

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Нечаус Андрій Олександрович**

УДК 621.317.2:621.315.2

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МАГНІТОКЕРОВАНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ УСТАНОВОК  
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському військовому університеті Міністерство оборони України, м. Харків.

Науковий керівник: Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
**Кононов Борис Тимофійович,**  
Харківський військовий університет, м. Харків,  
професор кафедри електропостачання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Васьковський Юрій Миколайович,**  
Національний технічний університет України “Київський  
політехнічний інститут”, м. Київ,  
професор кафедри електромеханіки;

кандидат технічних наук, доцент  
**Грищук Юрій Степанович,**  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, м. Харків,  
доцент кафедри електричних апаратів.

Провідна установа: Донецький національний технічний університет,  
Міністерство освіти і науки України, м. Донецьк

Захист відбудеться " 1 " квітня 2004 р. О 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “     ” лютого 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Болух В.Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні установки для випробувань силових кабелів [наприклад, фірм High Volt (Німеччина), Hipotronics (США)] являють собою складні системи на основі послідовного резонансу в електричному колі з реактором, індуктивність якого змінюється шляхом регулювання немагнітного зазору. Крім керованого реактора – пристрою для настройки коливального кола в резонанс, установки містять також трансформатор збудження, комутаційні електричні апарати, системи фільтрів, екранів, заземлення тощо. Окремою підсистемою є апаратура індикації, вимірювання, реєстрації та аналізу високочастотних сигналів ЧР, за якими власне і визначається якість кабелів. Вартість таких установок становить від 400 до 900 тис. дол. США. Для багатьох виробників кабельної продукції такі витрати практично недоступні, тому їм доводиться обмежуватися вимірюванням діелектричних втрат – інтегрального показника, який має низьку чутливість до локальних дефектів ізоляції.

Існуючі резонансні установки мають також ряд суттєвих технічних недоліків, пов'язаних саме з обраним способом регулювання індуктивності – низькочастотні вібрації магнітної системи та значні розсіяння магнітного поля. Для зменшення вібрацій доводиться зменшувати магнітну індукцію у стрижнях менше 1 Тл, а для зменшення втрат від потоків розсіяння – збільшувати відстань бака до активної частини. Все це призводить до зростання габаритів, маси та вартості реактора – зараз вона сягає 80% вартості всієї установки.

Вказані недоліки традиційних випробувальних систем можуть бути значною мірою усунені, якщо застосувати реактори без немагнітних зазорів – магнітокеровані реактори. У розробці та впровадженні в енергетику таких реакторів вітчизняні вчені є безумовними світовими лідерами: Александров Г.М., Брянцев А.М., Бікі М.А., Бродовий Є.М., Дорожко Л.І., Євдокунін Г.А., Коршунов Є.В., Лейтес Л.В., Лунін В.П., Лур'є А.І., Теллінен Ю.Ю., Ярвик Я.Я. та ін. В енергетиці основні вимоги до керованих реакторів зводяться до підвищення швидкодії та зменшення вмісту вищих гармонік. На відміну від цього, для випробувальних установок основною вимогою є низький рівень власних ЧР, або, принаймні, можливість розпізнати їх на фоні розрядів в кабелі. Спільною рисою застосування магнітокерованих реакторів у енергетиці і кабельній техніці можна вважати обмежений діапазон варіації напруги, власне внаслідок чого і виникла можливість вказаного технічного рішення: ряд номінальних напруг ( $U_0$ ) кабелів загального призначення, для яких нормуються вказані випробування, обмежений – це, в основному, 6, 10 та 35 кВ, а випробувальна напруга ( $U_B$ ) фіксована –  $U_B=2 U_0$ .

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в Харківському військовому університеті у відповідності з науково-дослідними роботами №3.6.31

"Ряд" (07.2000 - 12.2002 р.), №3.6.32 "Стандарт" (07.2000 - 12.2002 р.), №3.6.61 "Обстеження" (розпочата 12.2002 р.) та госпдоговірною науково-дослідною роботою "Розробка лабораторії високовольтних випробувань кабельної продукції до напруг класу 6/10 кВ" (Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", ЗАТ "Южкабель"). У вказаних роботах здобувач виступив в ролі виконавця окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка магнітокерованого реактора для резонансних систем випробувань кабелів, конструкція якого дозволяє виділити та ідентифікувати сигнали ЧР в об'єкті контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити та дослідити магнітокерований реактор для резонансної системи, що включає трансформатор збудження, об'єкт випробування ємнісного типу та схему вимірювання ЧР;
- розробити методику проектування магнітокерованих реакторів резонансних систем, що враховує вплив паразитних ємностей реактора на чутливість схеми вимірювання ЧР;
- отримати розрахункові співвідношення для визначення характеристик магнітокерованого реактора та знайти ймовірні місця розвитку ЧР, виходячи з порівняння асимптотичних характеристик електростатичних полів у кутових точках (особливі точки I роду) та точках введення високого потенціалу (особливі точки II роду).

*Об'єкт дослідження* – процес збудження високої напруги на об'єктах випробувань ємнісного типу з одночасною індикацією рівня ЧР.

*Предмет дослідження* – магнітокерований реактор трансформаторного типу, конструкція якого дозволяє виділяти та ідентифікувати сигнали ЧР в об'єктах випробувань ємнісного типу.

*Методи дослідження* базуються на використанні основних положень теорії електричних апаратів, теорії електричних та магнітних кіл, теорії подібності.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що:

- розроблена математична модель магнітокерованого реактора для резонансних випробувальних систем, яка базується на представленні напруги на об'єкті контролю сумою двох складових – фіксованої величини, обумовленої насиченням магнітопроводу реактора, та регулюємої величини, обумовленої напругою трансформатора збудження (отримано вперше);
- запропонована схема часткових ємностей магнітокерованого реактора та визначена їхня роль у просуванні сигналів ЧР від джерела – об'єкта випробувань або котушок реактора до приймача – датчика сигналів; знайдені фазові відмінності сигналів об'єкта контролю та реактора, за якими і визначається їхня приналежність (отримано вперше);
- розроблена методика аналізу характеристик соленоїдних котушок, в якій враховані відмінності асимптотичних полів кутових точок та точок введення високого потенціалу (дістало подальшого розвитку);

- запропоновані критерії подібності для контролю параметрів кабельних виробів та обґрунтування нормативних вимог щодо них (дістало подальшого розвитку).

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

- запропонована схема виконання реактора, власні елементи якого є одночасно датчиками ЧР, що виникають в об'єкті контролю;
- розроблена, виготовлена та досліджена експериментальна установка потужністю 20 кВАр на напругу 12 кВ для вимірювання характеристик ЧР в об'єктах ємнісного типу;
- експериментальне доведена можливість суттєвого зменшення частоти власних ЧР шляхом зміни розподілу потенціалу у основному ізоляційному проміжку;
- виконані оцінки гармонійних складових у кривій випробувальної напруги системи "трансформатор збудження – реактор – ємність";
- обґрунтовані рекомендації щодо створення промислових установок на основі стандартних трифазних трансформаторів.

Результати дисертаційної роботи використані Технічним комітетом №131 "Електроізоляційна та кабельна техніка" Держспоживстандарту України при гармонізації Державних стандартів України з міждержавними стандартами на силову кабельну техніку та складання нових стандартів України на силові кабелі: перевірка типорозмірних рядів кабелів; перевірка та обґрунтування вимог щодо електричних та геометричних параметрів кабелів; аналіз методик випробування підвищеною напругою змінного струму та рекомендацій щодо випробувального обладнання силових кабелів з пластмасовою ізоляцією.

Результати дисертаційної роботи впроваджені Харківським військовим університетом у лекційний матеріал, практичні та лабораторні заняття за відповідними темами з дисциплін: "Електричні апарати", "Електротехнічні пристрої", "Експлуатація систем електропостачання та військовий ремонт електротехнічних засобів".

**Особистий внесок здобувача** полягає у проведенні аналізу існуючих випробувальних установок, що реалізують принцип резонансу напруг, аналізу сучасних керованих реакторів енергетичних систем, аналізу діючих стандартів на силову кабельну техніку; у дослідженнях математичних моделей та макету вимірювальної установки, а також у розробці методики проектування магнітокерованих реакторів для резонансних систем і отриманні розрахункових співвідношень для визначення їхніх характеристик.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались на: науково-технічній конференції "Вдосконалення систем та засобів метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки", Харків, 2001 р.; II міжнародній конференції "Проблеми інформатики та моделювання", Харків, 2002 р.; науково-технічній конференції молодих науковців ХВУ, Харків, 2002 р.; республіканському семінарі "Нові розробки в галузі електричної ізоляції", Харків, 2001 р.; II науково-технічній конференції молодих науковців ХВУ, Харків, 2003 р.; XI міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Micro-CAD'2003), Харків, 2003 р.

**Публікації:** основні результати дисертації опубліковані у 7 наукових роботах, з них: у фахових наукових журналах – 1, у фахових збірниках наукових праць – 6.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку та додатку. Повний обсяг дисертації вміщує 149 сторінок, з них 63 ілюстрацій по тексту, 9 – на 6 сторінках; 6 таблиць по тексту, 2 – на 2 сторінках; 91 найменування використаних літературних джерел містяться на 10 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету і завдання дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами і програмами, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок автора в друкованих працях зі співавторами, наведено дані про апробацію, публікації та впровадження основних результатів роботи.

У **першому розділі** показано, що останнім часом у зв'язку зі зростанням випуску силових кабелів з пластмасовою ізоляцією ростуть вимоги і щодо їх якості. Контроль силових кабелів з пластмасовою ізоляцією базується не тільки на традиційних випробуваннях підвищеною напругою, але й на вимірюванні характеристик ЧР, адже полімерна ізоляція більш вразлива до незворотної деструкції розрядами, ніж паперово-масляна. Проте обладнання для прямих вимірювань ЧР досі відсутнє у більшості вітчизняних виробників. Здебільшого застосовується контроль по інтегральній характеристиці – тангенсу кута діелектричних втрат, яка має низьку чутливість до поодиноких повітряних крапель в ізоляції.

При випробуваннях кабелів на будівельних довжинах (тобто у цілому в бухтах, а не на коротких зразках) виникає проблема великої реактивної потужності (до 1000 кВАр), яка споживається об'єктом контролю. Сучасне прогресивне випробувальне обладнання виконується за схемою компенсації ємнісної реактивної потужності кабелю джерелом індуктивної реактивної потужності *керованого реактора* (Рис. 1). Коливальний контур, утворений ємністю кабелю та індуктивністю реактора, повинен мати високу добротність  $Q = 30 - 100$ . Тоді в момент резонансу напруга на кабелі зростає в  $Q$  раз порівняно з напругою трансформатора збудження. Потужність останнього витрачається на компенсацію втрат енергії в коливальному контурі, внаслідок чого від джерела живлення споживається лише активна енергія, а загальна потужність живлення установки зменшується в  $Q$  раз. В разі пробою кабелю схема виходить з резонансу і струм в колі різко спадає.

Контроль якості кабелю вимагає захисту від зовнішніх завад та відсутності ЧР у самому випробувальному обладнанні. Для цього останнє розміщується в екранованій камері, а конструкція самого обладнання повинна виключити можливість появи власних ЧР. Сказане досягається шляхом підсилення ізоляції, екранування високовольтних обмоток, застосуванням фільтрів низьких частот – для захисту від зовнішніх завад по лініям живлення, фільтрів високих частот – для відокремлення сигналу ЧР від низькочастотних сигналів стороннього походження.

Реактори, керовані зміною величини немагнітного зазору в магнітопроводі (в подальшому – *лінійні реактори*) мають недоліки: підвищені низькочастотні вібрації, шуми, збільшені габарити реактора і пожежна небезпечність, складні системи електромеханічного приводу.

Одним з важливих елементів випробувальних установок є також *конденсатор зв'язку*, ємність якого повинна бути одного порядку з ємністю кабелю. В ньому також не повинно бути ЧР. Внаслідок цього конструкція конденсатора виявляється досить складною, що можна вважати як недолік типових установок випробувань.

В той же час не враховується, що в якості конденсатора зв'язку можна використати паразитні ємності реактора, а саме головного ізоляційного проміжку між обмотками та магнітопроводом.

В розділі виконано огляд реакторів, керованих намагнічуванням магнітопроводу (в подальшому – *нелінійні реактори*). Такі реактори широко використовуються в енергетиці. Підмагнічування магнітопроводу призводить до зменшення магнітної проникності матеріалу магнітопроводу, внаслідок чого зменшується індуктивність реактора. Висунуто гіпотезу про перспективність застосування нелінійних реакторів в системах випробування силових кабелів.

**У другому розділі** розглянуто умови роботи керованих реакторів у резонансному колі, виконано порівняння схем з лінійними та нелінійними реакторами.

#### Загальні характеристики коливальних контурів з керованими реакторами.

Для лінійних реакторів вольт-амперна характеристика (ВАХ) – пряма лінія (позначена  $\omega L$  в першому квадранті рис. 2). Її кут нахилу  $\varphi_1$  залежить від величини немагнітного зазору. ВАХ кабелю – об'єкта ємнісного типу – також пряма з кутом нахилу  $\varphi_2$  (позначена знаком  $1/\omega C$  в четвертому квадранті рис 2). (Різні квадранти для ВАХ реактора і кабелю вибрані з урахуванням протилежних зсувів фаз напруг на ідеальних індуктивності та ємності в послідовному колі). Шляхом зміни кута  $\varphi_1$  досягається умова резонансу:  $|\varphi_1| = |\varphi_2|$ . В цьому разі вся енергія, яка підводиться із зовнішньої мережі, розсіюється на еквівалентному активному опорі кола  $R$ . (Останній відображає, головним чином, втрати в реакторі, оскільки діелектричні втрати в кабелі суттєво менші, а джоулеві – нульові, адже кабель випробовується в режимі холостого ходу). Важливо, що умови резонансу не змінюються зі зростанням напруги  $U_B$  трансформатора збудження бо всі елементи коливального контуру – лінійні. Напруга  $U_C$  плавно зростає зі зростанням  $U_B$ .

Можливість регулювання  $U_C$  в широких межах – головна перевага систем з лінійним реактором. Але при контролі за характеристиками ЧР якості ізоляції випробувальні напруги кабелів фіксовані:  $U_C = 2 U_0$ . Для створення таких умов цілком придатні і нелінійні реактори, якщо їхня номінальна напруга  $U_{PH}$  близька (точніше, дещо менше) необхідної випробувальної:  $U_{PH} \approx 2 U_0$ . Різниця напруг між необхідною  $2 U_0$  та наявною на реакторі  $U_{PH}$  може бути створена трансформатором збудження:  $U_B = 2 U_0 - U_{PH}$ . Особливістю реакторів, керованих намагнічуванням, є різко нелінійна ВАХ – рис. 3, яка до того ж залежить від струму підмагнічування. Тепер перетин вольт-амперних характеристик  $\omega L$ , та  $1/\omega C$  (умова

резонансу) може бути тільки в одній точці. Загальна ВАХ резонансного контуру з нелінійною індуктивністю, як відомо, має  $N$ -подібний вигляд – рис. 4. При збільшенні напруги  $U_B$  трансформатора збудження напруга на ємності спочатку плавно зростає до точки  $A$  кривої  $OACB$  рис. 4, а далі – *стрибкоподібно* через точку  $C$  до точки  $B$ .

Швидкість зростання випробувальної напруги на кабелі повинна бути *обмеженою*. Це може бути забезпечено вибором трансформатора збудження відносно невеликої потужності. Тоді втрати в ньому в перехідний період від  $A$  до  $B$  загальмують швидке зростання напруги на об'єкті контролю. На практиці перехід в режим резонансу триває досить довго: біля 5 с для експериментальної установки з реактором потужністю 20 кВАр і трансформатором збудження 1 кВАр. Таким чином, одна з проблем застосування нелінійних реакторів полягає в стримуванні стрибкоподібного зростання напруги на кабелі.

При зменшенні напруги матимемо зворотне явище – стрибкоподібне спадання напруги від точки  $C$  до відрізка  $OA$ . Тривалість цього процесу залежить від втрат енергії в коливальному контурі.

Вказані явища стрибкоподібної зміни напруги на ємності в нелінійному контурі умовно називають "тригерним ефектом". Він стає менш виразним при застосуванні намагнічування реактора. В цьому разі ВАХ реактора стають більш пологими, змінюються також і загальні ВАХ контуру (рис. 5): точка входу в резонанс (точка  $A$ ) зміщується вниз. Для введення системи в резонанс необхідно (при зменшеній нарузі збудження  $U_B$ ) збільшувати струм намагнічування доти, поки не виникне резонанс Далі струм намагнічування зменшують до нуля, а напругу збудження  $U_B$  – навпаки – плавно збільшують, доки напруга на об'єкті не досягне заданої. Вихід з резонансу виконують у зворотній послідовності.

Як бачимо, резонансна схема з нелінійним реактором, має специфічні умови експлуатації. Є також природні обмеження щодо діапазону ємностей випробуваних кабелів: нижня границя визначається умовами виникнення резонансу – точкою дотику лінійної ВАХ кабелю з нелінійною ВАХ реактора без намагнічування, а верхня границя – максимально допустимим струмом реактора (тобто його потужністю).

#### Схема випробувальної установки з магнітокеруваним реактором.

Для реалізації магнітокеруваного реактора запропоновано типовий силовий 3-стрижневий трансформатор, крайні обмотки якого використовуються як робочі, а середня – як намагнічувальна. Така схема цілком відповідає відомій конструкції магнітного підсилювача (МП). Для малопотужних МП звичайно нехтують полями розсіяння, при цьому мається достатньо розроблена та обґрунтована теорія і широка практична перевірка. Для потужних МП, які використовуються в коливальних контурах високої добротності, слід враховувати поля розсіяння і обумовлені ними втрати енергії.

Запропоновані схеми з'єднання робочих обмоток реактора з несиметричним (Рис. 6а) та симетричним (Рис. 6б) включенням трансформатора збудження  $T_e$ .

В обох випадках потенціали нижніх країв котушок залишаються низькими, а напруга на об'єкті



випробувань  $Cx$  – біполярна відносно землі: коли потенціал одного полюса (жили) додатний, потенціал іншого (оболонки) – від’ємний. Така схема вибрана з умови запобігання розрядів з нижніх частин котушок, ізоляція яких відносно корпусу в типовому трансформаторі звичайно є нижчого класу, ніж верхніх частин.

У якості конденсаторів зв’язку запропоновано використовувати паразитні ємності між обмотками та спеціальними незамкнутими екранами, розташованими у основному робочому зазорі між обмотками та магнітопроводом (показані пунктиром). Екран центрального стрижня, на якому розміщена обмотка намагнічування, використовується для розпізнавання ЧР. Якщо останні виникають на ємності  $Cx$ , то відповідні сигнали, що передаються через паразитні ємності, мають на крайніх екранах протилежну полярність, тобто являються парафазними. Сигнали завад від розрядів, які можуть виникати на краях котушок з високими потенціалами (на верхніх краях), передаються через вказані паразитні ємності в однаковій фазі, тобто є синфазними. Саме різні фазові характеристики інформаційних сигналів і сигналів завад дають можливість розрізнити їхнє походження. Симетрична схема випробувальної установки рис. 6б запропонована саме для досягнення кращої врівноваженості та фазових відмінностей характеристик вказаних сигналів. В цьому разі диференційний трансформатор  $Tu$  разом з трансформатором збудження  $Tb$  утворюють 4-плечий міст, зрівноважений для сигналів завад і не зрівноважений – для інформаційних сигналів.

**У третьому розділі** виконано обґрунтування запропонованої схеми випробувальної установки.

#### Ймовірні області виникнення внутрішніх розрядів.

Випробувальне обладнання (трансформатор збудження, реактор, фільтри) має у своєму складі індуктивні котушки. Кожна з них має особливі області, в яких найімовірніше можуть розвиватися власні розряди. Це може звести нанівець випробування кабелю, якщо розрізнити походження розрядів (власні чи в кабелі) не вдасться. Конструкція котушок повинна бути виконана таким чином, щоб запобігти виникненню власних розрядів, принаймні при номінальних напругах. Особливими областями (точками) індуктивних котушок є, по-перше, ділянки різкої зміни кривизни поверхні – кутові точки (названі точками *I* роду), по-друге, місця зміни напрямку росту потенціалу – точки підключення котушок, намотка яких починається з середини (названі точками *II* роду). Поблизу ідеалізованих особливих точок напруженість поля визначається *асимптотичним* законом, тобто необмежене зростає при наближенні до них (як поблизу вістря):

$$E = \frac{\alpha}{\lambda^m}, \quad (1)$$

де:  $\lambda$  – відстань до особливої точки,  $\alpha$  – розмірний коефіцієнт,  $m$  – коефіцієнт ступеневої функції, що визначає крутизну зростання поля.

Для розрахунку поля котушок використаний метод вторинних зарядів з урахуванням особливостей по (1). Результати показані на рис. 7 у вигляді розверток напруженості поля вздовж твірної циліндричної соленоїдної (нескінченно тонкої) котушки. Розглянуті випадки високого потенціалу на краю котушки (особливі точки *I* роду - криві 1 – 3), та в разі введення високого потенціалу в середину котушки (особливі

точки II роду - криві 4 – 6). Розглянутий ряд геометричних співвідношень розмірів котушок – відношення діаметра до висоти  $D/H$ : 0,1 (криві 1 та 4); 1 (криві 2 та 5); та 10 (криві 3 та 6).

Криві рис. 7 подані в подвійному логарифмічному масштабі, в якому залежності  $E(\lambda)$  спрямляються, якщо вони дійсно відповідають закону (1), Кутовий коефіцієнт прямих визначає параметр  $m$  асимптотичного закону (1). Для котушок різної геометрії кути нахилу ліній  $E(\lambda)$  залишаються сталими, хоча асимптоти I (криві 4 – 6) та II (криві 1 – 3) змінюють своє положення. Криві асимптот I та II роду перетинаються на відстані  $\lambda_{кр} = 1 - 3$  мм від особливих точок. В ближніх зонах особливих точок (при  $\lambda < \lambda_{кр}$ ) переважає поле поблизу країв котушок, а в дальніх зонах (при  $\lambda > \lambda_{кр}$ ) – поблизу точок вводу потенціалу, тобто в центрі котушок. Як відомо, ЧР виникає, коли напруженість поля досягає критичного рівня на певній критичній відстані від особливої точки. З кривих рис. 7 витікає, що за певних умов розряди можуть виникати не тільки з країв котушок, але й з їх середин. Тому конструкції з вводом високого потенціалу в середину котушок не завжди можуть відвернути можливість виникнення внутрішніх розрядів. Для їх розпізнавання необхідний фазовий аналіз сигналів, які виникають на паразитних ємностях реактора.

#### Паразитні ємності реактора.

В спрощеному вигляді основні паразитні ємності вказані на рис. 8а, в повному – на рис. 8б. Цифрами 1, 3, 5 позначені екрани робочих обмоток та обмотки управління, а 2, 4, 6 – виводи обмоток; 7 – магнітопровід.

Сигнал ЧР зображено на схемі джерелом е.р.с.  $E$ . Внутрішній опір приймача сигналу позначено  $R$ . Задача полягає у визначенні, яка частка корисного сигналу  $E$  виділяється на опорах  $R$  датчиків, адже ємності (наприклад  $C_{17}$ ) шунтують джерело сигналу. Крім того визначимо, як відрізняються фазові характеристики корисного сигналу і завад. Для моделювання завад джерело  $E$  включимо послідовно ємності  $C_{56}$ .

Паразитні ємності визначені на основі розрахунку електростатичного поля методом вторинних зарядів. Щільність зарядів на поверхнях електродів знайдемо в результаті розв'язання відомої системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U} . \quad (2)$$

Елементи матриці  $\bar{A}$ , в цьому загальному 3-вимірному випадку знаходились за формулами точкових зарядів:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\Delta S_j}{r_{ij}}, & \text{при } i \neq j; \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\Delta S_j}{R_j/2}, & \text{при } i = j, \end{cases} \quad (3)$$

де  $i$  – точка, в якій необхідно знайти потенціал;  $j$  – точка, в якій розташований заряд з



$$G_{55}=j\omega(C_{51}+C_{52}+C_{53}+C_{54}+C_{55}+C_{56}+C_{57})+1/R_{57}; G_{66}=j\omega(C_{61}+C_{62}+C_{63}+C_{64}+C_{65}+C_{66}+C_{67});$$

$$G_{77}=j\omega(C_{71}+C_{72}+C_{73}+C_{74}+C_{75}+C_{76}+C_{77}).$$

Взаємні часткові провідності:

$$G_{12}=-j\omega C_{12}; G_{13}=-j\omega C_{13}; G_{14}=-j\omega C_{14}; G_{15}=-j\omega C_{15}; G_{16}=-j\omega C_{16}; G_{17}=-j\omega C_{17}+1/R_{17};$$

$$G_{23}=-j\omega C_{23}; G_{24}=-j\omega C_{24}; G_{25}=-j\omega C_{25}; G_{26}=-j\omega C_{26}; G_{27}=-j\omega C_{27}; \quad (8)$$

$$G_{34}=-j\omega C_{34}; G_{35}=-j\omega C_{35}; G_{36}=-j\omega C_{36}; G_{37}=-j\omega C_{37}; G_{45}=-j\omega C_{45}; G_{46}=-j\omega C_{46};$$

$$G_{47}=-j\omega C_{47}; G_{56}=-j\omega C_{56}; G_{57}=-j\omega C_{57}+1/R_{57}; G_{67}=-j\omega C_{67}.$$

Решта часткових провідностей:

$$G_{21}=G_{12}; G_{31}=G_{13}; G_{41}=G_{14}; G_{51}=G_{15}; G_{61}=G_{16}; G_{32}=G_{23}; G_{42}=G_{24}; G_{52}=G_{25}; G_{62}=G_{26}; G_{43}=G_{34};$$

$$G_{53}=G_{35}; G_{63}=G_{36}; G_{54}=G_{45}; G_{64}=G_{46}; G_{65}=G_{56}.$$

Припустімо, що в об'єкті випробування  $S_x$ , що підключений до 2-го та 6-го вузлів, виникає сигнал величиною  $E = 1$  В (імітація корисного сигналу – тип I). Визначимо струми у гілках:

$$J_1=0; J_2=Ej\omega C_{26}; J_3=0; J_4=0; J_5=0; J_6=-J_2. \quad (9)$$

Після розв'язку СЛАР (6) знайдемо потенціали кожного вузла.

Далі припустімо, що сигнал виник в самому реакторі, наприклад між вузлами 5 та 6 (імітація сигналу завади – тип II). Потенціали вузлів для сигналу завад знайдемо аналогічно. Порівняємо тепер потенціали вузлів від корисного сигналу та сигналу завад – рис. 9. В вузлі 3 потенціал II сигналу завад того ж знаку, що і в вузлах 2, 4 та 6, тобто сигнал завад синфазний на вказаних вузлах. Потенціал корисного сигналу I на крайніх вузлах – парафазний, а на середньому – близький до нуля. Більш детальний аналіз потенціалів вузлів 1, 3 та 5 (виконаний при збільшенні по вертикалі рис. 9), свідчить про різні фазові характеристики вказаних сигналів, та їхнє сильне згасання на шляху до датчиків  $R$ .

#### Критеріальний аналіз об'єктів та результатів випробувань.

Номенклатура силових кабелів навіть одного класу напруги досить широка. Кабелі відрізняються перерізом жил, їхньою конструкцією, типом та параметрами захисних оболонок. Власне електричним випробуванням звичайно передують перевірка кабелю вимогам державних стандартів. При цьому виявляються помилки з обох сторін – як з боку заводів-виробників, так (як не дивно) і з боку органів Держстандарту. Виявленню таких помилок сприяє критеріальний аналіз – співставлення технічних характеристик, зведених до певних безрозмірних критеріїв. Критеріальний аналіз слід застосовувати і для зведення результатів випробувань. Тоді їх зручно співставляти між собою, особливо в разі конструктивних відмінностей випробуваних кабелів.

Методом інтегральних аналогів визначені два критерія конструктивної подібності кабельних виробів:

$$\pi_1''' = \frac{\left(\frac{U}{r_{жс}}\right) \varepsilon_a \omega^2 \Delta}{\left(\frac{I}{r_{жс}}\right)}, \quad \pi_2''' = \varepsilon_a \mu_a \omega^2 \Delta r_{жс}, \quad (10)$$

де  $U$  – номінальна напруга кабелю,  $I$  – тривалий допустимий струм,  $\omega$  – кругова частота,  $r_{жс}$  – радіус жили,  $\Delta$  – товщина ізоляції,  $\varepsilon_a$  – діелектрична проникність матеріалу ізоляції,  $\mu_a$  – магнітна проникність матеріалу ізоляції.

Розглянемо за критеріями (10) нормативні дані ГОСТ 16442-80 для кабелів з пластмасовою ізоляцією (рис. 10).

Всі типорозміри відповідають певним закономірностям за винятком одного. Як виявилось, це сталося внаслідок помилкової норми щодо номінального струму для одного з кабелів з мідними жилами за умов прокладки в повітрі.

Для аналізу результатів випробувань кабелів підвищеною напругою з одночасним вимірюванням рівню ЧР запропоновані інші критерії, отримані методом аналізу розмірностей. В критерії входить характеристика розрядів – уявний заряд  $q$ :

$$\pi_1' = \frac{\mu_a \Delta^2 f}{\rho}, \quad \pi_2' = \frac{U \varepsilon_a \Delta}{q}. \quad (11)$$

Перший критерій охоплює конструктивні параметри ізоляції (товщину  $\Delta$ ), властивості матеріалу жили (питомий опір  $\rho$ ) та частоту напруги ( $f$ ). Другий параметр включає в опосередкованій формі власну ємність кабелю, випробувальну напругу та рівень ЧР. Застосування цих критеріїв сприятиме кращому розумінню результатів випробувань різних типорозмірів кабелів, оскільки порівняння ведеться в площині відносних параметрів, де геометрично-конструктивні фактори нівелюються, а фактори, пов'язані з якістю власне кабелю – навпаки – підсилюються.

**У четвертому розділі** виконана експериментальна перевірка теоретичних досліджень режимів роботи запропонованого реактора, заходів щодо зменшення напруженості поля та ймовірності виникнення власних розрядів, а також схеми розпізнавання походження ЧР.

Досліджена вольт-амперна характеристика керованого реактора на основі низьковольтного трифазного трансформатора СО-1,6-0,4/0,23 при струмах управління від 0 до 3,5 А. Експериментальні ВАХ апроксимовані відомою функцією гіперболічного синуса. Вихідні характеристики реактора при цьому задовільно визначаються відомими рядами функцій Бесселя. На основі макету досліджені резонансні характеристики коливального контуру зі штучними ємностями величиною до 100 мкФ. Встановлено, що втрати в трансформаторі збудження сильно впливають на гостроту резонансної кривої. Добротність трансформаторів в режимі магнітокерованого реактора можна оцінити за паспортними даними втрат неробочого ходу  $P_{нх}$  та

короткого замикання  $P_{кз}$ .

$$Q = (2/3)S / (P_{нх} + (2/3)P_{кз}), \quad (13)$$

де  $S$  - номінальна потужність трансформатора,  $2/3$  – коефіцієнт використання встановленої потужності. Для малопотужних трансформаторів ( $5 < 20$  кВАр) величина добротності становить 20 – 35, для більш потужних може досягати кількох десятків. Такої добротності цілком достатньо для створення практичних випробувальних установок на базі стандартних 3-фазних трансформаторів. Удосконалення їх при використанні в разі магнітокерованих реакторів полягає лише в заміні первинних котушок незамкнутими екранами, які використовуються для прийому сигналів розрядів – як зовнішніх, так і внутрішніх. Крім того, бажано вдосконалити конструкцію самих котушок, в яких зменшуються джоулеві втрати (за рахунок збільшення перерізу дротів) та рівні напруженості в околицях особливих точок (за рахунок введення потенціалу в середину котушок, застосування екранів та профільної форми циліндричних котушок).

Виконано дослідження високовольтного магнітокерованого реактора на основі трансформатора БТЧ-20-6/0,4. В даному випадку спостерігалася значна розбіжність між розрахунковими та експериментальними ВАХ, знятими при наявності струму намагнічування. На нашу думку, це полягало у розмагнічувальній дії шпильок, якими була стягнута магнітна система реактора: саме для потоку намагнічування вони створювали перешкоду, внаслідок чого доводилося значно збільшувати струм порівняно з розрахунковим для досягнення заданої ВАХ. Для подолання розбіжності введений емпіричний коефіцієнт розсіяння потоку намагнічування конструктивними елементами магнітопроводу. Проведені досліджені схеми реактора при послідовному та паралельному з'єднанні робочих обмоток. Виходячи з аналізу режимів роботи запропонована мостова схема збудження реактора.

Експериментально досліджено вплив розподілу потенціалу вздовж поверхонь робочих котушок на ЧР. Показано, що рівень власних розрядів різко зростає, якщо нижні краї котушок стають високопотенціальними. Це привело до схем включення, наведених вище на рис.6. Встановлено також, що в існуючій конструкції внутрішні розряди відбуваються поблизу ізолюючих прокладок, а не у точках вводу високого потенціалу, як очікувалося з результатів аналізу поля. В даному разі причиною були повітряні краплі, для ліквідації яких слід проводити вакуумну обробку трансформаторів вимірювальних установок.

Експериментальне досліджено чутливість схеми реєстрації ЧР при використанні у якості екранів обмотки низької напруги трансформатора. Чутливість подібної системи виявилась достатньою для реєстрації ЧР з амплітудою 300 нКл, але розрізнявальна здатність виявилась низькою: власна частота сигналів склала біля 10-15 кГц. Причина полягає у виникненні власних резонансних коливань між індуктивностями та паразитними ємностями котушок. Звідси зроблено пропозицію щодо застосування замість первинних обмоток спеціальних незамкнутих екранів. Це сприятиме зростанню власної частоти, а значить і розрізнявальної здатності схеми.

Експериментально перевірена можливість розпізнавання ЧР в об'єкті контролю та у самому реакторі.

Для цього калібровочний сигнал подавався на ємність  $C_x$  (при імітації корисного сигналу), або до котушки реактора (при імітації завад). Відгуки, зареєстровані на екранах (первинних обмотках в режимі холостого ходу) показали (рис. 11), що ємнісна заступна схема рис. 8б якісно відповідає експериментальним фазовим характеристикам сигналів. Ознакою корисного сигналу в крайніх екранах (рис. 11а) є низький його рівень в центральному екрані (рис. 11б). Навпаки – ознакою сигналу-завади (рис. 11в) є високий його рівень на центральному екрані (рис. 11г). На рисунку позначені:  $q$  – калібровочний сигнал,  $\Pi$  – шуми.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача, пов'язана з вдосконаленням магнітокерованих реакторів трансформаторного типу для установок високовольтних випробувань силових кабелів. Коротко зупинимося на основних висновках роботи:

1. Розроблена конструкція магнітокерованого реактора для резонансних систем випробування об'єктів ємнісного типу. На відміну від реакторів, індуктивність яких змінюється для налаштування резонансу шляхом регулювання немагнітного зазору в магнітопроводі, що використовується у теперішній час, у запропонованій конструкції рухомі частини відсутні. При цьому, по-перше, відпадає потреба у системі регулювання реактора, що включає привідні механізми, змушені протидіяти електромагнітним зусиллям у немагнітному проміжку, по-друге, зникають низькочастотні шуми та вібрації, обумовлені цими зусиллями.
2. Виготовлена та досліджена експериментальна установка для випробувань об'єктів ємнісного типу на основі силового трансформатора потужністю 20 кВАр, напругою 6 кВ. На основі проведених досліджень сформульовані принципи отримання та регулювання випробувальної напруги. Запропонована методика розпізнавання власних та зовнішніх ЧР при використанні обмоток низької напруги базового трансформатора в якості датчиків системи вимірювання.
3. Розроблено методику проектування магнітокерованих реакторів для установок випробування силових кабелів з полімерною ізоляцією, яка враховує вплив паразитних ємностей реактора на чутливість схеми вимірювання ЧР.
4. Розроблена методика визначення ймовірних місць власних розрядів в ізоляційних проміжках високовольтних індуктивних пристроїв, яка базується на порівнянні асимптотичних характеристик електростатичних полів в особливих точках. Методика дозволяє обґрунтовувати конструкцію основних ізоляційних проміжків та необхідність застосування додаткових заходів для зниження вірогідності виникнення власних ЧР випробувального обладнання.
5. Запропонована схема виконання реактора резонансних випробувальних систем, елементи якого виконують роль датчиків ЧР. У цьому випадку відпадає необхідність у високовольтному конденсаторі зв'язку схеми вимірювань ЧР.
6. Розроблена методика визначення паразитних ємностей реактора, яка дозволяє визначити їх вплив на умови ослаблення ЧР на шляху від джерела до приймача.

7. Експериментально доведена можливість суттєвого зменшення частоти власних розрядів реактора шляхом зміни розподілу потенціалу по твірній котушок. На основі проведених досліджень запропоновані схеми включення елементів випробувальної системи.
8. Виконана оцінка гармонійних складових випробувальної напруги реактора, обумовлених нелінійністю його вольт-амперної характеристики. Доведено, що гармонійний склад випробувальної напруги відповідає вимогам нормативних документів.
9. Запропонована методика аналізу параметрів кабелів та результатів вимірювань за допомогою критеріальних співвідношень, отриманих на основі математичного апарату теорії подібності. За допомогою запропонованих критеріїв вдалося знайти помилки у діючих стандартах.
10. Теоретична значимість виконаних досліджень і отриманих наукових результатів полягає в подальшому розвитку теорії електричних машин і апаратів стосовно їх застосування в системах резонансних випробувань кабелів.
11. Практична значимість виконаних досліджень полягає в підвищенні ефективності випробувань об'єктів ємнісного типу за рахунок використання реактора трансформаторного типу, паразитні ємності якого утворюють мостову схему для визначення джерела сигналів за фазовими характеристиками.
12. Результати роботи використані ТК№131 "Електроізоляційна та кабельна техніка" Держспоживстандарту України та в навчальному процесі кафедр "Електропостачання" Харківського військового університету та "Електроізоляційна та кабельна техніка" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Нечаус А.О. Використання теорії подібності для вирішення задач стандартизації електротехнічних засобів // Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. - Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001. - Вип. 4(14). - С. 96-99.
2. Нечаус А.А. Применение теории подобия для стандартизации кабельных изделий // Збірник наукових праць. - Харків: МОУ, ХВУ, 2002. - Вип. 1(39). - С. 138-140.
3. Нечаус А.А. Применение теории подобия для стандартизации электротехнических изделий // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. №9, Т. 3. - С. 66-68.
4. Кононов Б.Т., Нечаус А.А. Контроль геометрических и электрических параметров силовых кабелей с помощью критериев подобия // Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. - Харків: ХВУ, 2003. - Вип. 1. - С. 103-109.  
*Здобувачем визначені критерії подібності та виконано аналіз вимог стандартів.*
5. Набока Б.Г., Кононов Б.Т., Нечаус А.А. Асимптотические характеристики и подобие электростатических полей соленоидов // Електротехніка і електромеханіка, - Харків: НТУ "ХПІ", 2003. - №2. - С. 96-101.



*Здобувачем виконані розрахунки електростатичних полів та проведений їх аналіз.*

6. Набока Б.Г., Нечаус А.А., Лактионов С.В. Оценка уровня частичных разрядов в системе емкостей трехфазного трансформатора // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ", 2003. - Вип. №9, Т. 2. - С. 124-129.

*Здобувачем виконаний теоретичний аналіз та експериментальна перевірка ємнісної моделі реактора.*

7. Набока Б.Г., Нечаус А.А. Уменьшение интенсивности частичных разрядов в реакторах систем контроля изоляции емкостных объектов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ", 2003. - Вип. №9, Т. 4. - С. 41-46.

*Здобувачем розроблені математичні моделі робочого проміжку реактора, виконані розрахунки та експериментальна перевірка розподілу потенціалів електростатичних полів.*

## АНОТАЦІЇ

**Нечаус А.О. Вдосконалення магнітокерованого реактора для установок високовольтних випробувань силових кабелів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – Електричні машини і апарати. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці та дослідженню керованого реактора для резонансних систем випробування силових кабелів з пластмасовою ізоляцією. Запропонована конструкція магнітокерованого реактора на базі стандартного силового трансформатора для резонансних систем випробування силових кабелів. Проведені розрахунки електростатичних полів у основному робочому проміжку, на основі запропонованої методики визначення найбільшої концентрації поля, яка базується на порівнянні асимптотичних характеристик поля у різних видах особливих точок, запропоновані заходи по вдосконаленню конструкції обмоток та по зменшенню небезпечної напруженості поля. У якості ємнісних датчиків ЧР запропоновано використовувати екрани, розташовані у основному робочому проміжку реактора. Виконані розрахунки чутливості запропонованої схеми реєстрації та розпізнавання ЧР. Запропоновані критеріальні співвідношення, які дозволяють проводити обробку результатів випробувань силових кабелів та формалізувати вимоги нормативних документів до них.

Висновки, зроблені за розрахунками режимів роботи запропонованого реактора, підтверджені при випробуваннях макета реактора на основі трифазного трансформатора потужністю 20 кВА, напругою 6 кВ.

**Ключові слова:** магнітокерований реактор, резонанс напруг, прогресивні типи електричних апаратів.

**Нечаус А.А. Усовершенствование магнитоуправляемого реактора для установок высоковольтных испытаний силовых кабелей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 -

Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2003.

Диссертация посвящена разработке и исследованию магнитоуправляемого реактора для резонансных испытательных систем силовых кабелей с пластмассовой изоляцией. Реактор необходим для компенсации большой реактивной мощности, потребляемой установкой при испытаниях кабелей на строительных длинах, т.е. в бухтах. Потребляемая мощность при этом уменьшается в  $Q$  раз, где  $Q$  – добротность колебательного контура, включающего емкость объекта контроля (кабеля) и индуктивность реактора. Обычно достигаются значения  $Q = 30 - 100$ . Традиционно для этой цели используются реакторы, управляемые путем изменения величины немагнитного зазора в магнитопроводе. Стоимость таких реакторов высока, в то же время они имеют ряд недостатков, связанных с полями рассеяния немагнитного зазора и электромеханической системой его регулировки. Поэтому возникла необходимость в разработке альтернативных конструкций магнитоуправляемых реакторов, не содержащих зазоров и электромеханических механизмов регулировки.

Предложена конструкция магнитоуправляемого реактора на основе стандартного силового трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме однотактного магнитного усилителя. При этом крайние обмотки работают при номинальном распределении потенциала по высоте катушек, из-за чего напряжение на объекте контроля становится биполярным. Вместо обмоток низкого напряжения расположены разрезные экраны, с помощью которых осуществляют съем сигналов частичных разрядов – как внешних, возникающих в кабеле, так и внутренних, возникающих в самом реакторе. Распознавание сигналов осуществляется по разным фазовым характеристикам: полезный сигнал на крайних экранах парафазный, а сигнал шумов – синфазный. Кроме того, сигнал помехи наблюдается и на среднем экране, где полезный сигнал почти полностью уравнивается.

С целью обоснования конструкции реактора и способов включения его обмоток предложена и проанализирована емкостная схема замещения для высокочастотных сигналов. Она содержит 28 частичных емкостей между 7 полюсами: 3 вывода обмоток на каждом стержне, 3 вывода экранов и 1 вывод общий (магнитопровод). Частичные емкости между экранами и магнитопроводом шунтируют измерительные резисторы схем регистрации частичных разрядов. Это необходимо учитывать при обосновании местоположения разрезного экрана в изоляционном промежутке между катушками и стержнями магнитопровода: чем ближе экран к магнитопроводу, тем больше изоляционный промежуток, но ниже чувствительность схемы регистрации частичных разрядов. Моделирование показало различие фазовых характеристик полезных сигналов и сигналов помех на трех экранах стержней, что позволяет выполнить их распознавание даже в том случае, когда внутренние разряды полностью подавить не удастся.

Для обоснования изоляционных промежутков и конструкции обмоток реактора проведен анализ электростатических полей в основном промежутке, а также определены сравнительные характеристики полей в особых точках – на краю обмоток и в областях ввода высокого потенциала. Особые точки в местах

изменения кривизны поверхности катушек названы *I* типа, а в местах изменения направления роста потенциала – *II* типа. Предложены мероприятия по совершенствованию конструкции обмоток реактора и снижению напряженности поля в особых точках. Показано, что возможно создание высоковольтного реактора с низким уровнем собственных частичных разрядов в сухом (безмасляном) исполнении.

При обработке экспериментальных данных, а также при формализации требований нормативных документов на силовые кабели предложено использовать критериальные соотношения, устанавливающие взаимосвязь параметров конструктивных материалов, геометрических размеров кабелей, а также режим их работы.

Экспериментальные исследования выполнены на макете реактора, выполненного на основе трехфазного трансформатора мощностью 20 кВА, напряжением 6 кВ. Предложена методика получения и регулировки повышенного испытательного напряжения на объекте контроля. Рабочее напряжение реактора должно быть по возможности ближе к испытательному напряжению кабеля, тогда установка используется наиболее эффективно.

Экспериментально проверено влияние распределения потенциалов по поверхности катушек на интенсивность собственных частичных разрядов реактора в режиме резонанса. Показано, что местами возникновения этих разрядов в меньшей степени являются особые точки, а в большей – места установки изоляционных прокладок. Предложена схема соединения обмоток реактора для исключения данного эффекта.

Проверка чувствительности и эффективности предложенной схемы измерения и регистрации частичных разрядов в исследуемом макете в целом дала удовлетворительные результаты. Сделано предположение, что при использовании в качестве емкостных датчиков частичных разрядов специальных экранов, возможно повышение чувствительности.

Особенность методики проектирования реакторов предложенного типа заключается в том, что экраны катушек реактора выполняют функцию снижения напряженности поля в особых точках рабочего зазора, и функцию датчиков частичных разрядов, то есть требования по их размещению должны удовлетворять обоим противоречивым условиям.

**Ключевые слова:** магнитоуправляемый реактор, резонанс напряжений, прогрессивные типы электрических аппаратов.

**Nechaus A.A. Refinement magnetic flux control of a reactor for installations of high- voltage test of power cables.** – Manuscript.

The dissertation for scientific degree of candidate of science, speciality 05.09.01 – Electrical machines and apparatus. - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2003.

The thesis is devoted to development and research magnetic control of the reactor of resonance systems of a trial of energy cables with plastic isolation. The construction magnetic control of the reactor for resonance test facilities

because of standard force transformer is offered. The calculations of electrostatic fields in basic working gap of the reactor because of offered technique of the definition of the greatest strength of a field are carried out which is based on compare of asymptotic performances of a field in different types of singular points, is offered i of a measure on perfecting a construction of windings and on a diminution of dangerous strength of a field. As capacity transmitters of partial discharges it is offered to use screens located in basic working gap of the reactor. The calculations of sensitivity of the given circuit of a measurement of performances of partial discharges are carried out. The criteria relations are offered which allow to carry out handling test dates of energy cables and to formalize the requirements of normative documents to him.

The conclusions made by results of calculations of operational modes of the offered reactor, are confirmed at a research of an experimental model of the reactor because of three-phase transformer by a potency 20 kVA, voltage 6 kV.

**Key words:** magnetic control the reactor, resonance of voltages, the test system, perfecting of a construction.

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика.

МП – магнітний підсилювач.

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь.

ЧР – часткові розряди.

Підп. До друку 24.02.2004 р. Формат видання 145x215.

Формат паперу 60x90/16. Папір офісний. Друк – ризографія.

Обсяг 0,9 авт. Арк.. Наклад 100 прим. Зам. № 91.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ “ХПІ”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---