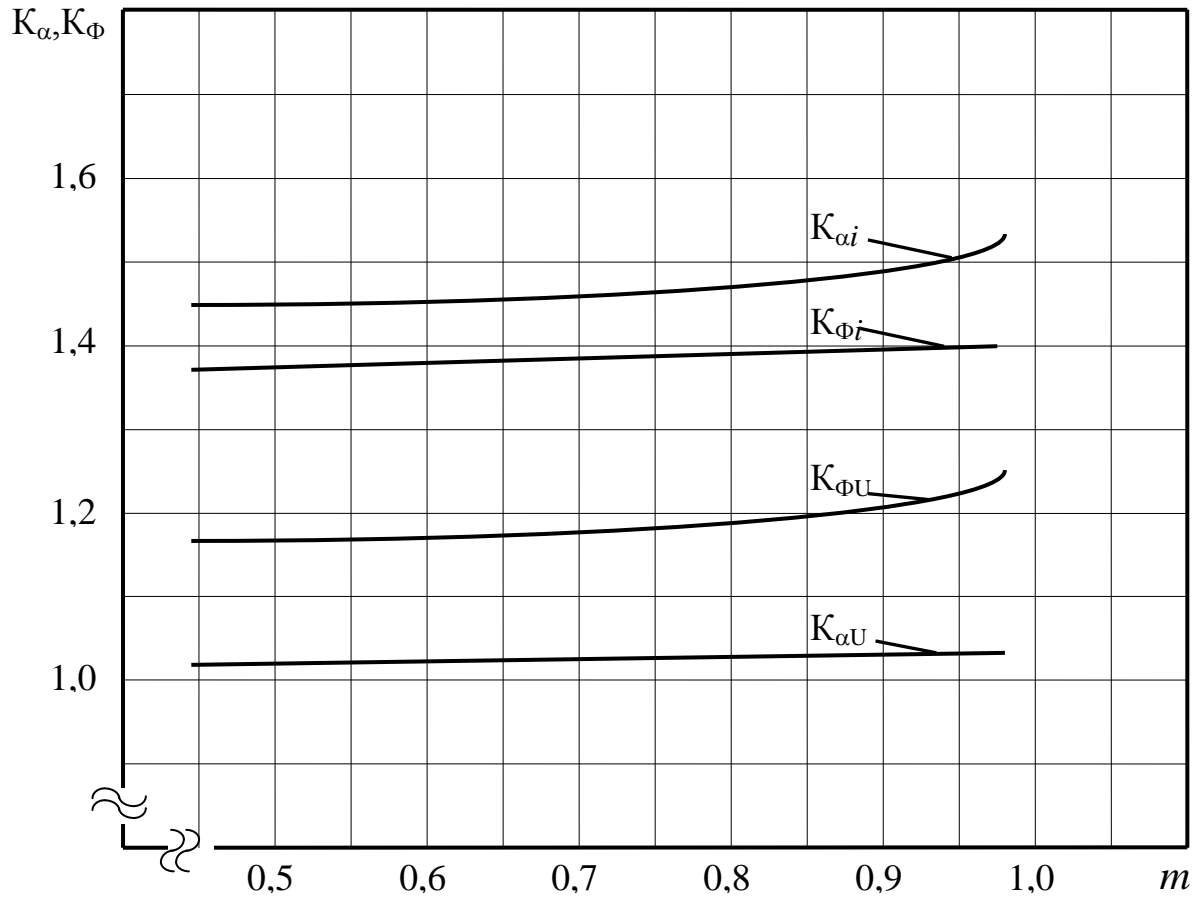


Рис. 4.11. Залежність коефіцієнтів амплітуди і коефіцієнтів форми струму та напруги від відношення  $U_A/U_0$

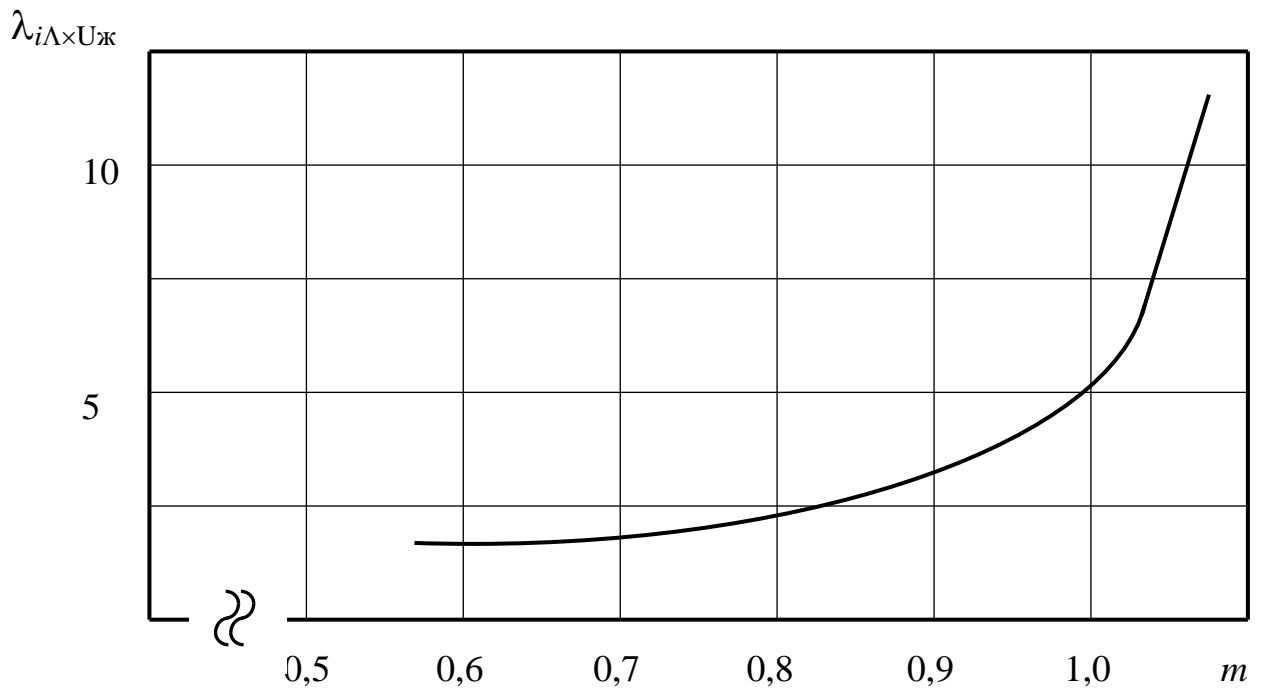


Рис. 4.12. Залежність коефіцієнта чутливості струму від відношення  $U_A/U_0$

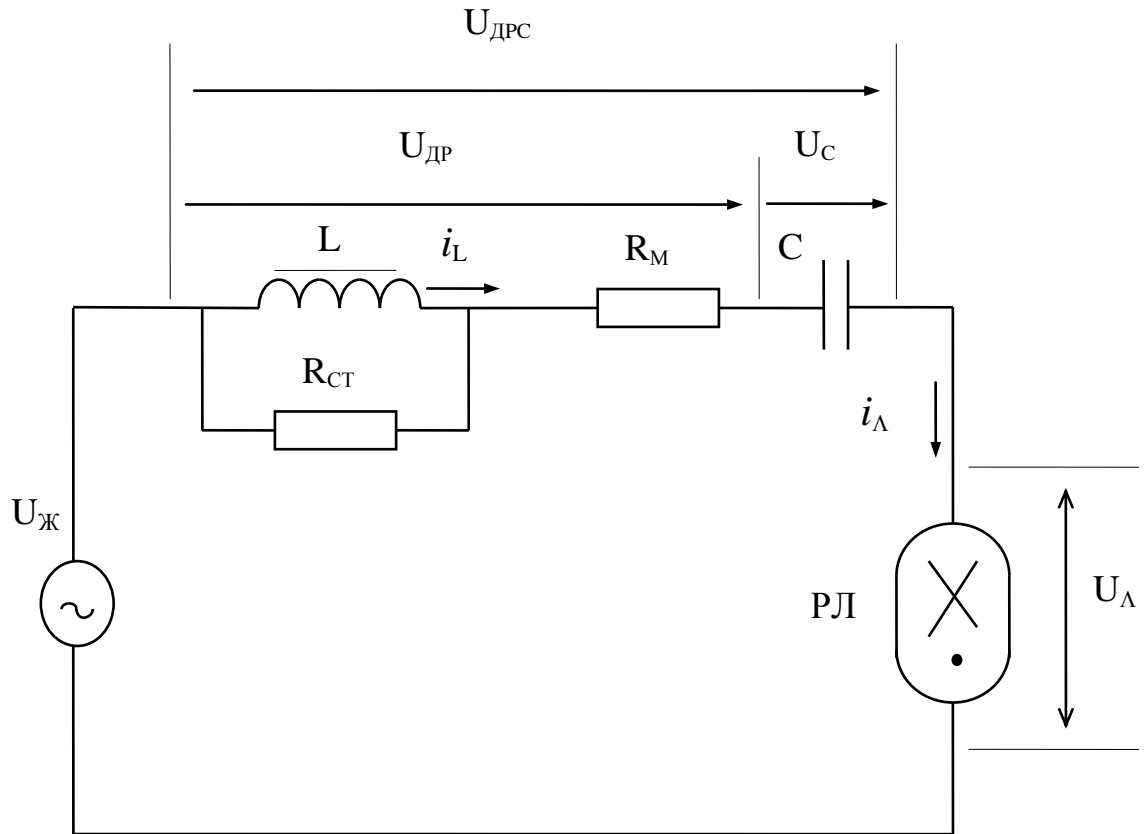


Рис. 4.13. Розрахункова еквівалентна схема кола з комплектом  
 ”індуктивно-ємнісний баласт - розрядна лампа”.

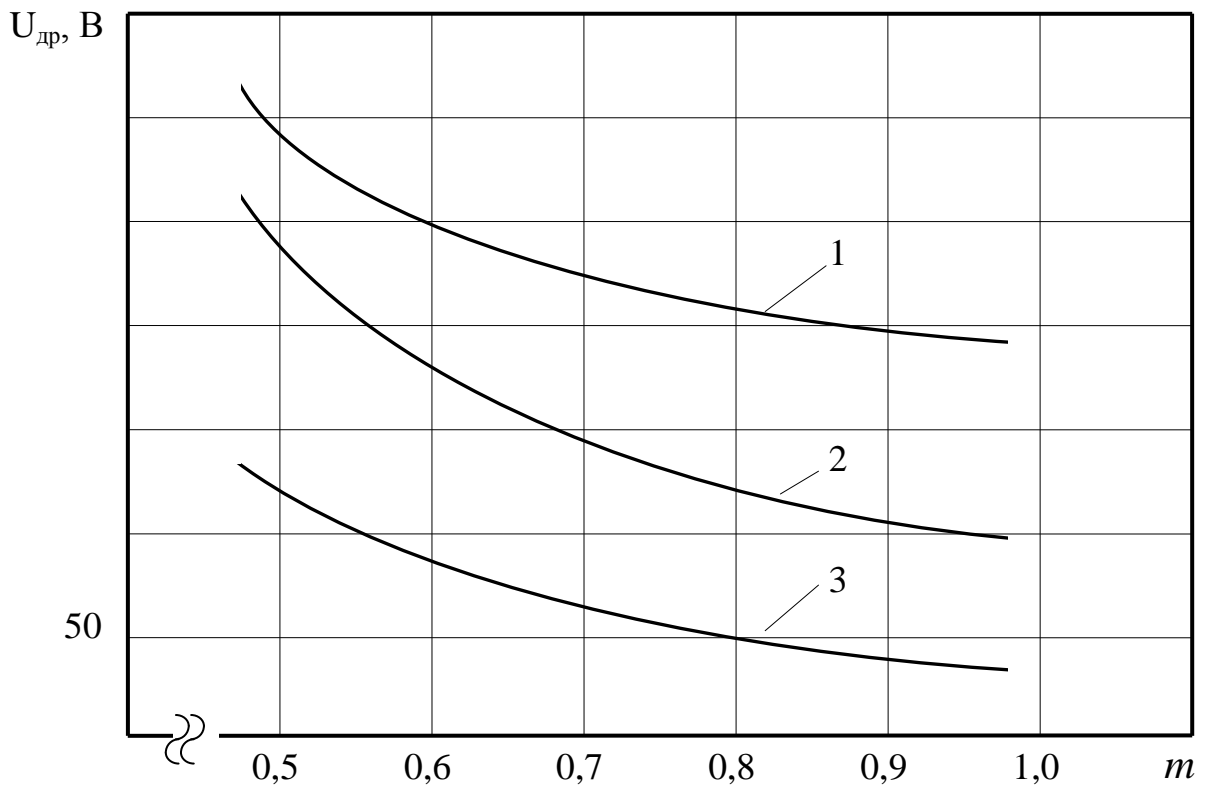


Рис. 4.14. Залежність напруги на дроселі від відношення  $U_A/U_0$  для різних значень ємності конденсатора  
1 - 15 мкФ, 2 - 24 мкФ, 3 - 30 мкФ

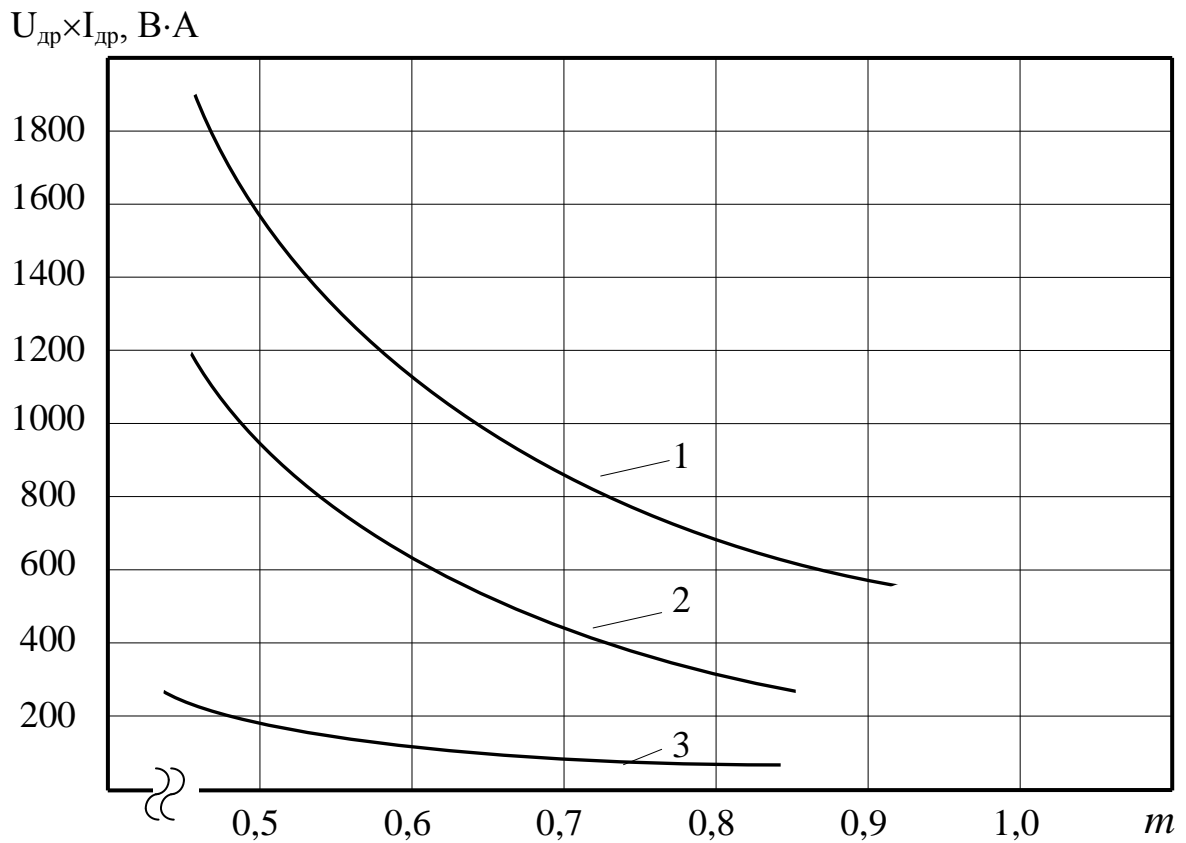


Рис. 4.15. Залежність потужності дроселя від відношення  $U_A/U_0$  для різних значень ємності конденсатора  
1 - 15 мкФ, 2 - 24 мкФ, 3 - 30 мкФ



Проведений комплекс вимірювань з вивчення впливу відносної напруги горіння на параметри комплексу ПРА - РЛ дає можливість шляхом моделювання визначити їх оптимальні співвідношення. Це сприяє значному скороченню експериментальних робіт при розробці нових виробів. Однак ще ширші можливості надає пропонований метод аналізу для дослідження нестационарних режимів роботи РЛ, оскільки проведення аналогічних робіт іншими методами утруднений.

#### 4.3. Ефективні параметри кіл з розрядними лампами високого тиску в режимі розгоряння

Широко використовувані методи розрахунку електричних кіл з РЛ забезпечують похибку  $\pm 3 \dots 4\%$  лише для ustalених номінальних режимів. Тому аналіз і розрахунок аномальних режимів, які мають місце в основному під час розгоряння МГЛ, практично не проводився. Ним часто нехтували внаслідок короткочасності аномальних режимів. У зв'язку з тим, що в цей час параметри суттєво відрізняються від номінальних, такий режим значно впливає на робочі характеристики РЛ. Тому аналіз процесів, які відбуваються під час режиму розгоряння і вироблення на його основі відповідних рекомендацій має велике значення для розробки, конструювання і експлуатації МГЛ та ПРА.

Під час режиму розгоряння мають місце кілька стадій горіння розряду. Перехід розряду з однієї стадії на іншу відбувається в залежності від стану електродів, зокрема їх температури, наявності забруднень, прикладеної напруги, тиску парів, тощо. Для аналізу процесів на інтервалі перехідного режиму необхідно враховувати в динаміці баланс енергії на електродах і в стовпі розряду, швидкість і характер випаровування отруйовальних речовин з електродів, прикатодні явища, процеси іонізації та деіонізації. Однак внаслідок відсутності на сьогодні достатньої інформації про вказані явища розв'язок цієї задачі утруднений. Тому пропонується аналіз режиму розгоряння проводити

роздільно на кожній стадії. Перехід від стадії до стадії здійснюється шляхом задання у вихідних даних параметрів, які характеризують певну аналізовану стадію. Це дозволяє дослідити кожну стадію і таким чином отримати повну картину згаданого режиму.

Параметром, який в достатній мірі відображає процеси, що відбуваються в РЛ на певній стадії, є напруга горіння розряду. Її можна визначити експериментальним шляхом. Цей аналіз здійснюється по схемі (рис. 4.1) і за системою рівнянь (4.9). Використовуючи останню для аналізу різних стадій роботи РЛ в перехідному режимі, необхідно приймати усталену напругу горіння згідно з видом розряду, який має місце під час даної стадії.

На стадії тліючого розряду напруга горіння становить 130 ... 150 В. Це зумовлено загалом великим катодним спадом. На рис. 4.16 наведені осцилограми струму лампи і напруги на ній, отримані в результаті моделювання. Їх аналіз свідчить про задовільний збіг з експериментальними даними. Проте є деяка відмінність за формою напруги на лампі, що обумовлено недостатньою адекватністю моделі МГЛ для тліючого розряду.

Несиметричне горіння розряду має місце протягом двох стадій. Враховуючи, що стадія тригерних переходів якісно подібна до стадії несиметричного горіння і відрізняється лише нестійкістю існування, обмежимося моделюванням несиметричного розряду. Для цього слід приймати в один з півперіодів напругу горіння, яка характерна для тліючого розряду, а в інший - для дугового розряду. На рис. 4.17 показані розрахункові осцилограми електричних параметрів кола для несиметричного горіння розряду.

За результатами моделювання на рис. 4.18, 4.19 зображені залежності амплітудних значень струму контура для різних рівнів асиметрії динамічної ВАХ лампи і коефіцієнтів нелінійності баластного дроселя, розрахункові часові діаграми струму кола для різних коефіцієнтів нелінійності баластного дроселя. З отриманих даних випливає, що для зменшення аномальних струмів під час розгоряння лампи бажано застосовувати дросель з лінійною ВАХ. Однак

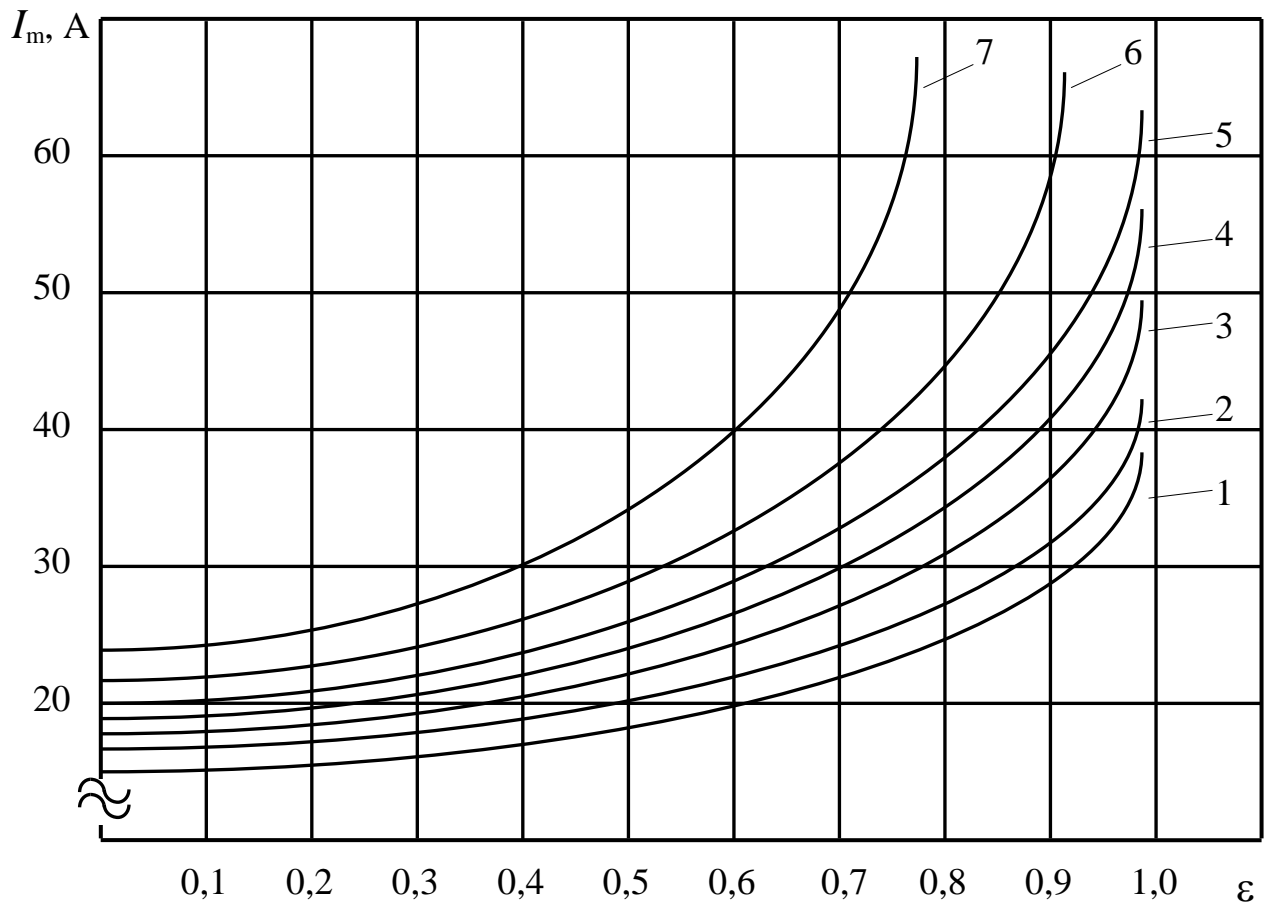


Рис. 4.18. Залежність амплітудного значення струму в контурі ”ДРИ-700 - баластний дросель” при різних рівнях асиметрії динамічної ВАХ лампи і коефіцієнта нелінійності баластного дроселя  $K_\sigma$

1 -  $K_\sigma = 0,07$ , 2 -  $K_\sigma = 0,10$ , 3 -  $K_\sigma = 0,16$ , 4 -  $K_\sigma = 0,27$ , 5 -  $K_\sigma = 0,38$ ,

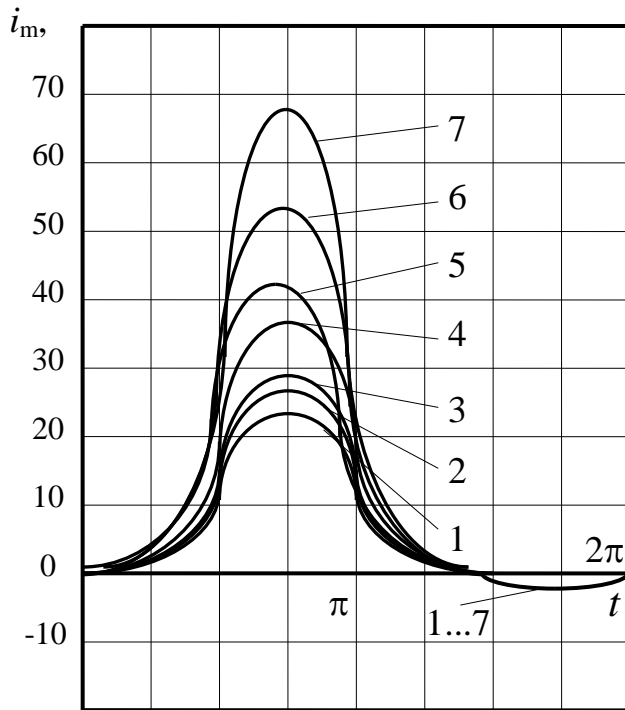
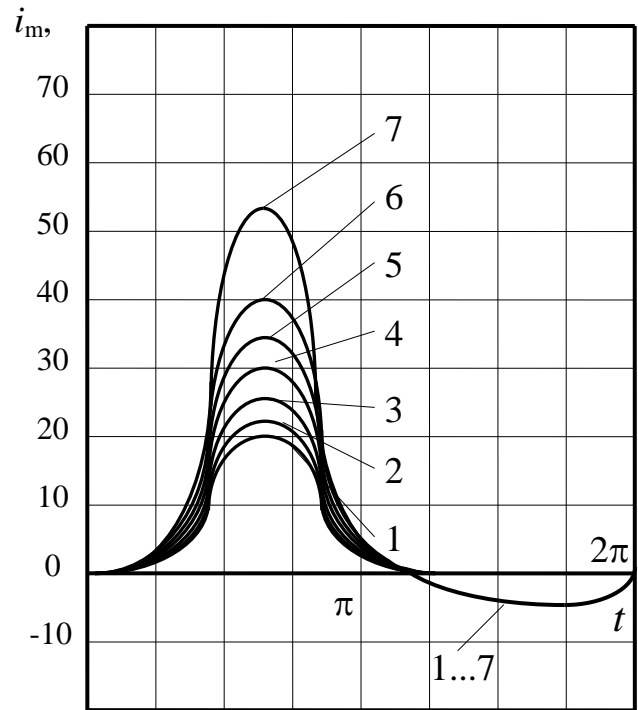
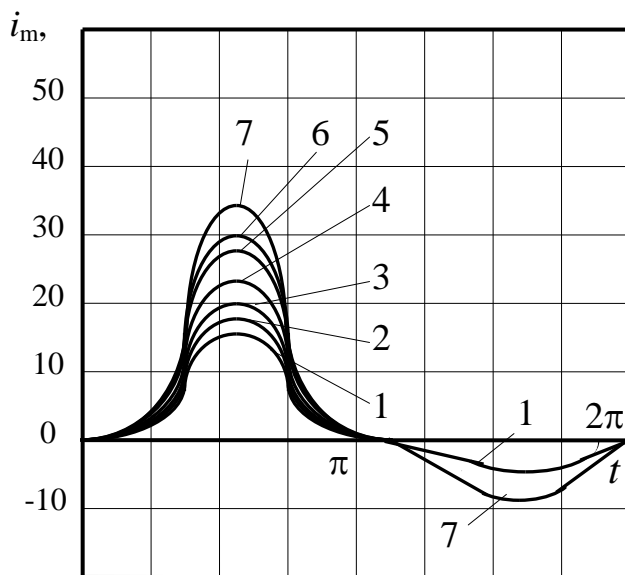
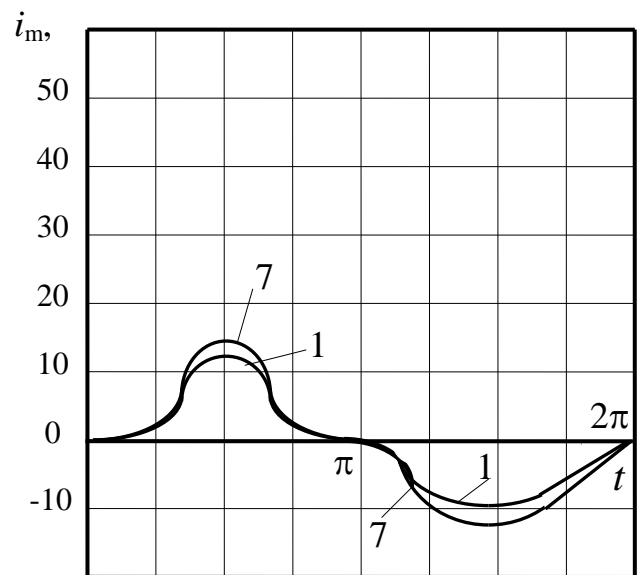
а)  $\varepsilon=0,82$ б)  $\varepsilon=0,67$ в)  $\varepsilon=0,43$ г)  $\varepsilon=0,01$ 

Рис. 4.19. Розрахункові часові діаграми струму в контурі ДРИ-700 - баластний дросель при різних коефіцієнтах нелінійності баластного дроселя

- 1)  $K_{\sigma} = 0,07$ ;    2)  $K_{\sigma} = 0,10$ ;    3)  $K_{\sigma} = 0,16$ ;    4)  $K_{\sigma} = 0,27$ ;  
 5)  $K_{\sigma} = 0,38$ ;    6)  $K_{\sigma} = 0,70$ ;    7)  $K_{\sigma} = 1,84$

виконання даної вимоги викликає суттєве збільшення масо-габаритних показників дроселя.

На стадії симетричного дугового розряду в режимі розгоряння відбувається поступове підвищення напруги горіння і зменшення струму до номінальних значень (рис. 4.20). Даний метод аналізу дає можливість здійснити перевірку розглянутих методів усунення аномальних режимів під час розгоряння. Одним з них є застосування баластного дроселя, розрахованого на середню квадратичну напругу 380 В, так званого лінійного дроселя. На рис. 4.21 наведені розрахункові часові діаграми струму контура з лампою типу ДРИ - 700 і лінійним дроселем. Їх аналіз показує, що кидки струму з лінійним дроселем значно менші за амплітудою. Цього досягнуто вибором робочої точки ВАХ дроселя на лінійній ділянці. Аналогічно впливає під'єднання в послідовне коло резистора з метою збільшення ступеня загасання струмів перехідних процесів (рис. 4.22). Спосіб значно економічніший за попередній. Однак його реалізація пов'язана з певними труднощами, які виникають під час вимкнення резистора.

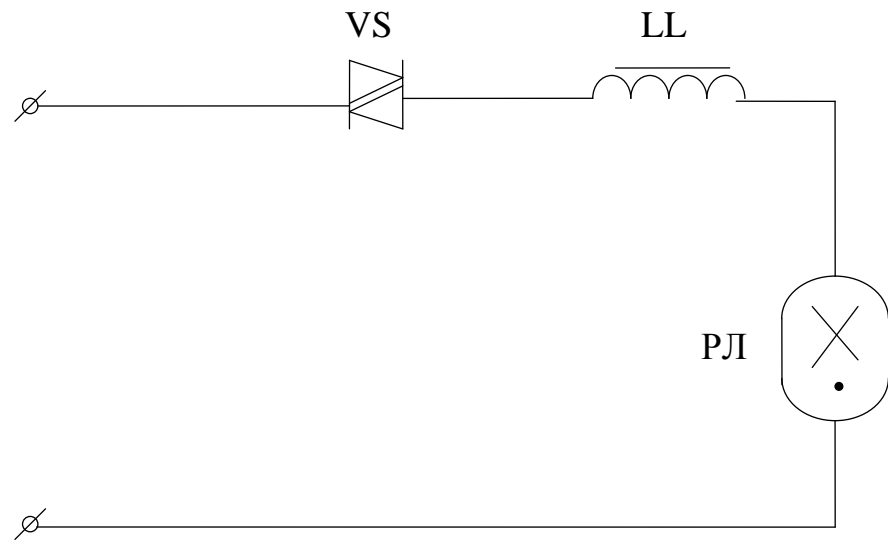
Для моделювання кола, яке реалізує запропонований нами метод усунення аномальних струмів шляхом вимушеного симетрування розряду, в систему (4.9) необхідно ввести модель симистора. Відомо досить багато математичних моделей симистора які відрізняються за принципом побудови і складністю. У даному випадку доцільно застосувати подання симистора резистором, опір якого приймає різні значення відповідно до стану симистора. Прийmemo, що опір симистора у відкритому стані становить 0,12 Ом, а в закритому - 100 КОм. Наведені на рис.4. 23 розрахункові осцилограми свідчать про хороше співпадання розрахункових і експериментальних даних. Деяка розбіжність результатів пояснюється тим, що в реальній схемі відбувається безперервна, а не дискретна зміна характеристик і процесів у лампі та колі під дією вимушеного симетрування. Однак це не спотворює загальну уяву про хід

розвитку розряду. Приклад конкретного пристрою для усунення аномальних струмів шляхом примусового симетрування розряду наведений нижче.

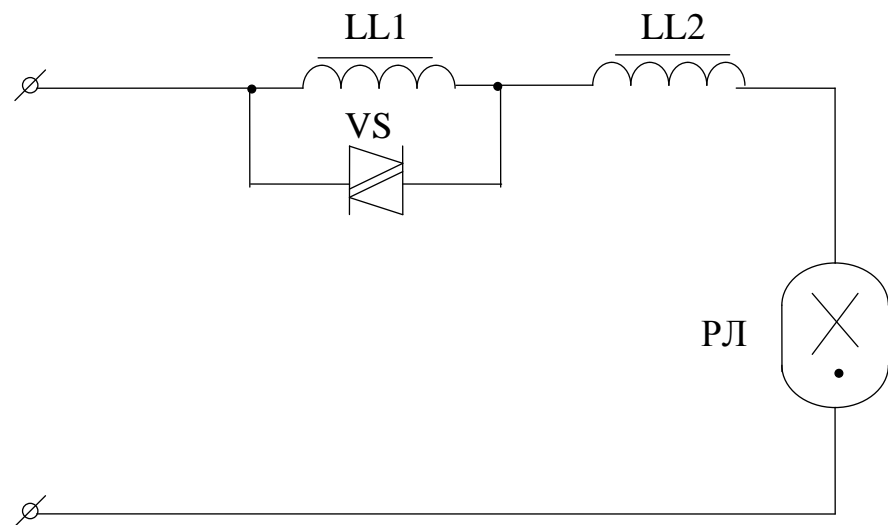
#### 4.4. Гібридні пускорегулювальні апарати для високоінтенсивних джерел світла

Намагання зменшити втрати в баластному дроселі і скоротити витрати на нього активних матеріалів привели до створення симисторно - індуктивних ПРА, які отримали назву гібридних. При цьому відносна складність і вища вартість гібридних баластів окупуються зменшенням масо-габаритних показників ПРА, збільшенням коефіцієнта потужності і можливістю регулювання світлового потоку. Крім цього, за допомогою гібридних ПРА можна усунути аномальні струми під час розгоряння МГЛ, що дозволяє суттєво, на 20%, збільшити термін служби лампи.

Відомі два способи ввімкнення симистора відносно дроселя: паралельний і послідовний (рис. 4.24). В послідовній схемі (рис. 4.24 а) при ввімкненні симистора в момент, який відповідає природньому перезапалюванню лампи, робота РЛ не відрізняється від роботи в номінальному режимі. При цьому кут відкриття симистора є мінімально можливий, інакше лампа загасне. При збільшенні кута відкриття лампа перезапалюється в момент відкриття симистора і у кривій струму виникає пауза. Це викликає зменшення амплітуди струму. Змінюючи кут відкриття симистора, можна плавно регулювати струм лампи. Однак, характерна для такого режиму пауза струму обмежує діапазон регулювання. Для його збільшення подаються або високочастотні імпульси, які підтримують чергову дугу під час паузи, або імпульс підпалу в момент перезапалювання лампи. На відміну від схем з ЛЛ в схемах з РЛВТ, особливо з МГЛ, є низка специфічних особливостей. Насамперед це пов'язане із загасанням лампи для певної тривалості паузи струму. Тому для розробки відповідних пристроїв необхідно визначити перед усім допустимі кути ввімкнення (фазовий відтин) ключового елемента.



а)



б)

Рис. 4.26. Схема ввімкнення симистора в колі з РЛ  
а) послідовно, б) паралельно

При паралельному ввімкненні баласт у більшості випадків складається з двох компонентів (рис.4.24 б). Дросель LL1 має велику індуктивність і використовується для обмеження струму, а дросель LL2 - малу індуктивність і застосовується для обмеження швидкості наростання струму. Осцилограми, які характеризують роботу таких схем, показані на рис. 4.25. На інтервалі  $\varphi_1 - \varphi_2$  струм малий, оскільки обмежується двома дроселями. Після подачі в момент  $\varphi_2$  імпульсу керування симістор відкривається і протягом інтервалу  $\varphi_2 - \varphi_3$  шунтує дросель LL1. Тоді струм кола обмежується лише дроселем LL2. Шляхом зміни моменту ввімкнення можна стабілізувати і регулювати режим роботи РЛ, що реалізується завдяки введенню зворотніх зв'язків за струмом, напругою на лампі, світловим потоком, тощо, або кіл задання часу. Однак відомі схеми призначені лише для регулювання яскравості, потужності тощо, але ні одна з них не передбачає усунення аномальних струмів під час розгоряння МГЛ.

Нами запропонований метод повного усунення аномальних струмів шляхом вимушеного симетрування розряду. На рис 4.26 показана схема розробленого одного з варіантів гібридного ПРА, який реалізує такі функції: стабілізація струму РЛ, запалювання лампи, усунення явища несиметрії в період розгоряння, припинення подачі імпульсів підпалу для несправної лампи або її відсутності в цоколі. Схема містить джерело живлення змінного струму, послідовно з'єднані дросель, РЛ і симістор, які утворюють основну електричну схему. Вибір діапазону кутів відкриття симістора обумовлено:

- умовою запобігання виникненню перехідних процесів під час розгоряння лампи;
- усуненням можливості загасання лампи;
- формуванням високовольтних імпульсів для запалювання лампи.

Для виконання першої умови згідно зі встановленим нами раніше необхідно, щоб кут перезапалювання в режимі несиметричної стадії горіння становив приблизно  $90^\circ$  і  $270^\circ$ . Друга умова виконується, якщо кут вимушеного



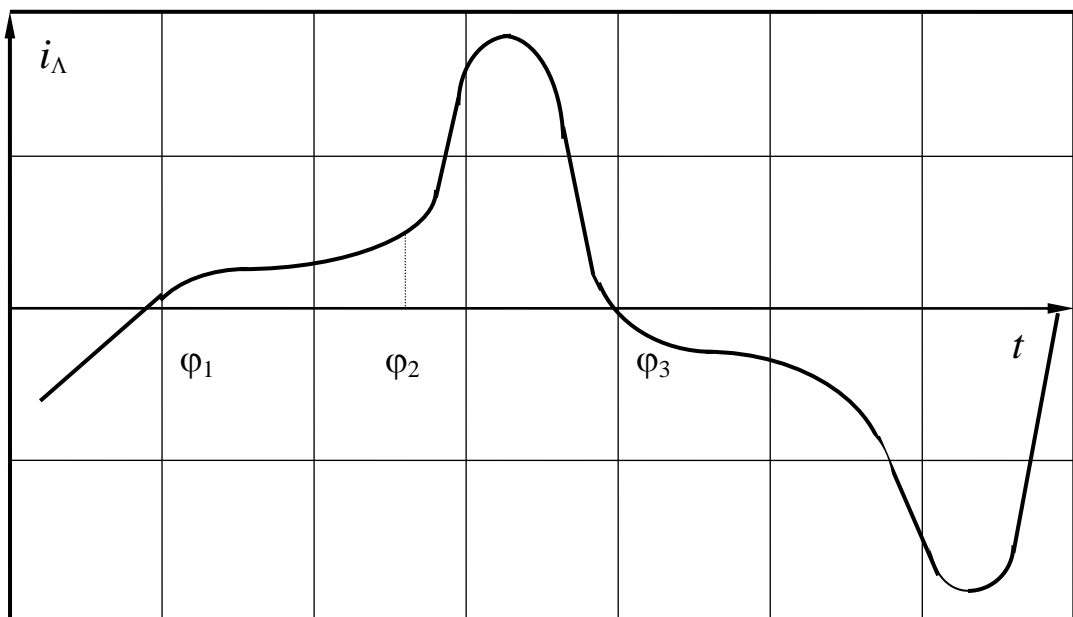
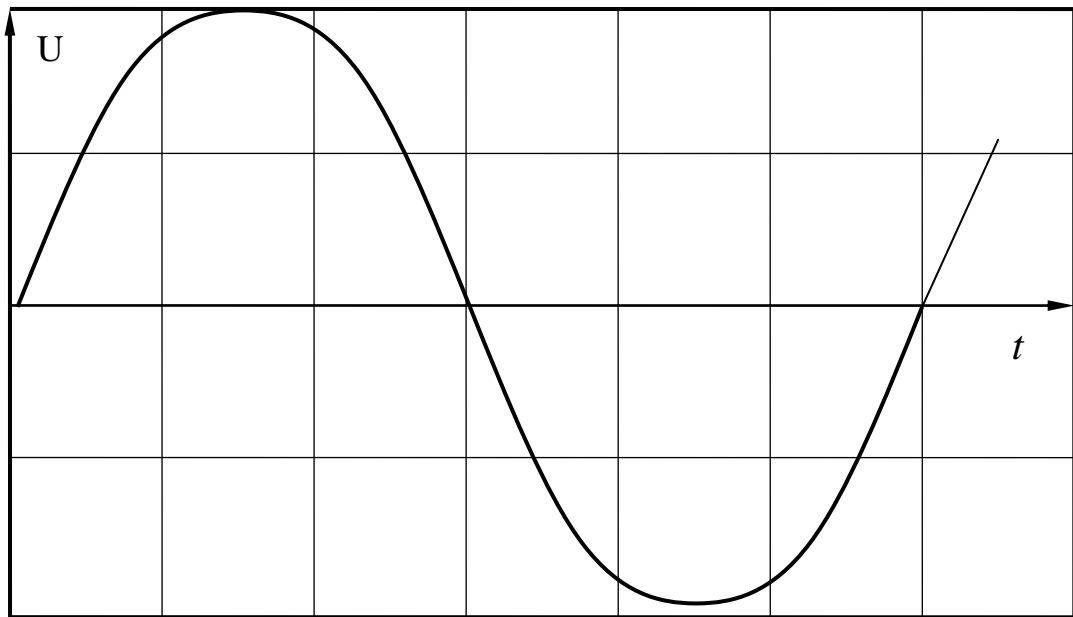


Рис. 4.25. Осцилограми струму та напруги, які характеризують роботу схеми рис. 4.24б

перезапалювання більший, ніж максимально можливий природний кут перезапалювання на цьому етапі горіння. Тобто перевищує  $90^\circ$  - кут перезапалювання дугового розряду після пробою.

У результаті проведених нами експериментальних досліджень встановлено, що в процесі розгорання, зокрема в першій його половині, МГЛ може працювати в режимі, якому притаманна значна пауза струму як в період тліючого, так і дугового розрядів.

Для надійного запалювання лампи необхідно подати на неї високовольтний імпульс поблизу максимуму миттєвої напруги живлення, тобто для фазового кута  $60 \dots 90^\circ$ . Для формування високовольтного імпульсу нами використаний процес заряду конденсатора від джерела напруги змінного струму. Симистор тут виконує функцію ключового елемента в колі заряду накопичувального конденсатора (рис. 4.27).

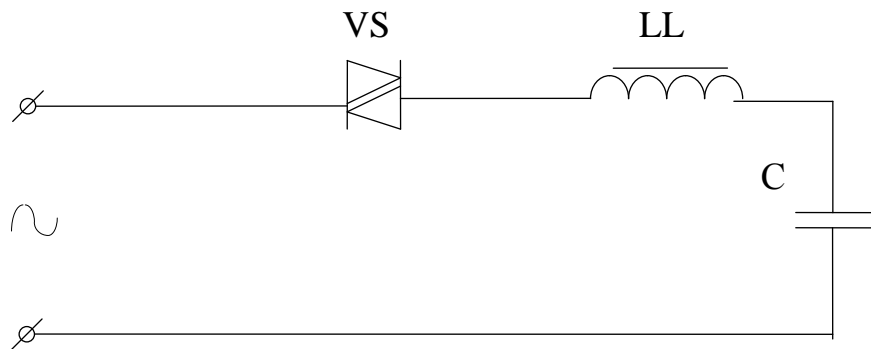


Рис. 4.27. Зарядний контур в схемі рис. 4.26

Максимальна напруга на конденсаторі має місце при під'єднанні до джерела живлення, якщо  $\varphi = \{90^\circ; 270^\circ\}$ . Напруга на конденсаторі дорівнює:

$$U_c = U_m \left( \sin(\omega t + \varphi) - \sin \varphi \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right), \quad (4.13)$$

де  $U_m$  - амплітудне значення напруги живлення.

В ідеальному випадку контура без втрат напруга на конденсаторі може досягти подвійного амплітудного значення напруги живлення. Змінюючи ємність накопичувального конденсатора і коефіцієнт трансформації баласту - трансформатора, можна отримати імпульс потрібних амплітуди і тривалості (рис. 4.28).

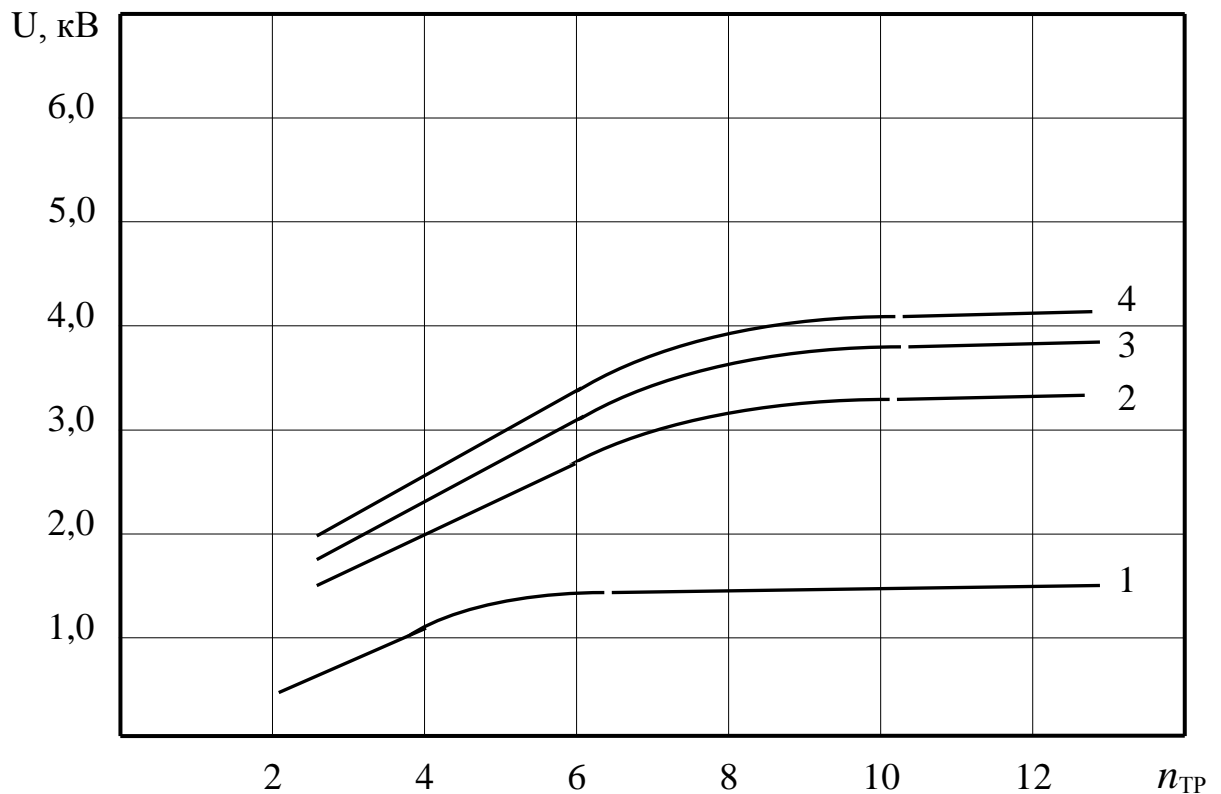


Рис. 4.28. Залежність довжини і амплітуди імпульсів підпалу від коефіцієнта трансформації дроселя для різних значень ємності конденсатора

1 - 0,1 мкФ, 2 - 0,22 мкФ, 3 - 0,47 мкФ, 4 - 0,5 мкФ

Таким чином, з вищевикладеного випливає, що кут відкриття симистора початково повинен становити  $93^\circ \dots 100^\circ$ . Завдяки цьому усувається виникнення аномальних струмів РЛ і формуються високовольтні імпульси підпалу. Форма напруги на конденсаторі ідентична формі напруги на лампі, оскільки баластний дросель з відгалуженням виконує функцію імпульсного підвищувального трансформатора (рис. 4.29). Тому аналізувати процеси, які відбуваються в колі, зручно з використанням осцилограм напруги на конденсаторі і струму лампи (рис. 4.30, 4.31). В момент часу  $t_0$  релаксаційний генератор формує імпульс керування, який має фазовий кут  $93^\circ \dots 100^\circ$ . Під дією сигналу керування відбувається відкриття симистора і під'єднання конденсатора через первинну обмотку дроселя - трансформатора до змінної напруги. Виникає перехідний процес з кидком напруги на конденсаторі, яка дорівнює приблизно подвійному амплітудному значенню напруги живлення. Як тільки струм кола стає менший, ніж струм утримання симистора, останній закривається. Напруга на конденсаторі в цей момент ще перевищує миттєву напругу живлення. З цього моменту конденсатор під'єднаний до кола з великою постійною часу. Тому загасання відбувається повільніше до моменту  $t_2$ , в який релаксаційний генератор формує імпульс синхронізації. При поданні цього імпульсу відбувається повторне відкриття симистора і напруга конденсатора зменшується до миттєвої напруги живлення. Після закриття симистора в момент  $t_3$  конденсатор розряджається з великою постійною часу до моменту  $t_4$ , в який відбувається перезаряд конденсатора. В подальшому процес повторюється.

Пропонований метод запалювання в порівнянні з традиційними має такі переваги:

- імпульс підпалу формується в обидва півперіоди напруги живлення;
- тривалість імпульсу значно більша і становить  $15 \dots 20$  мкс;
- напруга в перший момент після пробою суттєво перевищує напругу живлення, що сприяє успішному розвитку розряду в лампі.

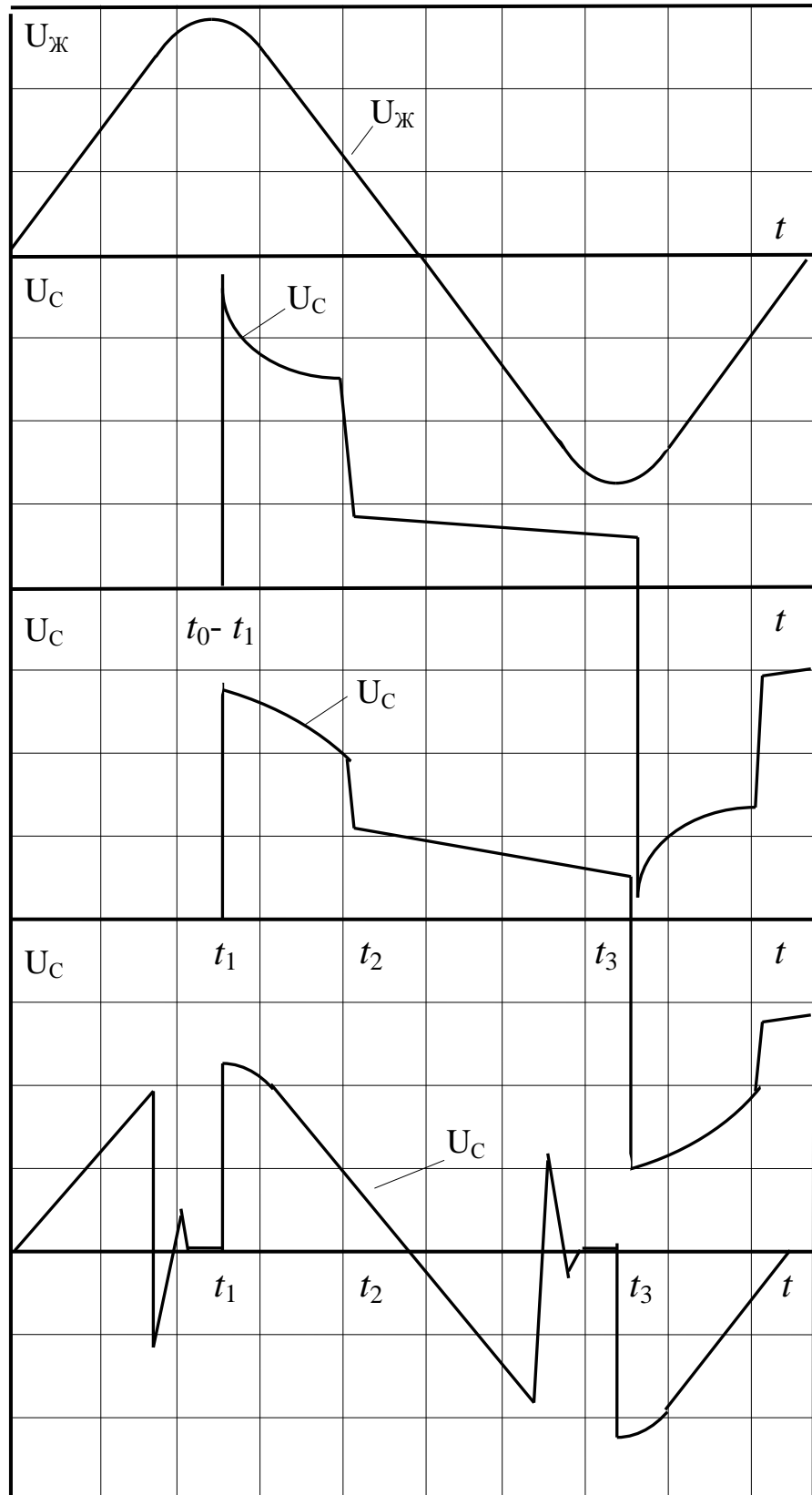


Рис. 4.29. Осцилограмми напруги на конденсаторі  $C_4$  (рис.4.26)

$M_t = 2$  мс/под,  $M_U = 120$  В/под.

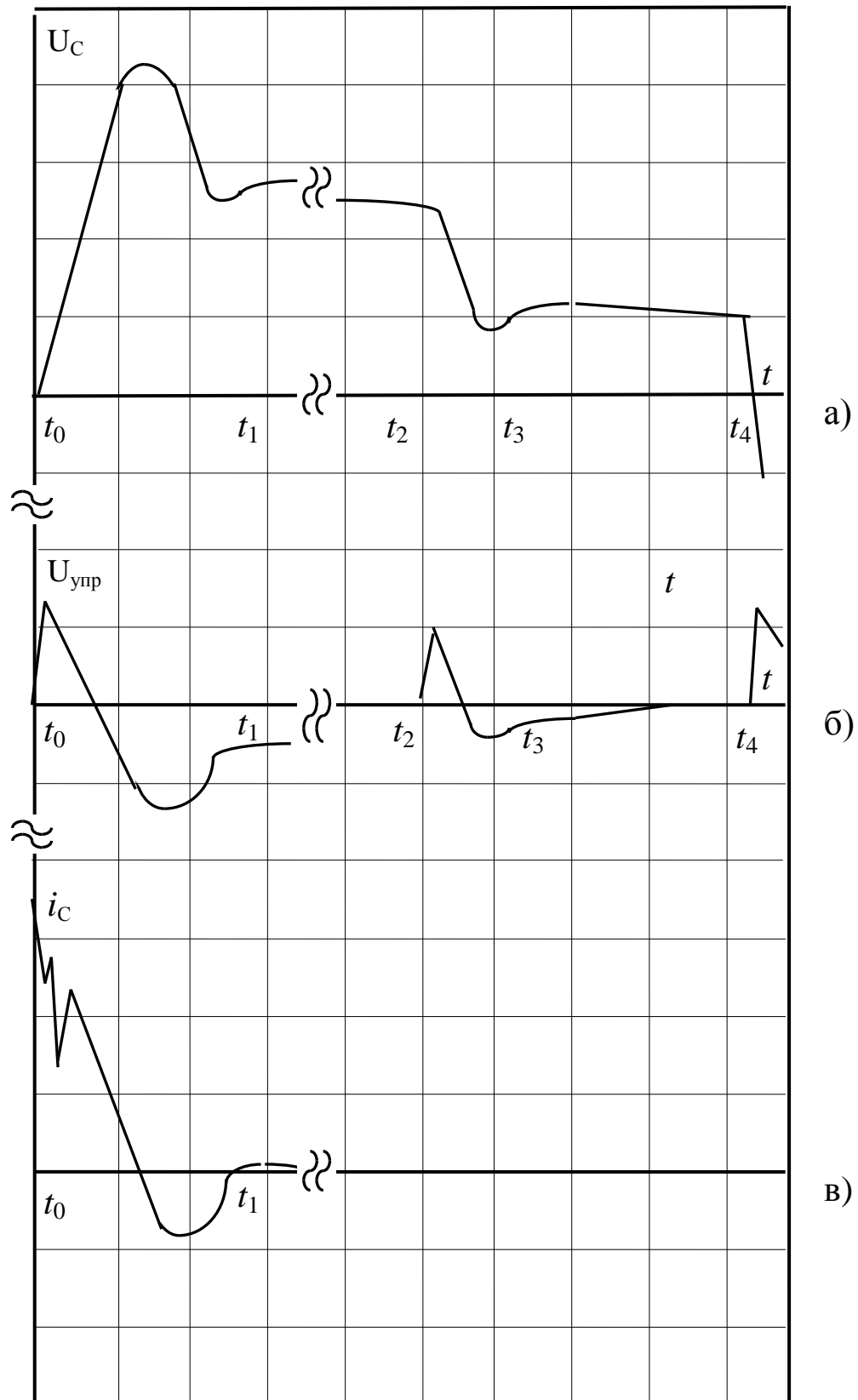


Рис. 4.30. Форма напруги та струму на конденсаторі  $C_4$  (рис.4.26)  
 $M_t = 20$  мкс/под.,  $M_{U_C} = 120$  В/под.,  $M_{U_{упр}} = 1$  В/под.,  $M_{i_C} = 0,5$  А/под.

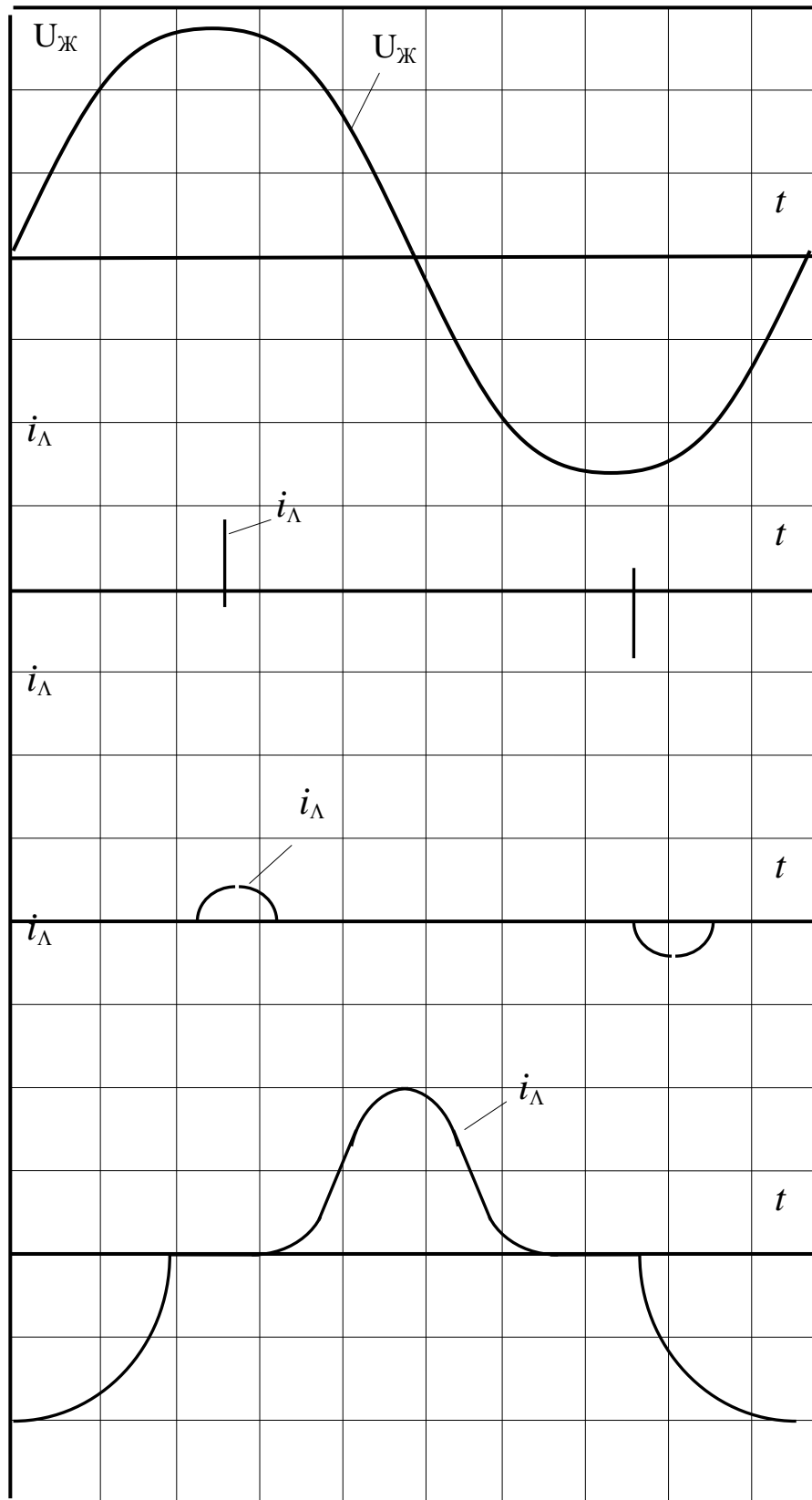


Рис. 4.31. Осцилограми струму МГЛ в режимі розгоряння з гібридним  
 ПРА :  $M_t = 2$  мс/под,  $M_U = 120$  В/под,  $M_i = 0,5$  А/под

Вказані особливості покращують запалювання РЛВТ. Надійність роботи пристрою в значній мірі визначається схемою керування, до якої ставляться такі вимоги: вироблення сигналів керування симистором, сигнал керування повинен бути достатнім для надійного ввімкнення симистора в будь-яких можливих режимах роботи. В цей же час не можна перевищити допустиму потужність розсіювання в колі електрода керування симістора. Важливою вимогою до кіл керування є можливість роботи фазорегулювального елемента для широкої зміни навантаження від холостого ходу, коли лампа не горить, до номінального. Схема керування не повинна створювати помітного струму витоку для закритого симистора, видавати сигналів помилкових ввімкнень. У схемі передбачений універсальний вхід, що допускає керування від будь-якої системи безконтактних логічних елементів. Низьковольтні кола логічних елементів не зв'язані електрично з силовими колами. Кола керування прості та надійні в експлуатації.

Оскільки під час розгоряння МГЛ кут перезапалювання змінюється, то в схемі застосоване подвійне керування симистором. Спочатку на нього подаються сигнали керування в діапазоні кутів  $93 \dots 100^\circ$ . Для уникнення погасання лампи у випадку неспівпадання моменту подання сигналу керування і моменту перезапалювання сигнал керування подається з деякою затримкою відносно моменту перезапалювання. Остання забезпечує невелику паузу струму, яка становить  $3 \dots 8^\circ$ .

З метою забезпечення номінального режиму роботи лампи без пауз струму для керування симистором використана схема, принцип якої ґрунтується на залежному відкриванні симистора. Для цього електрод керування з'єднаний з анодом через резистор за допомогою контактів. При цьому потужність розсіювання в колі керування невелика. Цього досягнуто шунтуванням кола керування в кожний півперіод напруги живлення після відкриття симистора, в результаті чого струм по ньому не протікає до кінця півперіоду. Струм електрода керування на початку кожного півперіоду має



форму коротких імпульсів. У коло керування введений резистор  $R_{11}$  для обмеження потужності розсіювання. Якщо його опір збільшувати, то симистор відкриватиметься з деякою затримкою в часі по відношенню до початку кожного півперіоду. Вибір опору обмежувального резистора визначається, виходячи із співвідношень:

$$R_{11} \geq \frac{\sqrt{2}U_{ж}}{I_{к, \max}} - R_{н} , \quad (4.14)$$

$$t_i = \frac{1}{\omega} \arcsin \left( \frac{I_{к, \max} (R_{11} + R_{н})}{\sqrt{2}U_{ж}} \right) , \quad (4.15)$$

де  $I_{к, \max}$  - максимально допустимий струм керування симистором,  $R_{н}$  - опір навантаження.

При спрацюванні реле  $P$ , що визначається витримкою часу, релаксаційний генератор припиняє генерувати імпульси керування. Тому запропонована схема виконує функцію пристрою вимкнення. Для випадку дефектної лампи, або її відсутності, пристрій припиняє генерацію високовольтних імпульсів через проміжок часу, який визначається витримкою реле часу. Цим досягається значне зменшення рівня радіозавад і підвищення надійності виробів. Запропонована схема гібридного ПРА забезпечує надійне запалювання, усунення аномальних струмів періодичних перехідних процесів, можливість регулювання потужності, стабілізацію струму лампи і може бути рекомендована в якості індивідуального ПРА в схемах живлення МГЛ. Однак, ще суттєвіші переваги можна отримати при застосуванні запропонованого способу запобігання виникненню аномальних режимів під час розгоряння лампи в схемах групового симетрування в МГЛ (рис. 4.32).

У даному випадку не вимагається практично ніякої зміни схеми живлення. У спільний провід вмикається послідовно фазорегулювальний

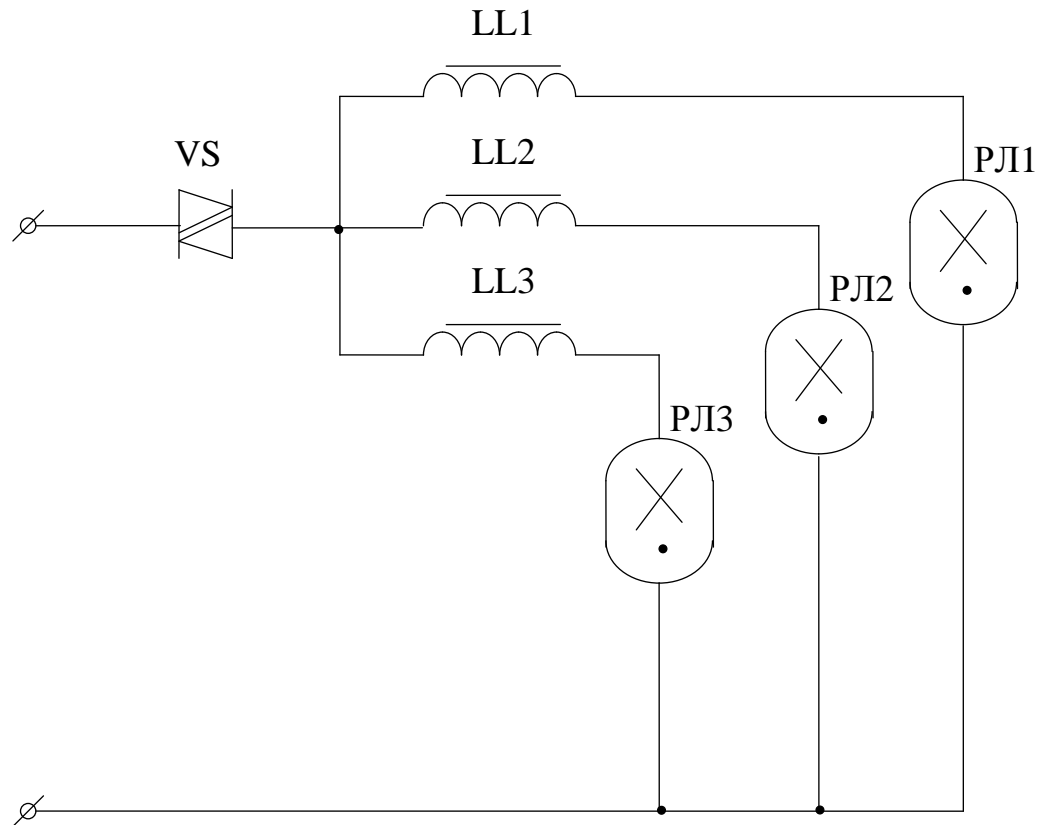


Рис. 4.32. Схема групового симетрування роз'яду

елемент, керування яким здійснюється згідно з вищенаведеним законом. В наслідок великих струмів, які мають місце в таких схемах, доцільно в номінальному режимі шунтувати симистор електромагнітними контактами. Запропоновану схему доцільно використати у вже діючих освітлювальних установках, коли економічно не вигідно замінювати стандартні ПРА.

## Висновки до розділу 4.

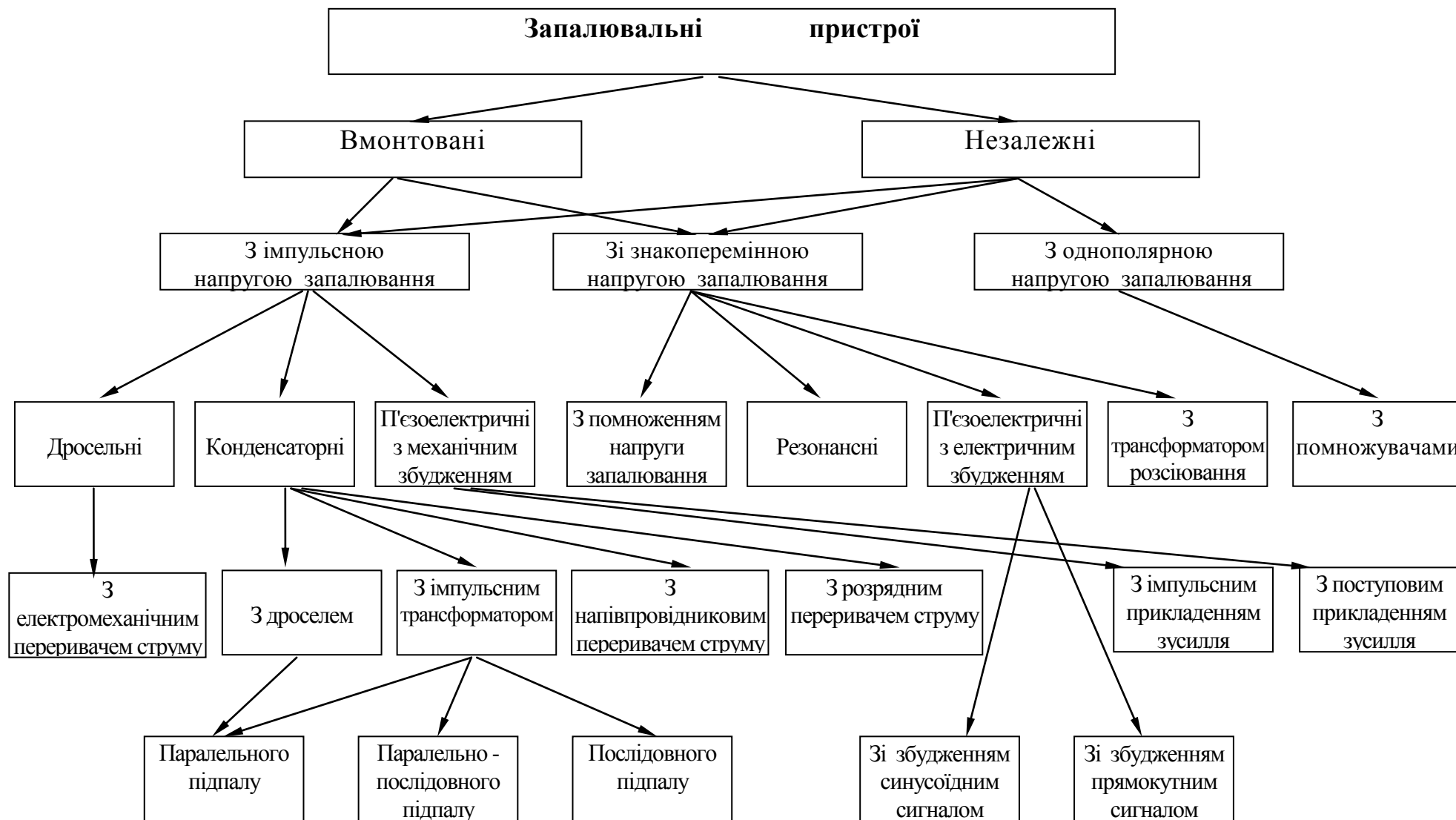
1. Для формування диференціальних рівнянь, які описують процеси в колі з РЛ, доцільно використовувати метод змінних стану.

2. На основі проведеного аналізу схем ввімкнення МГЛ різної потужності, в яких розряд стабілізований за допомогою індуктивного та індуктивно - ємнісного баластів слід відзначити, що отримані залежності миттєвих і середньоквадратичних електричних величин контура якісно і кількісно погоджуються з експериментальними даними. Похибка становить не більше  $\pm 4\%$  для усталеного режиму і не більше  $\pm 7\%$  для аномального режиму.

3. Запропонований метод аналізу, який дає можливість моделювати роботу РЛ в аномальних режимах і оцінити аномальні струми та ефективність застосування шляхів їх усунення.

5. Розроблена принципова електрична схема гібридного ПРА, яка реалізує усунення аномальних режимів методом вимушеного симетрування розряду в процесі розгоряння РЛВТ, та висвітлений принцип її роботи.





## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що під час роботи РЛВТ є аномальні режими, параметри яких суттєво відрізняються від номінальних параметрів.

2. Теоретично обґрунтовано, що виникнення аномальних струмів під час розгоряння МГЛ зумовлене насиченням баластного дроселя. Причиною цього є струми перехідних періодичних процесів для несиметричного режиму роботи лампи. Останній утворюється через нерівномірний нагрів електродів внаслідок їх отруєння галогенідами під час остигання після попереднього ввімкнення.

3. Доведено, що усунути чи по крайній мірі зменшити аномальні струми можна шляхом:

- суттєвого збільшення пускового струму;
- ввімкнення послідовно з дроселем резистора з подальшим його вимкненням;
- використання дроселя з лінійною ВАХ в пусковому режимі;
- застосування індуктивно - ємнісних баластів.

4. Запропонований метод запобігання виникнення аномальних струмів шляхом примусового перезапалювання в режимі розгоряння МГЛ, який, на відміну від інших методів, повністю усуває аномальні струми, дозволяє, у випадку необхідності, регулювати струм лампи.

5. Проведений аналіз математичних моделей РЛ. Отримано, що для РЛВТ, зокрема для МГЛ, найприйнятнішими є математичні моделі, в яких за визначальний параметр прийнята середня концентрація електронів чи провідність лампи. Доведена можливість побудови математичної моделі першого і другого порядків для кіл, які містять РЛВТ.

6. На основі результатів досліджень отримані коефіцієнти математичної моделі високоінтенсивних джерел світла, що дає змогу скоротити обсяг експериментальних робіт для ламп нових типів та потужностей, а також використати диференційну модель лампи для аналізу кіл, що містять РЛ.

7. Проведені дослідження впливу нелінійності дроселя, відхилень напруги живлення від номінального значення, форм струму та напруги на електричні параметри РЛВТ. Це дає можливість вибирати їх найефективніші співвідношення при конструюванні та експлуатації високоінтенсивних ДС.

8. Розроблена принципова електрична схема гібридного ПРА, що реалізує запропонований метод усунення аномальних режимів шляхом вимушеного симетрування розряду, та висвітлений принцип її роботи.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Айзенберг Ю.Б. Проблемы энергоснабжения в осветительных установках // Светотехника. -1998. - №6. - С. 11 - 18.

Андреев А.В. Импульсный пробой и зажигание ртутных источников света высокой интенсивности: Дис ... канд. техн. наук: 05.09.07. - М., 1986. - 163 с.

Атаев А.Е., Литвинов В.С., Назарева Т.Б., Урлапова М.Н. О зажигании металлогалогенных ламп // Светотехника. -1983. - №4. - С. 16 - 17.

Афанасьева Е.И. Скобелев В.М. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 546 с.

Бальсис Р.И., Вашкис А.А., Рохлин Г.Н. К исследованию переходных процессов в плазме люминесцентных ламп // Светотехника. -1986. - №12. -С. 4 - 6.

Баранова В.И., Леонов Г.С., Решенов С.П. Модель процессов в дуговых лампах высокого давления // Светотехника. -1987. - №8. - С. 9 - 12.

Березин М.Ю., Ковалев Ю.И., Ремнев А.М. Методы улучшения коэффициента мощности электронного пускорегулирующего аппарата // Светотехника. -1997. - №2. - С. 6 - 8

Березин М.Ю., Ремнев А.М. Электронный пускорегулирующий аппарат для ртутной лампы высокого давления // Светотехника. -1998. - №1. - С. 7-8

Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высшая школа, 1984. - 559 с.

Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. - М.: Наука, 1982. -376 с.

Булатов О.Г. Тиристорные схемы включения высокоинтенсивных источников света. - М.: Энергия, 1975. - 175 с.

Вассерман А.Л. Броски тока в цепи лампы ДРЛ с дросселем // Светотехника. - 1965. - №2. - С. 12-13.

Васими Х. Влияние галогенидов металлов и примесей на параметры разряда // Семэй гаккай дзасси. - 1975. - Т.59, № 12. - С. 590 - 598.

Васими Х. Явления, происходящие при включении галоидных ламп содержащих йодиды: скандия, тория и натрия // Семэй гаккай дзасси. - 1977. - Т.61. №4. - С. 218 - 226.

Василев Н.И., Пачаманов А.С. Автоматизированные гониофотометрические системы // Светотехника. - 1990. - №12. - С. 19 - 21.

Вашкис А.А. Математическое моделирование плазмы положительного столба люминесцентной лампы // Научн. Труды ВУЗ Литовской ССР. Электротехника. - 1977. - Т. 14. - С. 150-157.

Велит В.А., Корягин О.Т., Литвинов В.С. О прогнозировании стабильности параметров натриевых ламп высокого давления на базе результатов испытаний в пусковом режиме // Светотехника. -1994. - №10/11. - С. 21 - 23.

Велит В.А., Литвинов В.С. О возникновении разряда зажигания натриевых ламп высокого давления, предназначенных для замены ламп типа ДРЛ // Светотехника. -1994. - №3. - С. 4 - 7.

Велихов В.Е., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. - М.: Наука, 1987. - 408 с.

Весельницкий А.М., Рохлин Г.Н. Ртутные лампы высокого давления. - М.: Энергоатомиздат, 1971. - 363 с.

Вдовин В.Г., Вдовина Н.А. О неравновесности плазмы разряда металлогалогенных ламп // Светотехника. -1991. - №12. - С. 9 - 11.

Вдовин В.Г., Зазыгин П.В., Федоренко А.С. Распределение концентрации атомов ртути по возбужденным состояниям в плазме разряда высокого давления в неравновесном модельном представлении // Светотехника. - 1999. - №2. - С. 2 - 5.

Волченко В.А. Исследование электрических режимов схем с газоразрядными лампами: Дис... канд. техн. наук: 05.09.07. - М., 1975. - 227 с.

Волченко В.А. Работа индуктивных балластов с нелинейной вольт-амперной характеристикой в некоторых аварийных режимах // Электротехническая промышленность. Сер. Светотехнические изделия. - 1971. - №5. - С. 9-12.

Волченко В.А. Краснопольский А.Е. Работа линейного индуктивного балласта с люминесцентной лампой в режиме односторонней проводимости // ЭПСИ. 1973. №4. С. 14 - 17.

Волченко В.А. Краснопольский А.Е. Работа индуктивно - емкостных ПРА при дезактивированном катоде люминесцентной лампы // Светотехника. - 1974. - №6. - С. 8 - 11.

Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. Основы физики плазмы. - М.: Атомиздат, 1977. - 384 с.

Гончар В.В., Карпінський М.П., Паздрій І.Р. Проблеми вимірювань та оптимізації показників металогалогенних ламп // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 1999. - №1. - С. 53 – 58.

Гончар В.В., Карпінський М.П., Паздрій І.Р. Гоніофотометрична система з використанням комп'ютерної техніки // Технічна електродинаміка. - 1999. - №4. С. 71 - 74.

Гончар В.В., Паздрій І.Р., Мочульський В.А., Трембач Р.Б. Вимірювання електричних величин джерел світла та побудова математичної моделі за допомогою комп'ютеризованої гоніофотометричної системи // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 1999. Т. 4. - №1. - С. 174 - 179.

Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 384 с.

Данилина В.В., Корочков Ю.А. Воздействие йода на покрытие катодов МГЛ // Светотехника. - 1973. - №6. - С. 3 - 5.

Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. - М.: Наука, 1982. - 320 с.

Импульсные источники света / Под ред. Маршака И.С. - М.: Энергия, 1978. - 472 с.

Иноуэ А. Статистический анализ характеристик зажигания разрядных ламп // Тосиба рэбю. - 1975. - Т.30, №10. - С. 716-718.

Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 248 с.

Карпінський М.П., Гончар В.В., Паздрій І.Р., Трембач Р.Б. Комп'ютерна симуляція перехідних процесів у високоінтенсивних джерелах світла // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 1999. - №2. - С. 28 – 32.

Клыков М.Е., Логунова О.Н. Пусковые характеристики ламп ДРИ при импульсном зажигании // Светотехника. - 1981. - №6. - С. 11-14.

Клыкова М.Н., Краснопольский А.Е., Тарасенко Н.Г. Установки для исследования импульсных характеристик плазмы газоразрядных источников света // ЭПСИ. 1978. №6. С. 1 - 3.

Коган Ю.М., Миленин В.М., Рыков В.М. Исследование электрических параметров модулированного разряда в смеси паров ртути с неоном // ЖТФ. - 1975. - Т.45, вып. 8. - С. 1689-1692.

Кожушко Г.М. Пути совершенствования и разработка конструкции и технологии промышленного производства осветительных металлогалогенных ламп с улучшенными параметрами: Автореф. дис.... канд. техн. наук - М.: 1983. - 18с.

Краснопольский А.Е. Дифференциальная аппроксимация динамических вольт-амперных характеристик люминесцентных ламп // Светотехника. -1978. - №12. - С. 10 – 12.

Краснопольский А.Е. О дифференциальном уравнении газоразрядной плазмы // Светотехника. -1977. - №12. - С. 13 – 15.

Краснопольский А.Е. Газоразрядная лампа с нелинейным индуктивным балластом // Светотехника. - 1963. - №3. - С. 22 – 24.

Краснопольский А.Е. Индуктивный балласт с оптимальными параметрами // Светотехника. - 1962. - №11. - С. 19 – 22.

Краснопольский А.Е., Волченко В.А. К вопросу об аппроксимации кривых намагничивания магнитных материалов // Труды Моск. энергетического института. - 1972. - вып. 152. - С. 149 – 155.

Краснопольский А.Е., Волченко В.А. Работа линейного индуктивного балласта с люминесцентной лампой в режиме односторонней проводимости // Сер. Светотехнические изделия. - 1971. - вып. 5. - С. 9 – 12.

Краснопольский А.Е., Клыкова М.Н., Тарасенко Н.Г. Установка для исследования импульсных характеристик плазмы газоразрядных источников света // Электротехническая промышленность. Сер. Светотехнические изделия. - 1978. - №6. - С. 1 – 3.

Краснопольский А.Е., Соколов В.Б., Троицкий А.М. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.

Краснопольский А.Е., Князьков О.М., Мальцев Е.Г. Применение интервального метода для исследования и контроля параметров плазмы газового разряда / Межвуз. сб. трудов. - М.: МЭИ, 1983. - №18. - С. 76 - 83.

Краснопольский А.Е., Олейников В.Н. О расчете коэффициентов неустойчивости в электрических цепях с газоразрядными лампами // Светотехника. -1977. - №5. - С. 6 – 8.

Краснопольский А.Е., Спирин А.А., Троицкий А.М. Электрическое моделирование в расчетно - экспериментальном исследовании контура газоразрядная лампа - линейный индуктивный балласт с потерями // Труды МЭИ - 1975. - Вып. 253. - С. 109 – 114.

Краснопольский А.Е., Соколов В.Б., Шкуро Н.Н. Полупроводниковые балластные устройства для газоразрядных ламп // Труды МЭИ - 1979. - Вып. 226. - С. 134 – 139.

Краснопольский А.Е., Тарасенко Н.Г., Шкуро Н.Н. Методы расчета схем ПРА для газоразрядных ламп // Труды МЭИ - 1980. - №2. - С. 7 - 9.

Крижанский С.М. Теоретическая модель дуги переменного тока в продольном потоке газа // Электричество. -1975. - №6. - С. 1 - 5.

Кунге Я.А., Фаермарк М.А. Экономия электрической энергии в осветительных установках. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 161 с.

Литвинов В.С. Оптимизация источников света массового применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 208 с.

Литвинов В.С., Погребной В.Ю. К вопросу о перспективности ламп типа ДРЛ с двумя горелками // Светотехника. -1998. - №5. - С. 22 – 23.

Ломов А.А., Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Исследование положительного столба разряда в смеси ртуть - аргон в условиях импульсной модуляции тока // ЖТФ. - 1978. -Т. 48, - №10. - С. 1074 – 1082.

Малкин О.А. Импульсный ток и релаксация в газе. - М.: Энергоатомиздат, 1974. - 280с.

Мухина В.И., Прокудин В.С., Соловьева Г.Е. Подводные световые приборы с газоразрядными лампами // Светотехника. - 1988. - №1. - С. 17 – 18.

Намитоков К.К., Пахомов П.Л., Харин С.Н. Математическое моделирование процессов в газоразрядной плазме. - Алма - Ата, 1988. - 204с.

Намитоков К.К., Дикань С.В., Соколов В.Ф., Абрамова В.А. Стабилизатор напряжения в осветительных установках // Вестник Харьковского государственного университета. – 2000, - Вып. 81. – С. 79 – 80.

Нейман Л.Р. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. - Л.: Энергоатомиздат, 1981. - 415с.

Несаев А.В. Катодные процессы электрической дуги. - М.: Наука, 1968. - 244с.

Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. - М.: Энергия, 1977. - 346с.

Паздрій І.Р. Запобігання виникненню аномальних режимів роботи розрядних ламп високого тиску // Коммунальное хозяйство городов: Научн. - техн. сборник, Вып. 22. - К.: Техніка, 2000. - С. 229 – 233.

Перхач Р.С. Теоретична електротехніка. - К.: Вища школа, 1992. - 439с.

Попов В.С. Теоретическая электротехника. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 542с.

Погребной В.Ю. Современные натриевые лампы высокого давления // Новости светотехники. Вып. 7. – М.: 1998. – 15с.

Пятигорский В.М. О работе МГЛ в сетях с напряжением 380 В // Светотехника. - 1987. - №7. - С. 7 – 9.

Решенов С.П. Анализ характеристик ртутного разряда высокого давления // Светотехника. -1988. - №12. - С. 1 - 4.

Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. - М.: Энергия. - 1991. - 720с.

Рехштайнер М. Цветовые и световые характеристики новых металлогалогенных ламп при изменении напряжения питания // Светотехника. - 1998. - №3. - С. 20 - 23.

Свирчук Ю.С. Теория электрической дуги переменного тока // Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. Новосибирск: Наука, 1977. С. 87 - 114.

Симонян А.С. Метод конструктивного расчета компенсированного ПРА, содержащего трансформатор с большим внутренним сопротивлением // Труды МЭИ. 1977. Вып. 316. С. 63 - 66.

Симонян А.С. Троицкий А.М. Компенсированные трансформаторные и автотрансформаторные схемы включения газоразрядных ламп // Труды МЭИ. 1977. Вып. 327. С. 73 - 78.

Скобелев В.М., Афанасьева Е.И. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 368с.

Спирин А.А. Методы расчета и исследования контура ”газоразрядная лампа - линейный индуктивный балласт с потерями” и определение оптимальных параметров дросселей. - М.: ВНИСИ, 1976. - 208с.

Справочная книга по светотехнике / Под ред. Айзенберга Ю.Б., - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 708 с.

Тарасенко Н.Г. Разработка и использование математических моделей газоразрядных ламп для расчета электрических цепей приборов включения : Дис... канд. Техн. наук : 05.09.07. - М., 1980. - 265с.

Троицкий А.М. Метод расчета контура линейный емкостно - индуктивный балласт - газоразрядная лампа // Светотехника. -1973. - №9. - С. 4 - 7.

Троицкий А.М., Спиринов А.А. Методы расчета контура "газоразрядная лампа - линейный индуктивный балласт" // Труды Московского энергетического института. - 1975, - Вып. 210. - С. 143 - 149.

Уэймаус Дж. М. Газоразрядные лампы. - М.: Энергия, 1977. - 341с.

Уэймаус Дж. М. Состояние и перспективы развития разрядных источников света // Светотехника. -1987. - №5. - С. 20 - 24.

Фугенфиров М.И. Электрические схемы с газоразрядными лампами. - М.: Энергия, 1974. - 368с.

Щепина Н.С. Основы светотехники. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 560с.

Couris S., Zissis G., Aules M., Damelincourt J. Investigation of the departures from the local thermodynamic equilibrium and their influence on 6 P levels population in highpressure mercury discharges // 19 th Int. Conf. Phenom. Ionized Gases, Belgrade, 1989. P. 724 - 725.

Denbigh P.L. Lighting Research Technology // Lighting Research Technology. - 1983. - V. 15, №4. - P. 171 - 178.

Engel I.C., Hamilton H.B. Design and analysis of a doped loopdynamic metal Vapor lamp ballast // IEEE Cong. Rec. Annual Meet. New York. - 1989. - P. 371 - 379.

Krasnopol'skiy A.E. Polovodiyeve predradniki // Svetelna Technika. 1981/Rocnik XIY. С. 27 - 32.

Kuhl B., Dobrusskin A. The fanailg of metal halide lamps // Lighting design and applications. - 1975. - №5. - P. 9 - 20.



Makai J.P., Czibula G., Bross R., Borodi H. Microprocessor Controlled Free Programmable Goniophotometer // Proc. Symposium on Light and Radiation Measurement. - Berlin (Germany). - 1996. - P. 47 - 50.

Marx P. Computergesteuertes Drehspiegel - System // Licht. - 1995. - №11. - S.586 - 595.

Masumi K. Applicatins of the lamps model eguation to HID lamps with various voltage // S. Light and Vis. Env. - 1977. - V. 1, №1. - P. 18 - 23.

Masumi K. On the Differential Eguations for the High Pressure Discharge Lamps // Kobe University. - 1972. - №18. - P.195 - 203.

Masumi K., Bo H. Method of calculation of hight pressure dischargo lamps circuits // J. III. Eng. Inst. Jap. 1975. - Vol.59. - №5. - P. 194 - 209.

Bo H. On the matematical models for egivalent conductance of discharge lamp // I. Illum. Engag. of Japan. - 1973. - V. 57, №6. - P. 341 - 348.

Teck S.C., Spenner D.E. A differencial Eguation for the Fluorescent lamp // Illuminating Enginiring. - 1968. - V. 63, №4. - P. 157 - 165.

Pressley R.J., Tong H.Y. Stabilized operation of xenon flashlamps using ultraviolet illumination // Rev. Scient. Instrum. - 1965. - V. 36, №9. - P. 1381.

Tschuk R. Vorschaltgerate und Zundgerate fur Halogen-Metallolamp flampen // Lichttechnik. - 1976. - B 28, №4. - S. 154 - 159.