



Електротехніка і Електроомеханіка

Электротехника и Электромеханика

Electrical engineering & Electromechanics

2007'4



Електротехніка і Електромеханіка
Электротехника и Электромеханика
Electrical engineering & Electromechanics

EIE

Науково-практичний журнал

2007'4

Держвидання

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України
КВ № 6115 від 30.04.2002 р.

Видання засновано Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" у 2002 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

Клименко Б.В. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків

Члени редколегії

Баранов М.І. д.т.н., начальник відділу НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

Батигін Ю.В. д.т.н., професор кафедри вищої математики НТУ "ХПІ", Харків

Босв В.М. д.т.н., професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ "ХПІ", Харків

Болюх В.Ф. д.т.н., професор кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ", Харків

Буткевич О.Ф. д.т.н., професор, головний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ

Вороновський Г.К. д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, завідувач кафедри електричних станцій НТУ "ХПІ", Харків

Гончаров Ю.П. д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ "ХПІ", Харків

Гурін А.Г. д.т.н., професор, завідувач кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ "ХПІ", Харків

Данько В.Г. д.т.н., професор, завідувач кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ", Харків (голова редакційної ради)

Загірняк М.В. д.т.н., професор, ректор КДПУ, Кременчук

Кириленко О.В. д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, заступник директора ІЕД НАНУ, Київ

Кравченко В.І. д.т.н., професор, директор НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

Лупіков В.С. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних апаратів НТУ "ХПІ", Харків

Маслієв В.Г. д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

Михайлов В.М. д.т.н., професор кафедри інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", Харків

Мілих В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин НТУ "ХПІ", Харків

Набока Б.Г. д.т.н., професор кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ "ХПІ", Харків

Намітоков К.К. д.т.н., професор кафедри світлотехніки і джерел світла ХНАМГ, Харків

Омельяненко В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

Панасенко М.В. д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

Подольцев О.Д. д.т.н., провідний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ

Пуйло Г.В. д.т.н., професор кафедри електричних машин ОНТУ, Одеса

Резцов В.Ф. д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, керівник відділення ІЕД НАНУ, Київ

Рудаков В.В. д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", Харків

Сосков А.Г. д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехніки ХНАМГ, Харків

Ткачук В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин і апаратів

НУ "Львівська політехніка", Львів

Шинкаренко В.Ф. д.т.н., професор, завідувач кафедри електромеханіки НТУУ "КПІ", Київ

Юферов В.Б. д.т.н., начальник відділу ННЦ ХФТІ, Харків

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002.

Тел. (057) 707-62-81. E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

ЗМІСТ

Електричні машини та апарати

Байша О.І., Козлов В.В., Братківська К.О., Набокова О.В.	Розрахунок швидкостей масла в призматичних каналах високовольтного масляного трансформатора із циліндричними обмотками	5
Бранспиз Ю.А., Поляченко Е.Ю.	Применение метода конформных отображений для определения рациональной геометрии двухполюсных электромагнитов	7
Гречко М.В., Дяченко В.В.	Шляхи поліпшення питомих показників вентильних індукторних генераторів	9
Дубинець Л.В., Зорічев А.В., Карзова О.О., Маренич О.Л., Устименко Д.В.	Вимоги до швидкодії захисних апаратів в електричних колах рухомого складу залізниць	13
Жорняк Л.Б., Осинская В.И.	Исследование методов моделирования работы системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН для повышения качества электроснабжения потребителей электроэнергии	15
Заблодский Н.Н., Овчаров А.А., Филатов М.А.	Экспериментальная оценка энергетических процессов в массивном роторе шнекового электротепломеханического преобразователя энергии	22
Клементьев А.В.	Исследование токов несимметричных коротких замыканий в бесконтактных совмещённых синхронных генераторах	25
Клименко Б.В.	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	28
Комісаренко О.І., Ламанов С.Л.	Вплив форми кривої спадання струму на енерговиділення при вимиканні навантаження	34
Кузьмин В.В., Шпаченко В.С.	К проблеме расчета силового воздействия магнитопровода на обмотки электрических машин	36
Лимонов Л.Г.	Об особенностях использования асинхронного электродвигателя для привода моталки	40
Пентегов И.В., Рымар С.В., Волков И.В., Ларченко Б.Б., M. Levin	Новые трехфазные автотрансформаторные фазосдвигающие устройства подавления высших гармоник тока	45
Плешков П.Г., Плешков С.П., Котыш А.И., Солдатенко В.П.	Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей на базе комплексной электроэнергетической системы с использованием возобновляемых источников энергии	50
Тетерко О.А.	Результати експлуатаційних випробувань відновлених електричних контактів контакторів ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму	53

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Баранов М.И., Носенко М.А.	Двумерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии	57
Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М.,	Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов	64
Бржезицкий В.А., Маслюченко И.Н., Троценко Е.А., Хоминич В.И.	Экспериментальное исследование электрической прочности высоковольтного ввода с комбинированной изоляцией	66

Електричні станції

Вороновский Г.К., Сергеев С.А., Старков К.А., Абашкина О.С.	Оценка предельно допустимой величины ожидаемого прироста нагрузки в городской распределительной сети 110 кВ, вызываемого ростом энерговооруженности быта	68
--	--	-----------

Ювілеї

Петрушин В.С.	К 60-летию со дня рождения	72
Список авторів		73
Abstracts		74
Вимоги	до оформлення статей і інформаційних матеріалів у науково-практичному журналі "Електротехніка і електромеханіка"	76

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" – передплатне видання. Звертаємо вашу увагу, що починаючи з 2006 року журнал виходить шість разів на рік. Вартість передплати на рік — 136,44 грн., на два місяці — 22,74 грн., на чотири місяці – 45,48 грн., на шість місяців – 68,22 грн., на вісім місяців – 90,96 грн., на десять місяців - 113,7 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою Президії ВАК України від 15.01.03 № 1-08/5 науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу "Електротехніка і Електромеханіка" та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ. Згідно з цим договором ВИНИТИ надає редакції журналу звіт про відображення статей з журналу у РЖ та БД ВИНИТИ. Звіт ВИНИТИ за 2005 рік буде опубліковано в одному з номерів журналу за 2006 рік.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.

Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів відповідно до Вимог, які публікуються у кожному номері журналу. Статті, оформлені згідно з Вимогами будуть публікуватися у першу чергу.

РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТЕЙ МАСЛА В ПРИЗМАТИЧНИХ КАНАЛАХ ВИСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ІЗ ЦИЛІНДРИЧНИМИ ОБМОТКАМИ

Байша О.І., к.т.н., Козлов В.В., к.т.н., Братківська К.О., Набокова О.В.
Запорізький національний технічний університет
Україна, 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, кафедра "Теоретичної та загальної електротехніки"
тел. (061) 769-83-94, 228-16-12

У статті подано розрахунки швидкості руху маслаї у силових трансформаторах. Отримані результати для прямокутних та призматичних каналів. Вони можуть бути використані для підвищення точності визначення розподілу температури у обмотках та розрахунку максимальної температури.

В статье представлены расчеты скорости движения масла в силовых трансформаторах. Получены результаты для прямоугольных и призматических каналов. Они могут быть использованы для повышения точности определения распределения температуры в обмотках и расчета максимальной температуры.

Номінальна потужність силових трансформаторів обумовлюється максимальними значеннями температур обмоток і сердечника при його тривалому навантаженні. Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів МЕК-354-91 [1] оперує максимальною температурою обмотки, що у свою чергу використовується для оцінки відносної швидкості теплового старіння ізоляції. Хоча фактична номінальна потужність і навантажувальна здатність обумовлюються температурою найбільш нагрітої точки обмотки, стандартами на трансформатори регламентоване перевищення середньої температури обмотки над температурою охолоджувального середовища (яке вимірюється по опору обмотки при номінальному струмі) [2]. Така невідповідність пояснюється труднощами безпосереднього виміру максимальної температури через наявність високої напруги в місці виміру.

Незважаючи на велику кількість робіт, пов'язаних з аналізом теплових процесів силових трансформаторів, ці розрахунки не завжди задовольняють вимогам до точності визначення температури. Складність теплових процесів пов'язана зі складною конфігурацією елементів конструкції, наявністю різномірних середовищ, і передачею тепла, як теплопровідністю, так і конвекцією.

Проблеми, що виникають при розрахунку теплових режимів трансформаторів, пов'язані, насамперед, з необхідністю рішення сполученої задачі, що включає рівняння теплопровідності усередині обмотки, рівняння конвекційного переносу теплоти в потоці трансформаторного масла й рівняння гідродинаміки. Закони теплообміну при течії теплоносія в трубах зі складним перетином вивчені мало, що пов'язано насамперед зі складністю визначення полів швидкостей у потоці рідини. Дотепер аналітична теорія сполучених задач слабо впроваджується в теплотехнічні розрахунки, що пояснюється складністю функціональних залежностей, отриманих при цьому рішень задач.

При відомому рішенні рівнянь гідродинаміки задача теплообміну є замкнутою й однозначною та може бути розглянута як окрема задача.

Рівняння гідродинаміки Нав'є-Стокса, що описують течію рідини в каналах, при деяких спрощеннях зводяться до інтегрування рівняння Пуассона. У прямокутній системі координат воно має вигляд

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (1)$$

де W – швидкість рідини, м/с; p – тиск рідини при нульових граничних умовах на поверхні каналу, яка змочується Γ , н/м²; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, н. с/м².

Приймаючи, що тиск p уздовж будь-якого перпендикулярного до потоку перетину рівномірний, тобто він залежить тільки від подовжньої координати z , одержимо, що тиск уздовж каналу міняється за лінійним законом $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\Delta p}{l} = \text{const}$. Рівняння Пуассона запишеться в наступному виді

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = -\frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l}, \quad (2)$$

де Δp – зміна тиску при переході від одного перетину до іншого, що знаходиться на відстані $z=l$ м, н/м².

Для більшості таких труб рішення рівняння (2) виражається через нескінченні суми функціонального ряду. Порівняно прості формули отримані тільки для круглих труб, плоских і кільцевих каналів [3].

У монографії Цоя П.В. [4] запропоновано метод наближеного розрахунку стабілізованого профілю швидкості в циліндричних каналах складного перетину. Крім круглих труб, плоских і кільцевих каналів у даній роботі розглядалися труби еліптичного й трикутного перетину.

Запропонований метод дозволяє здійснити наближений розрахунок стабілізованого профілю швидкості в закритих і відкритих каналах.

Для силових трансформаторів з масляним охолодженням характерним є наявність каналів прямокутної й призматичної форми (рис. 1).

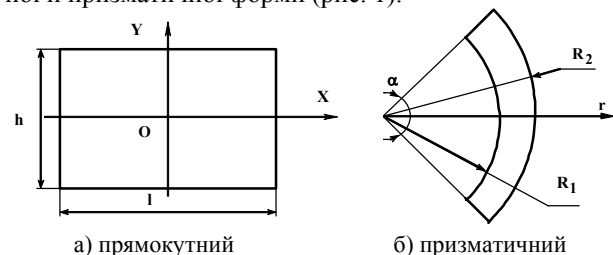


Рис. 1. Перерізи охолоджуючих каналів

Оскільки для в'язкої нестисливої рідини профіль стабілізованої швидкості залежить від геометрії перетину каналу, то наближене аналітичний вираз швидкості $W(x, y)$, що задовольняє нульовим граничним умовам, шукаємо через рівняння межі області Γ у вигляді

$$W(x, y) = \pm A * F(x, y) > 0; \quad x, y \in \Gamma, \quad (3)$$

де $F(x, y)$ – рівняння межі області Γ .

Коефіцієнт A знаходимо з умови збереження маси

$$W_{cp} * S = \pm A \iint_{\Gamma} F(x, y) dx dy > 0, \quad (4)$$

де W_{cp} – середня швидкість рідини, м/с; S – площа перетину каналу, м².

Тому поле швидкостей має вигляд

$$W(x, y) = \frac{W_{cp} * S * F(x, y)}{\iint_{\Gamma} F(x, y) dx dy}. \quad (5)$$

Для каналу із прямокутним перетином рівняння межі області в прямокутній системі координат (початок координат збігається із центром перетину, сторони перетину паралельні координатним осям) має вигляд

$$F(x, y) = \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right), \quad (6)$$

де l, h – розміри перетину каналу відповідно по осі OX та осі OY , м.

Формула (4) приводиться до вигляду

$$W_{cp} * S = A \int_{-h/2}^{h/2} dy \int_{-l/2}^{l/2} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) dx. \quad (7)$$

У силу симетрії каналу по обох осях досить розглянути тільки його чверть

$$W_{cp} * S = 4A \int_0^{h/2} dy \int_0^{l/2} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) dx. \quad (8)$$

Площа перетину прямокутного каналу

$$S = h \cdot l. \quad (9)$$

Зіставляючи (8) і (9), маємо

$$A = \frac{36W_{cp}}{(h \cdot l)^2}. \quad (10)$$

Тоді в першому наближенні розподіл швидкості в прямокутному каналі запишеться

$$W(x, y) = \frac{36W_{cp}}{h^2 l^2} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right). \quad (11)$$

Перейдемо до відносних координат

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \eta = \frac{y}{h}; \quad -0.5 < \xi < 0.5; \quad -0.5 < \eta < 0.5$$

$$W(\xi, \eta) = 2.25W_{cp} (1 - 4\xi^2) (1 - 4\eta^2). \quad (12)$$

У силу симетрії каналу максимальна швидкість спостерігається на осі каналу ($\xi_0 = 0$; $\eta_0 = 0$)

$$W_{max} = 2.25W_{cp}. \quad (13)$$

При $l \gg h$ отримане рішення збігається з формулою, отриманою для плоских каналів (2).

Для призматичного каналу рівняння границі області в циліндричних координатах (початок координат збігається із центром обмежуючих окружностей, вісь Oz збігається з віссю симетрії перетину каналу) має вигляд

$$F(r, \theta) = (r - R_1)(R_2 - r) \left(\frac{\alpha^2}{4} - \theta^2 \right) = 0, \quad (14)$$

де R_1, R_2 – відповідно, менший і більший радіуси кільця, з якого вирізаний перетин призматичного каналу, м; α – центральний кут, під яким видні бічні грані призматичного каналу, рад.

Формула (4) у циліндричних координатах має вигляд

$$W_{cp} S = A \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} d\varphi \int_{R_1}^{R_2} (r - R_1)(R_2 - r) \left(\frac{\alpha^2}{4} - \varphi^2 \right) r dr. \quad (15)$$

Площа перетину призматичного каналу

$$S = \frac{\alpha}{2} (R_2^2 - R_1^2). \quad (16)$$

Звідки

$$A = \frac{36}{\alpha^2 (R_2 - R_1)^2}. \quad (17)$$

Розподіл швидкості в призматичному каналі описується формулою

$$W(r, \theta) = \frac{9W_{cp} (r - R_1)(R_2 - r) (\alpha^2 - 4\theta^2)}{\alpha^2 (R_2 - R_1)^2}. \quad (18)$$

Переходячи до відносних координат

$$\xi = \frac{r}{R_1}; \quad \eta = \frac{\theta}{\alpha}; \quad m = \frac{R_2}{R_1}; \quad 1 < \xi < m; \quad -0.5 < \eta < 0.5$$

$$W(\xi, \eta) = \frac{9W_{cp} (\xi - 1)(m - \xi)(1 - 4\eta^2)}{(m - 1)^2}. \quad (19)$$

У силу симетрії каналу максимальна швидкість спостерігається на осі каналу (при $\eta_0 = 0$). Диференціюючи отримане вираження по змінній ξ і дорівнюючи похідну до нуля, одержимо

$$\xi_0 = \frac{m + 1}{2}. \quad (20)$$

Підставляючи значення η_0 й ξ_0 у рівняння (19), одержимо

$$W_{max} = 2.25W_{cp}. \quad (21)$$

Отримане рішення узгоджується з рішенням для каналу прямокутної форми.

ВИСНОВКИ

Вирази, що описують розподіл швидкостей у каналах прямокутної й призматичної форми, можуть бути використані для розрахунку теплообміну в силових трансформаторах з масляним охолодженням, а також інших теплообмінних апаратів, що мають канали аналогічної форми.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Публикация МЭК №354-91. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. - Київ: Держстандарт України, 1998. - 96 с.
- [2] ДСТУ 3663-97. Трансформатори силові. Допустимі перевищення температури та методи випробування на нагрівання. Введ. 14.05.99.- Київ: Держстандарт України, 2000.- 44 с
- [3] Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.. Справочник по теплогидравлическим расчетам. - Москва, Энергоатомиздат, 1984.- 296 с.
- [4] Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. - М., Энергоатомиздат, 1984.- 416 с.

Надійшла 03.10.2006

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Бранспиз Ю.А., д.т.н., доц.

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

Украина, 91034, Луганск, кв. Молодежный, 20-А, ВНУ им. В. Даля, кафедра прикладной физики

e-mail: branspiz@mail.ru

Поляченко Е.Ю.

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

Украина, 91034, Луганск, кв. Молодежный, 20-А, ВНУ им. В. Даля, кафедра "Компьютерные системы и сети"

e-mail: polyachenko@snu.edu.ua, polyachenko@rambler.ru

У роботі наведені результати визначення оптимальних геометричних розмірів для П-подібних електромагнітних систем по максимуму добутку напруженості над центральним полюсом на її градієнту і по максимуму цього градієнту.

В работе приведены результаты определения оптимальных геометрических размеров для П-образных электромагнитных систем по максимуму произведения напряженности над центральным полюсом на ее градиент и по максимуму этого градиента.

В электротехнической практике широкое распространение получили устройства с П-образными электромагнитами [1, 2]. Особенностью их является разомкнутая магнитная система и относительно большие рабочие зоны, в которых создается магнитное поле. Повышение эффективности применения этих электромагнитов, функциональное назначение которых состоит в создании определенной интенсивности магнитного поля в определенных рабочих зонах, осуществляется за счет выбора рациональных геометрических параметров полюсов этих электромагнитов. При этом критериями, по которым осуществляется выбор рациональных геометрических параметров полюсов электромагнитов, могут служить:

- напряженность магнитного поля (например, в системах, которые создают силовое воздействие на проводники с током);
- ее градиент (например, в системах, которые создают силовое воздействие на намагниченные до насыщения тела);
- произведение напряженности магнитного поля на ее градиент (например, в системах, которые создают силовое воздействие на парамагнитные тела).

Ранее, в работе [3], авторами приведены результаты по выбору рациональных размеров полюсов электромагнитов с П-образной системой, когда критерием было обеспечение максимума напряженности магнитного поля посередине междуполюсного зазора. При этом был использован метод конформных отображений, который позволил получить относительно простые аналитические зависимости, связывающие между собой основные геометрические параметры системы и параметры, характеризующие магнитное поле.

В данной работе, в развитие указанных результатов, приведены результаты решения задачи о выборе рациональных геометрических параметров полюсов П-образных электромагнитов, когда критериями такого выбора являются градиент напряженности магнит-

ного поля или произведение напряженности на ее градиент.

При этом для П-образного электромагнита расчетная схема его плоскопараллельного магнитного поля оставлена такой же, как и в работе [3] (рис. 1).

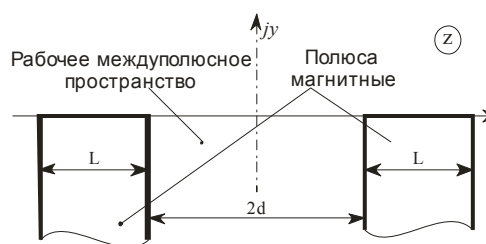


Рис. 1. Плоскопараллельная модель двухполюсной магнитной системы П-образного электромагнита

Соответственно этому для рассматриваемой системы имеем известную функцию конформного отображения внешней области вне полюсов (область Z на рис. 1, которая является исходной областью) на полюсу однородного поля с постоянной напряженностью H_0 [3]. Это позволяет по известному соотношению [4]

$$H_z \cdot \text{grad} H_z = \frac{1}{2} H_0^2 \cdot \frac{dt}{dz} \cdot \frac{d^2 t}{dz^2} \quad (1)$$

определить произведение напряженности поля на его градиент ($H \cdot \text{grad} H$) в рассматриваемом случае (здесь z и t – соответственно, комплексные координаты в исходной и отображенных областях, а H_z – напряженность поля в исходной области).

Что же касается определения градиента напряженности магнитного поля $\text{grad} H$ при конформном отображении исходной области на полюсу однородного поля с постоянной напряженностью, то учтем, что напряженность поля в области Z при указанном конформном отображении может быть определена как [5]

$$H_z = H_0 \cdot \frac{dt}{dz}, \quad (2)$$

что, в результате деления (1) на (2), дает

$$\text{grad}H_z = \frac{1}{2} H_0 \cdot \frac{d^2t}{dz^2} \quad (3)$$

Таким образом, используя (1) и (3) и соответствующую функцию конформного отображения из [3], для П-образного электромагнита можно записать следующее выражение для $\text{grad}H$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{U_0}{d^3} \cdot \frac{z}{K(k)} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2 \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^2} + k^2 \sqrt{1+\left(\frac{z}{d}\right)^2}}{\left[1+\left(\frac{z}{d}\right)^2\right] \cdot \left[1+k^2 \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^2\right]}, \quad (4)$$

а для $H \cdot \text{grad}H$ записать выражение

$$\frac{1}{4} \cdot \frac{U_0^2}{d^4} \cdot \frac{z}{(K(k))^2} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2 \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^2} + k^2 \sqrt{1+\left(\frac{z}{d}\right)^2}}{\left[1+\left(\frac{z}{d}\right)^2\right] \cdot \left[1+k^2 \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^2\right]}, \quad (5)$$

где U_0 – разность магнитных потенциалов между полюсами; $K(k)$ – эллиптический интеграл первого рода модуля $k = d/(L+d)$.

Непосредственный расчет по (4) и (5) показал, что критерии $\text{grad}H$ и $H \cdot \text{grad}H$, рассматриваемые как функции d , имеют максимум для заданных значений размеров h и L . Это позволяет осуществить решение задач определения такого значения d при фиксированных значениях h и L , которое удовлетворяет условию максимизации критериев $\text{grad}H$ и $H \cdot \text{grad}H$. Решение этих задач осуществлялось численно (как поиск максимума $\text{grad}H$ или $H \cdot \text{grad}H$ методом простого перебора аргумента d). При этом расчетное значение d , для которого имеет место максимум $\text{grad}H$ или $H \cdot \text{grad}H$ принималось в качестве результата решения d_{opt} .

Аналогично тому, как это сделано в [3], результат решения указанных оптимизационных задач представлен в виде функциональных зависимостей $d_{opt}/L = f(L/h)$, которые показаны на рис. 2 и 3.

В качестве перспективы развития предложенного подхода к рассмотрению магнитных систем укажем на принципиальную возможность применения его к поиску рациональных размеров и трехполюсных магнитных систем по критерию максимума градиента напряженности магнитного поля или произведения напряженности магнитного поля на его градиент, для чего можно воспользоваться результатами работы [6]. Это может рассматриваться как задача дальнейших исследований.

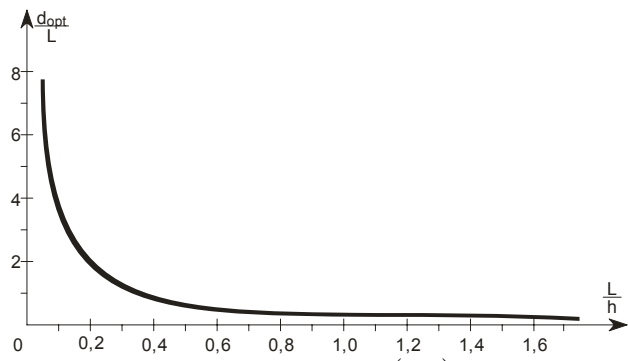


Рис. 2. Зависимость $d_{opt}/L = f(L/h)$ для $\text{grad}H$

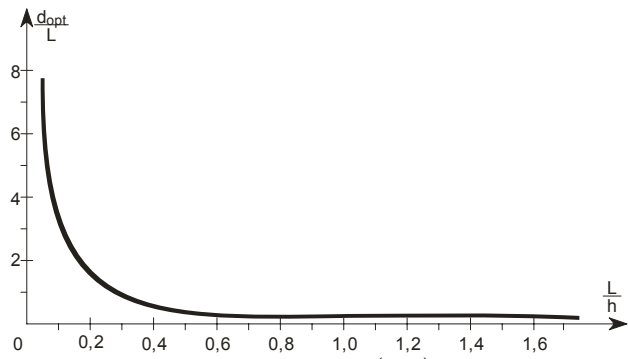


Рис. 3. Зависимость $d_{opt}/L = f(L/h)$ для $H \cdot \text{grad}H$

ВЫВОД

Полученные результаты позволяют решать практические задачи выбора рационального соотношения геометрии полюсов двухполюсных магнитных систем по критерию максимума градиента напряженности магнитного поля и произведения напряженности магнитного поля на его градиент.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов/ Под ред. Ю.К Розанова.– М.: Информэлектро, 2001.– 420 с.
- [2] Электротехнический справочник: В 3 т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства / Под. общ. ред. проф. МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов). – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.
- [3] Бранспиз Ю.А., Поляченко Е.Ю., Дранников А.А. Оптимизация зазора в дух полюсной магнитной системе по максимуму напряженности поля // Вестник НТУ "ХПИ": Тем. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – 2004. №21. С. 101-110.
- [4] Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Шкивные магнитные сепараторы: монография. – К.: Техника. 2000. – 303 с.
- [5] Бинс К., Лоуренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970.– 376 с.
- [6] Бранспиз Ю.А., Поляченко Е.Ю., Дранников А.А. Определение рациональных размеров трехполюсной магнитной системы по критерию максимума напряженности поля // Вестник НТУ "ХПИ": Тем. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – 2005. №35. - С. 23-28.

Поступила 01.10.2006

ШЛЯХИ ПОЛПШЕННЯ ПИТОМИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕНТИЛЬНИХ ІНДУКТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Гречко М.В., Дяченко В.В.

Гірничий факультет Української інженерно-педагогічної академії, Стаханов, Україна

*Виконано аналіз основних напрямків поліпшення питомих показників вентильних індукторних генераторів.**Выполнен анализ основных направлений улучшения удельных показателей вентильных индукторных генераторов.*

ПОСТАНОВА ПРОБЛЕМИ

Вентильні індукторні генератори знаходять застосування у якості джерела електропостачання автономних систем транспортних засобів, зварювальних та вітрогенераторів, електромеханічних перетворювачів частоти та інше.

Останні досягнення у галузі силової електроніки відкривають нові перспективи щодо подальшого удосконалення такого типу електромеханічних перетворювачів. Якщо раніше індукторні машини помітно поступалися іншим типам електричних машин за питомими показниками, то тепер з'являються можливості їх суттєвого покращення. Безумовними перевагами індукторних машин є безконтактність та простота конструкції, що обумовлює відносно низьку собівартість при масовому виробництві. Основний недолік індукторних машин, який довгий час стримував їх широке впровадження, полягає у недовикористанні магнітного потоку, оскільки при роботі машини магнітний потік змінюється тільки за величиною, залишаючись сталим за знаком. Як відомо, максимальна потужність генератора є добутком числа фаз, головних розмірів генератора, діапазону кутових швидкостей, максимального значення індукції у повітряному зазорі і лінійного навантаження [1]:

$$P = D^2 \cdot l \cdot n \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k$$

Якщо зважити на те, що більшість елементів у наведеній формулі є конструктивними сталими, то можна зробити висновок: потужність генератора буде змінюватись пропорційно кутовій швидкості та індукції повітряного зазору.

Відомо [2], що електромагнітна потужність індукторного генератора визначається:

$$P = m \cdot E \cdot I = m \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot k_W \cdot W \cdot \Phi \cdot I;$$

Тобто потужність пропорційна числу фаз та ЕРС, яка в свою чергу є функцією кутової частоти. При цьому частота струму, що генерується, визначається тільки числом зубців ротора та швидкістю його обертання:

$$f = \frac{Z_2 \cdot n}{60},$$

З аналізу наведеного можна зробити висновок.

Покращення питомих показників індукторних генераторів можливо як за рахунок удосконалення конструкції машини та застосування активних матеріалів з покращеними технічними характеристиками, так і за рахунок окремих схемних рішень.

Ціль роботи – аналіз основних напрямків поліпшення питомих показників індукторних генераторів.

Розглянемо перспективи покращення питомих показників вентильних індукторних генераторів за рахунок вказаних вище чинників.

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ІГ

Оскільки потужність генератора пропорційна індукції у повітряному зазорі, то конструктивне зменшення зазору автоматично призведе до збільшення індукції, а значить і потужності. Але на практиці зменшення зазору обмежено радіальною деформацією заліза ротора, радіальним люфтом у підшипникових вузлах та величиною деформації заліза від магнітострикції.

Таким чином, поліпшення показників за рахунок подальшого зменшення повітряного зазору практично вичерпане.

У багатьох джерелах наголошується, що кутова швидкість ІГ, а отже і максимальна їх потужність обмежується лише міцністю характеристикою заліза [3]. На практиці обмеження потужності при збільшенні кутової частоти настає з причин економічної доцільності, тому що робота на збільшених кутових частотах призводить до різкого зростання втрат в магнітопроводі, для зменшення яких потрібно застосувати більш якісні, а отже і більш дорогі феромагнітні матеріали. Крім того, експлуатація машин на збільшених частотах потребує використання більш якісних, а отже і значно більш дорогих підшипникових вузлів. Практично робоча частота ІГ має визначатися знаходженням компромісного рішення між вартісними показниками виробництва та його максимальними питомими показниками, тобто знаходженням максимуму цільової функції

$$G = \frac{P_{\text{ПІТ max}}}{C_{\text{min}}},$$

де $P_{\text{ПІТ max}}$ – максимально досяжна питома потужність $P_{\text{ПІТ}} = f(m, f, W, \Phi, I)$;

C_{min} – економічні витрати $C_{\text{min}} = f(C_{\text{матер}}, C_{\text{вироб}}, C_{\text{експ}})$.

Під економічними витратами у даному випадку ми розуміємо вартість активних матеріалів, витрати на виробництво і експлуатаційні витрати.

Загальною конструктивною особливістю індукторних машин є ротор зубчатої конструкції. Зубчатий ротор на високих кутових швидкостях може стати причиною обмеження потужності внаслідок розігріву машини від тертя ротора об повітря [4]. Особливістю

роботи більшості генераторів у якості джерела живлення автономних транспортних систем та вітрогенераторів є значний діапазон кутових швидкостей, що викликає відповідно зміну як потужності, так і параметрів напруги, що генерується. Отже діапазон кутових швидкостей є одним з вирішальних факторів при проектуванні ІГ певного призначення.

Ще одне конструктивне рішення, що може призвести до поліпшення питомих показників ІГ, вбачається в збільшенні частоти струму, що генерується, за рахунок збільшення фаз (числа пар полюсів) [5]. При цьому виникає необхідність у розв'язанні задачі оптимального співвідношення кількості фаз та головних розмірів машини. У разі, коли генератор працює на випрямляч, перехід на число фаз більше трьох хоч і вимагає застосування більшої кількості діодів, одночасно приводить до зменшення величини пульсації випрямленого струму. Перехід на більшу кількість фаз найбільш привабливим вбачається в індукторних генераторах для вітрогенераторів, що дозволить зменшити вагу силового агрегату вітрогенератора за рахунок зменшення передаточного числа редукторів.

Певний інтерес являє собою напрямок удосконалення генератора за рахунок оптимізації магнітного ланцюга. Так в [5] порівнюється варіант ІГ з зовнішньо-замкненим магнітним потоком та генератора з внутрішньо-замкненим магнітним потоком – секціоном. Як доведено у джерелі, секціон має кращі питомі показники завдяки меншому еквівалентному магнітному опору. Таке технічне рішення одночасно можна віднести як до конструктивного, так і до схемного шляху удосконалення електричних машин.

ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПОЛІПШЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Застосування активних матеріалів з покращеними властивостями безумовно може призвести до певного поліпшення питомих показників. Наприклад, застосування обмоткових дротів з термостійкою ізоляцією дозволяє збільшити щільність струму, а значить і потужність машини. Суттєво покращити об'ємні питомі показники можливо за рахунок використання феромагнітних матеріалів зі збільшеною індукцією насичення. Існують феромагнетики у яких індукція насичення сягає 2,2 Тл, але широке використання таких матеріалів стримується помітним зростанням собівартості машини. З причини економічної доцільності знаходять обмежене застосування високоерціативні магніти. Зважаючи на викладене вище, можна стверджувати, що в перспективі при розвитку технологій і масовому виробництві активних матеріалів з поліпшеними якість, питомі показники генераторів традиційних схемних та конструкційних рішень можна суттєво покращити.

ПРОГРЕСИВНІ СХЕМНІ РІШЕННЯ ІНДУКТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Перспективним виглядає принцип суміщеності в електричних машинах. [6] Традиційно індукторні генератори невеликої потужності мають окремі обмотки збудження та якорну, а потужні генератори можуть мати окремий збуджувач, часто об'єднаний конструк-

тивно у один корпус з основним генератором. Суміщеність функцій окремими елементами генератора у більшості випадків призводить до спрощення конструкції та здешевлення виробництва машини.

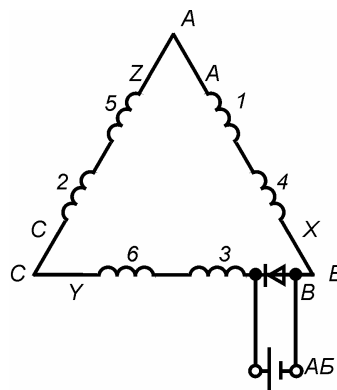


Рис. 1

Розглянемо окремі схеми суміщених індукторних генераторів.

На рис. 1 подано схему ІГ, у якому якорна обмотка одночасно виконує функції обмотки збудження. Джерело збудження включається у розрив однієї з фаз зустрічно паралельно діоду [7]. Суттєвими недоліками такого генератора є гальванічний зв'язок між джерелом збудження та навантаженням.

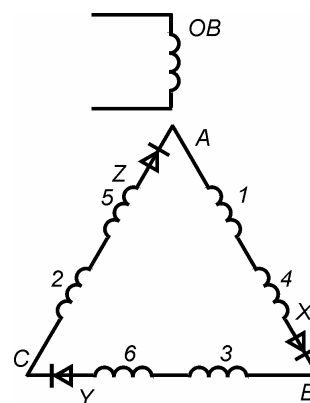


Рис. 2

Спроби вирішити проблему гальванічного зв'язку у такому генераторі привели до двох окремих схемних рішень: автомобільного індукторного генератора з регулятором напруги – перетворювачем [8] та двообмотковому генератору. У генераторі з регулятором напруги–перетворювачем (рис. 4) збудження здійснюється на збільшеній частоті від спеціального перетворювача. Гальванічна розв'язка досягається за рахунок трансформаторного зв'язку перетворювача та якорної обмотки генератора.

На рис. 2, 3 надано схему двообмоткового генератора [9]. Особливістю такого генератора є наявність обмотки збудження та якорної, які розташовані на одних і тих же стержнях. Завдяки діодам, які включені послідовно з фазами, що утворюють трикутник, виникає додатковий магнітний потік збудження від струму навантаження. Таким чином, результуючий магнітний потік є сумою магнітних потоків від обмоток збудження та якорної.

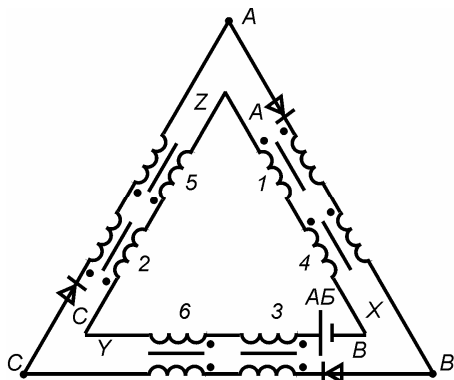


Рис. 3

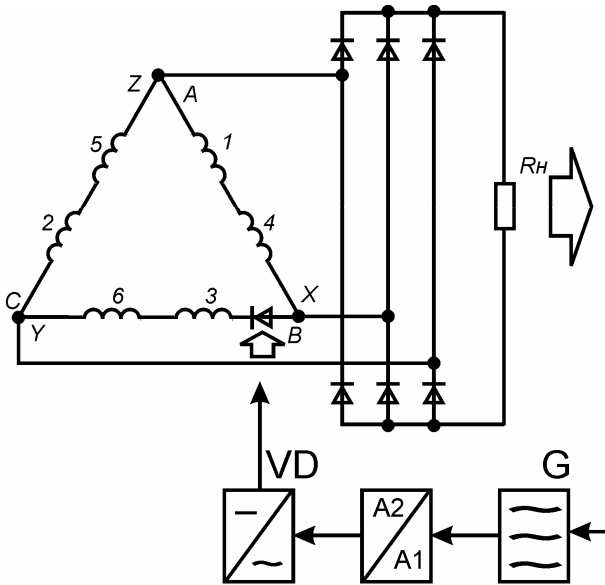


Рис. 4

Суттєвим недоліком такого генератора є наявність додаткового некерованого магнітного потоку збудження від якірної обмотки. Цей недолік подолано в схемному рішенні, поданому на рис. 5. Заміна некерованих діодів на опотиристри дозволила не тільки здійснювати регулювання вихідної напруги генератора, а також ефективно захищати обмотки генератора від перевантаження та струмів коротких замикань [10].

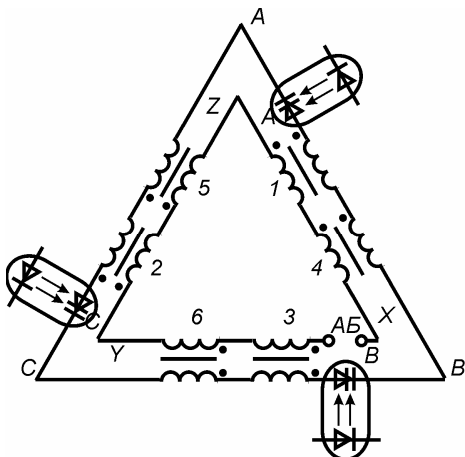


Рис. 5

Ще один варіант суміщеного генератора являє собою генератор з магнітоелектричним збудженням (рис. 6, 7).

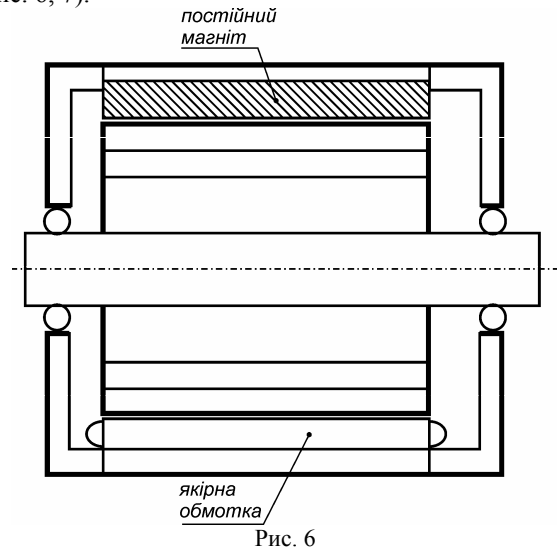


Рис. 6

Особливістю такого генератора є комбіноване використання магнітоелектричного і електромагнітного збудження. Наявність постійних магнітів забезпечують такому генератору режим самозбудження, а струм навантаження – додатковий магнітний потік, що суттєво збільшує потужність генератора. Завдяки використанню опотиристорів, окрім регулювання рівня вихідної напруги за допомогою спеціального реле-регулятора, здійснюється захист обмоток від перевантаження, а магнітів – від ударних струмів та струмів короткого замикання, які негативно впливають на магніти.

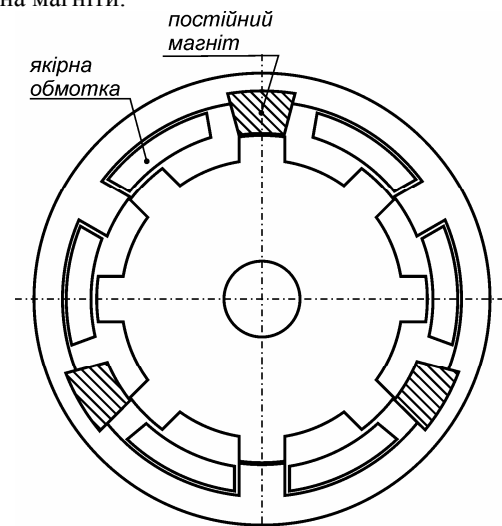


Рис. 7

На рис. 8 наведено розрахункові питомі показники індукторного генератора з зовнішньозамкненим магнітним потоком (G_{306} – максимальна питома потужність серійного генератора індукторного типу Г306, $V\uparrow$ – максимальна потужність генератора за рахунок використання феромагнітних матеріалів зі збільшеною індукцією насичення, $T\uparrow$ – максимальна потужність генератора за рахунок використання більш якісних ізоляційних матеріалів).

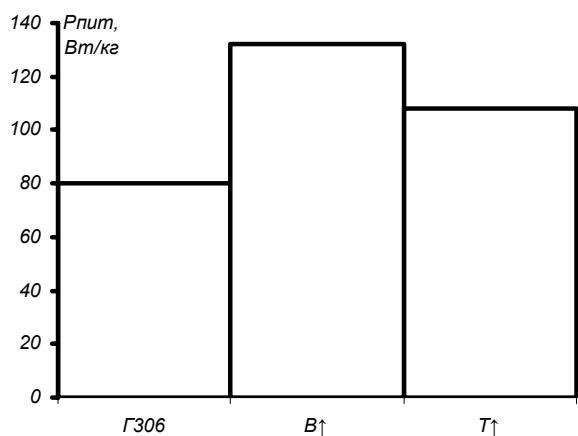


Рис. 8

На рис. 9 наведено питомі показники індукторних генераторів, отримані експериментальним шляхом (Г306 – максимальна питома потужність індукторного генератора із зовнішньозамкненим магнітним потоком типу Г306, 2 – максимальна потужність генератора за схемою рис. 1, Г6/8 – максимальна потужність генератора із внутрішньозамкненим магнітним потоком Г6/8, 4 – максимальна потужність генератора за схемою рис. 3).

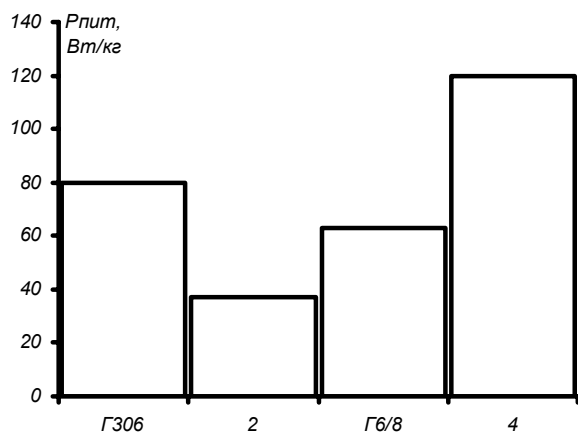


Рис. 9

ВИСНОВКИ

1 Найбільш перспективними в теперішній час вбачається варіант поліпшення питомих показників за рахунок конструктивного рішення: зміни схеми магнітного ланцюга.

2 Удосконалення індукторних генераторів у теперішній час за рахунок використання активних матеріалів з кращими технічними характеристиками стримується критерієм економічної доцільності.

3 Досягти максимальних питомих показників для індукторних генераторів можливо за рахунок комбінації окремих шляхів. Наприклад, за рахунок конструктивних та схемних рішень їх можна покращити в 1,3...1,5 рази.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы. М., Энергия, 1970, 192 с.
- [2] Постников И.М. Проектирование электрических машин. К., государственное издательство технической литературы УССР, 1960, 910 с.
- [3] Гречко М.В., Дяченко В.В. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик вентильного генератора індукторного типу з суміщеною обмоткою. // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – №42. – С. 32-36.
- [4] Гречко М.В., Дяченко В.В. Експериментальне дослідження втрат в індукторних машинах від тертя роторів об повітря. // Електротехніка та електроенергетика. – 2006. – №1.
- [5] М.В. Гречко, В.В. Дяченко. До питання оптимізації конструктивних параметрів автотранспортних індукторних генераторів. // Електротехніка та електромеханіка. – 2006.
- [6] Лущик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. – К.: Техніка, 1993.– 203 с. Мова рос.
- [7] Лущик В.Д. Вентильні генератори індукторного типу з суміщеними обмотками //Вісник Харківського державного політехнічного університету. Вип. №84, 2002, С. 129–130.
- [8] Автомобільний трифазний вентильний індукторний генератор з регулятором рівня вихідної напруги. / Гречко М.В., Дяченко В.В. – №2004031937, Заявл. 16.03.04
- [9] Гречко М.В., Дяченко В.В. Аналіз конструктивних та схемних рішень генераторів індукторного типу. // Збірник наукових праць. – Миколаїв: НУК, 2005. – ч. 2. – С. 135-142.
- [10] Автотракторний індукторний трифазний вентильний генератор з комбінованим збудженням. / Гречко М.В., Дяченко В.В. – № а200605928, Заявл. 29.05.06

Надійшла 29.09.2006

ВИМОГИ ДО ШВИДКОДІЇ ЗАХИСНИХ АПАРАТІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Дубинець Л.В., д.т.н., проф., Зорічев А.В., Карзова О.О., Маренич О.Л., к.т.н., доц., Устименко Д.В., к.т.н. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, Україна, 49010, Дніпропетровськ, вул. Ак. Лазаряна, 2, "ДПТ", кафедра "Автоматизований електропривод" тел. (056) 373-15-47, факс (056) 247-18-66, e-mail: dnuzt@diit.edu.ua

У статті розглянуті питання швидкодії апаратів захисту електричних кіл рухомого складу залізниць від струмів короткого замикання. Наведені рекомендації щодо бажаних чисельних значень часу спрацювання захисних апаратів.

В статье рассмотрены вопросы быстрей действия аппаратов защиты электрических цепей подвижного состава железных дорог от токов короткого замыкания. Приведены рекомендации относительно желательных численных значений времени срабатывания аппаратов защиты.

ВСТУП

На діючому рухомому складі залізниць питання захисту обладнання від коротких замикань (КЗ) та перевантажень в основному вирішено. На електрорухомому складі (ЕРС) постійного струму при повному КЗ, наприклад у випадку перекидання дуги з найближчого струмоприймача до щіткотримача тягового двигуна на землю, зростання струму визначається тільки параметрами тягової мережі і живлячої підстанції. Швидкість його зростання у цьому випадку досягає 20-30 кА. Захист у таких випадках забезпечується швидкодіючим вимикачем, який безпосередньо реагує на струм КЗ, як тільки останній досягає значення уставки, і розриває коло, яке з'єднує струмоприймачі з тяговими двигунами. Швидкодія цих вимикачів така, що коло розривається до того, як струм КЗ досягне сталого значення.

На ЕРС змінного струму основним апаратом для захисту від КЗ є головний вимикач, після відключення якого розривається з'єднання первинної обмотки тягового трансформатора із струмоприймачами. Швидкодіючі вимикачі, головні вимикачі та інші захисні апарати, які передбачені заводами-виробниками рухомого складу в основному виконують своє призначення при захисті кіл локомотивів.

Але в деяких випадках, наприклад при створенні загальних електричних силових кіл електровоза і пасажирських вагонів, недостатньо уваги приділяється питанню швидкодії апаратів, які захищають ці кола від струмів КЗ.

В деяких випадках при вирішенні питань захисту електричних кіл рухомого складу залізниць недостатньо уваги приділяється питанню швидкодії апаратів, які захищають ці кола від струмів короткого замикання. Наприклад, захист від струмів КЗ кіл опалення пасажирських вагонів, які живляться від спеціальної обмотки тягового трансформатора електровозів типу ЧС8, здійснюється з допомогою головного вимикача електровозу, номінальний час спрацювання якого 0,04 с. Сигнал на розмикання головного вимикача (ГВ) електровоза подається через два проміжних якірних реле, номінальний час спрацювання кожного з яких 0,02 с (рис. 1).

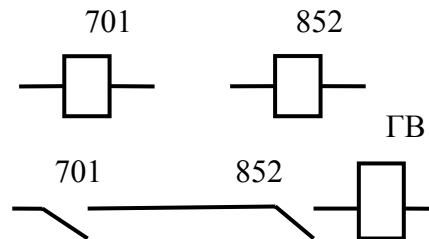


Рис. 1. Котушки та контакти проміжних реле, що подають сигнал на відключення ГВ:

701, 852 – проміжні реле, ГВ – головний вимикач

Отримання сигналу на спрацювання реле 701 (702) та 852 показано на рис. 2.

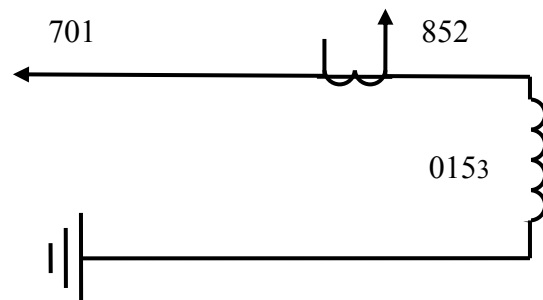


Рис. 2. Схема живлення опалення пасажирських вагонів від електровозу ЧС8

015₃ – вторинна обмотка тягового трансформатора, від якої живляться печі опалення пасажирських вагонів. При перевантаженнях та КЗ у колах опалення сигнал поступає на котушки проміжних реле (див. рис. 1), які розривають свої контакти у колі котушки ГВ, головний вимикач розмикає коло живлення електровозу.

Таким чином, сумарний час ($t_{\text{сум}}$) від моменту виникнення КЗ до розмикання кола головним вимикачем складає:

$$t_{\text{сум}} = (0.04 + 2 \cdot 0.02) = 0.08 \text{ с.}$$

Відомо, що перехідний процес при раптовому КЗ на затискачах вторинної обмотки трансформатора середньої потужності, до яких можна віднести розглядаємий варіант, продовжується 3-4 періоду [1]. Зміна струму при цьому показана на рис. 3. На цьому рисунку величина $i_{1к}$ – це струм КЗ; $i_{1к,y}$ – усталена складо-

ва струму КЗ; $i_{1к,в}$ – вільна складова струму КЗ; $I_{1к,уд}$ – ударний струм КЗ; φ_k – кут, на який струм відстає по фазі від напруги в усталеному режимі.

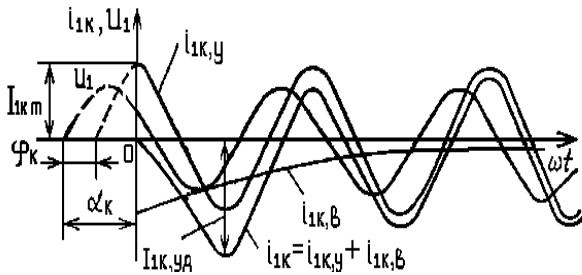


Рис. 3. Графік зміни струму раптового КЗ на затискачах вторинної обмотки трансформатора

Схема заміщення трансформатора при раптовому КЗ у колі обмотки опалення показана на рис. 4.

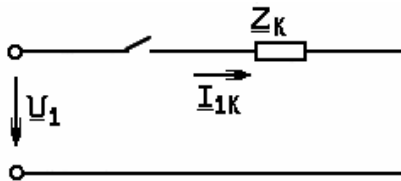


Рис. 4. Схема заміщення трансформатора при раптовому КЗ

Усталений струм КЗ змінюється по косинусоїді, тому період зміни цього струму дорівнює 0,02 с (частота струму 50 Гц). Тобто, при КЗ на затискачах обмотки опалення, наприклад, при пробі "на корпус" у високовольтному міжвагонному з'єднанні, у колі живлення опалення вагонів через чотири періода зміни встановлюється усталений струм КЗ.

Значення усталеного струму КЗ у обмотці опалення визначається із виразу:

$$I_{1к,у} = I_{ном} \cdot \frac{100}{u_k}, \quad (2)$$

де $I_{ном}$ – діюче значення номінального струму у обмотці опалення, u_k – напруга КЗ, %.

У нашому випадку $u_k = 5\%$.

$$I_{ном} = \frac{P_{опал}}{U_{опал}}, \quad (3)$$

де $P_{опал}$ – потужність обмотки опалення тягового трансформатора електровоза ЧС8, $U_{опал} = 3000$ В – напруга обмотки опалення.

В числах:

$$I_{ном} = \frac{1500 \cdot 10^3 \text{ ВА}}{3000 \text{ В}} = 500 \text{ А},$$

$$I_{1к,у} = 500 \cdot \frac{100}{5} = 10000 \text{ А}.$$

Амплітуда усталеного струму:

$$I_{1к,max} \sqrt{2} \cdot 10000 = 14000 \text{ А}.$$

Ударний струм $I_{1к,уд}$ (див. рис. 3) дорівнює:

$$I_{1к,уд} = k \cdot I_{1к,max}, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт, що показує, у скільки разів ударний струм КЗ більше амплітуди усталеного струму КЗ. У нашому випадку значення k можна прийняти 1,5 [1].

Тоді:

$$I_{1к,уд} = 1.5 \cdot 14000 = 21000 \text{ А}.$$

Таким чином, до розмикання кола опалення головним вимикачем у колі протікає струм, значно більше ніж $I_{1к,у} = 10000$ А.

При вмиканні на КЗ електропневматичного контактора 710, який призначений тільки для оперативних комутацій номінального навантаження 500 А, відбувається не тільки різке збільшення струму через його силові контакти, а й збільшення перехідного опору $R_{пер}$ контактів через послаблення контактного тиску, яке викликається значними електродинамічними силами. Теплова енергія, яка при цьому виділяється у місці контакту

($\int_0^{i_{к,у}} i^2 \cdot R_{пер} dt$, де i – миттєвий

струм КЗ), різко зростає. Це об'єктивно може привести до розплавлення та зварювання контактів контактору 710, що й має місце на практиці.

ВИСНОВОК

Доцільно значно зменшити в порівнянні з 0,08 с час спрацювання захисної апаратури. Бажано, щоб цей час був менший часу, який відповідає півперіоду зміни струму, тобто менший 0,01с.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Б.Ф. Токарев. Электрические машины. М. Энергоатомиздат, 1990 г.
- [2] Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. М. Транспорт, 1980.

Надійшла 27.03.2007

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УСТРОЙСТВОМ РПН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Жорняк Л.Б., к.т.н., доц., Осинская В.И.

Запорожский национальный технический университет
Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра электрических аппаратов
тел.(0612) 64-46-25, факс:64-21-41, e-mail:zproton@zntu.edu.ua

Досліджені питання підвищення якості напруги мережі споживачів електроенергії. Виконано дослідження системи регулювання напруги силового трансформатора з РПН типу РНОА – 110/800 в пакеті програм Matlab (Simulink 4).

Исследованы пути повышения качества сетевого напряжения у потребителей электроэнергии. В пакете программ Matlab (Simulink 4) выполнено исследование системы регулирования напряжения силового трансформатора с РПН типа РНОА – 110/800.

Одна из важных задач, возникающих в процессе автоматизации управления режимами работы электрических сетей, – поддержание заданных уровней напряжения на шинах подстанций. Централизованное регулирование напряжения на подстанциях предусматривает широкое использование силовых трансформаторов и автотрансформаторов, содержащих устройство регулирования под нагрузкой (РПН). Автоматизация управления силовых трансформаторов с РПН в распределительных сетях с помощью широко распространенных автоматических регуляторов напряжения трансформаторов – эффективное средство улучшения качества регулирования и поддержания оптимальных уровней напряжения [1]. На узловых подстанциях связи сетей различного номинального напряжения регулирование напряжения приводит к перераспределению потоков реактивной мощности в энергосистеме. В этом случае даже небольшие изменения напряжения на одной из регулируемых подстанций могут привести к значительным перераспределениям потоков реактивной мощности.

Питающие сети энергосистемы, как правило, неоднородны. Высокую степень неоднородности создают автотрансформаторы связи в замкнутых контурах, что обуславливает неблагоприятное потокораспределение и, как следствие этого, снижение экономичности работы сети. Для экономического распределения мощностей в контур включается дополнительная ЭДС, создающая уравнивающую мощность [2]. Эта ЭДС, имеющая сдвиг по фазе по отношению к основному напряжению, создается последовательным регулировочным трансформатором с соответствующей схемой соединения обмоток. Регулирование осуществляется устройством, аналогичным по принципу действия РПН трансформаторов. Внедрение ЭВМ во всех звеньях управления режимами работы электрических сетей – современная тенденция создания автоматизированных систем энергетики [3, 4]. Энергосистемы уже имеют значительный арсенал вычислительных средств, который в настоящее время быстро изменяется как в качественном, так и в количественном отношении. Широко применяются также системы телемеханики, которые используются для сбора, обработки информации и передачи управляющих воздействий на энергетические объекты. Научно-исследовательскими организациями разработан целый ряд алгоритмов и программ оптимального регулирования

напряжения с целью получения минимума потерь активной мощности и снижения ущерба от некачественного электроснабжения потребителей. Все это обуславливает актуальность внедрения систем автоматизированного управления режимами электрических систем. Составная задача таких систем – телерегулирование напряжения на подстанциях в темпе изменения схемы и режима работы сети путем программного объединения технических средств, располагаемых непосредственно на подстанциях и диспетчерских пунктах энергосистемы, что позволяет осуществить автоматизацию дистанционного управления с выходом через управляющий вычислительный комплекс непосредственно на подстанции.

В настоящее время показатели качества напряжения у потребителей электроэнергии часто не отвечают установленным нормам [1]. Это свойственно как для производственных, так и для городских сетей. Проблема качества электроэнергии тесно связана с надежностью и ресурсом работы различного рода потребителей [2]. Более того, особо требовательные из потребителей могут функционировать только при высоком качестве напряжения [3, 4]. Важнейшим параметром качества электроэнергии является уровень напряжения. Для наиболее экономичной и безаварийной работы потребителя необходимо, чтобы отклонение фактической величины напряжения, при котором он получает электроэнергию, от своего номинального значения не превышало установленной нормами допустимой величины. При этом желательно, чтобы отклонения напряжения вообще были минимальными. Требования к точности поддержания напряжения различны для разных видов нагрузок. Особенно нежелательно отклонение напряжения в сторону его уменьшения, которое приносит убытки во всех областях промышленности [2-8]. Также понижение напряжения увеличивает потери мощности в электросетях [2, 3]. Поскольку колебания напряжения являются принципиально неизбежными (ввиду изменения режимов работы сетей и потребителей), то для обеспечения необходимых уровней напряжения требуется его регулирование.

Практически во всех энергосистемах применяется большое количество устройств, которые обеспечивают поддержание необходимого уровня напряжения. Это, прежде всего, трансформаторы с регулируемым под нагрузкой коэффициентом трансформации, конденсаторные батареи, реакторы, синхронные компен-

саторы, генераторы электростанций, и т. п. [2, 9]. Указанные устройства оснащаются регуляторами, которые обеспечивают поддержание напряжения на определенном уровне. Основными средствами регулирования напряжения в электрических сетях являются силовые трансформаторы с устройствами регулирования под нагрузкой (РПН). Существуют три основных направления повышения качества электроэнергии. В первую очередь, это – рационализация средств электроснабжения. К этому направлению относят повышение мощности сети, питание нелинейных потребителей повышенным напряжением и др. Второе направление предусматривает усовершенствование самих потребителей: обеспечение номинальной загрузки электродвигателей, использование многофазных схем выпрямления, включение в состав потребителей корректирующих устройств и т. д. Третье направление предполагает использование устройств коррекции качества – регуляторов одного или нескольких параметров электроэнергии или связанных с ними параметров потребляемой мощности [4, 5].

Наиболее экономически предпочтительным в настоящее время является третье направление, поскольку изменение структуры сети или обновление всех потребителей требует значительных затрат. Для обеспечения надежной работы существующего оборудования необходимо применять методы и средства регулирования качества электрической энергии.

Автоматическое регулирование напряжения на шинах электростанций и районных подстанций преимущественно осуществляется в виде встречного регулирования, при котором в период наибольших нагрузок напряжение устанавливается выше номинального напряжения сети (с целью компенсации потерь напряжения у потребителей). В период же наименьших нагрузок напряжение автоматически понижается. В условиях эксплуатации стремятся, по возможности, уменьшить количество переключений ответвлений трансформатора, сознательно идя на некоторое снижение качества регулирования, но добиваясь этим повышения надежности систем электроснабжения. Для этого задают закон регулирования, который нечувствителен к кратковременным колебаниям напряжения, но реагирующий на отклонения, большие, чем зона нечувствительности.

Для повышения устойчивости регулирования в [4, 5] предложена модель, которая позволяет учитывать знак производной огибающей регулируемого напряжения, что позволяет не производить дополнительного переключения ответвлений трансформатора, если регулируемый параметр находится вне зоны нечувствительности регулятора, но под влиянием внешних факторов движется в эту зону. Оценка устойчивости исследуемой системы автоматического регулирования (САР) в [6-9] совмещена с оценкой качества его переходных процессов (последние в случае устойчивой системы будут с течением времени затухать). В свою очередь, переходный процесс в системе оценивается по ее реакции на возможные наибольшие скачки задающих или возбуждающих воздействий напряжения. Очевидно, что синтезированная система относится к существенно нелинейным, а исследование ее устойчивости рационально осуществить путем компьютерного моделирования. Математическую модель САР напряжения силового трансформатора с РПН ти-

па РНОА – 110/800 (с восемью ступенями переключений) можно реализовать зависимостями [4]:

$$u(t) = K_1 [(U(t) - U_y) - K_2 (I(t) - I_{\min})];$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{если } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{если } u_{н.3} \leq u(t) \leq u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{если } \begin{cases} u(t) \geq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$U(t) \Big|_{t_{пер} \rightarrow \min} \rightarrow U_{ном} \pm \Delta U, \text{ если } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.31}; \\ u(t) \geq u_{в.31}. \end{cases}$$

$$U(t) \Big|_{t_{пер} \rightarrow \min} = U_{ном} \pm \Delta U, \text{ если } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.31}; \\ u(t) \geq u_{в.31}. \end{cases}$$

В данных зависимостях приняты следующие обозначения: $u(t)$ – приведенное действующее напряжение на шинах подстанции с учетом токовой компенсации; $u_{н.3}, u_{в.3}$ – соответственно нижняя и верхняя границы зоны нечувствительности трансформатора, которые задаются из условий надежности; U_y – уставка регулятора, которая соответствует номинальному напряжению $U_{ном}$ на шинах подстанции; $U(t)$ – текущее действующее значение номинального напряжения; I_{\min} – ток в шинах подстанции в режиме минимальной нагрузки; $I(t)$ – текущее действующее значение этого тока; $U_{н.н}$ – действующее напряжение на шинах низкой стороны трансформатора; U_i – действующее напряжение, которое индуцируется в обмотке трансформатора при подключении i -того ответвления; K_1 – коэффициент, характеризующий чувствительность регулятора;

$K_2 = \frac{0.05U_{ном}}{I_{\max} - I_{\min}}$ – коэффициент, определяющий наклон характеристики встречного регулирования; I_{\max} – ток нагрузки в режиме максимума; τ_3 – время задержки сигнала; $u_{в.31}, u_{н.31}$ – соответственно верхняя и нижняя границы зоны, обусловленные качеством регулирования напряжения; $\frac{dU_{ог}}{dt}$ – производная огибающей контролируемого действующего напряжения; $t_{пер}$ – время регулирования, в течение которого значение напряжения возвращается в зону нечувствительности (заданную надежностью системы).

Следует отметить, что чем шире зона регулирования $\Delta U = u_{в.31} - u_{в.32}$ и больше время задержки сигнала τ_3 , тем ниже качество регулирования напряжения, но выше надежность, поскольку меньше пере-

ключений. Логическое условие $dU_{ог}/dt \leq 0$ позволяет повысить устойчивость регулирования за счет уменьшения числа переключений отпаек трансформатора, когда регулируемый параметр находится за зоной нечувствительности регулятора. Выполненный авторами анализ состояния рассматриваемых вопросов свидетельствует о том, что существующие модели систем регулирования напряжения силовых трансформаторов с устройствами РПН не позволяют в полной мере исследовать переходные процессы в этих устройствах при переключении отпаек трансформаторов, а в связи с этим – ограничивают возможность исследования режимов данных устройств и нахождение эффективных алгоритмов управления ими. Статья посвящена созданию на основе анализа уточненной модели системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН и исследованию на этой модели рациональных алгоритмов переключения отпаек силового трансформатора, обеспечивающих повышение качества сетевого напряжения при одновременном повышении эксплуатационной надежности РПН.

Для решения зависимости (1) авторами создана в пакете программ Matlab (Simulink 4) [10] имитационная модель трехфазного двухобмоточного силового трансформатора с РПН, показанная на рис. 1.

Применяемый пакет прикладных программ (ППП) Matlab 5.2 дает возможность решать широкий круг математических задач и содержит в своем составе программу Simulink [10], с помощью которой можно задавать схемы моделирования исследуемых систем и получать результаты моделирования в удобном, наглядном виде. Поскольку каналы регулирования напряжения в сторону его уменьшения или увеличения работают одинаково, то в модели был реализован только один канал, что значительно упростило расчеты. Кроме этого можно учитывать, что при значительных отклонениях напряжения система регулирования проводит переключение устройства РПН без задержки (по крайней мере, на два положения). Поэтому для упрощения модели полагалось, что устройство РПН имеет лишь две секции. Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой был смоделирован в пакете Matlab при использовании управляемой передаточной системы (FACTS) [10]. Это было возможно, поскольку РПН используется для переключения нагрузки и передачи тока в обмотках трансформатора без разрыва цепи. Так как реальное время переключения обмоток (30–60 мс) составляет намного меньше фактического времени выбора ответвления (3–10 сек), то этот блок можно представить векторной моделью для исследования устойчивости энергосистемы в диапазоне от нескольких секунд до нескольких минут.

На рис. 1 приняты следующие обозначения вводов и выводов трансформатора:

- 1) A, B, C – три ввода, соединенные с обмоткой 1;
- 2) a, b, c – три вывода, соединенные с обмоткой 2;
- 3) V_m – входное напряжение, которое контролируется регулятором напряжения (этот параметр вводится для трансформатора в третьем окне на рис. 3); данное напряжение представляет собой цифровой сигнал, соответствующий измеренному напряжению на вводах трансформатора (со стороны 1 или 2) или на дистанционной шине;

4) переключение отпаек в положение "ВЫШЕ" или "НИЖЕ" – вводится в третьем и четвертом окнах на рис. 4, когда определено управление устройством РПН, а, подав импульс на тот или иной вход, происходит изменение импульса с логического 0 на логическую 1;

5) m – выходной вектор моделирования, содержащий 16 выходных сигналов, которые являются как комплексными величинами (векторы тока, векторы напряжения), так и сигналами управления.

Задать значения последних можно в блоке "Выбор шины" (Bus Selector).

Параметры внешнего контроля устройства РПН определяются в блоке меню. Регулирование напряжения одной фазы регулируемого трансформатора происходит при изменении коэффициента трансформации V_2/V_1 устройством РПН (рис. 2). Устройство РПН может подсоединяться как к обмотке 1 (схема на рис. 2, а) так и к обмотке 2 (схема на рис. 2, б), а также выбирать любое количество ответвлений (начиная с нуля – для безвитковой коррекции и заканчивая максимально возможным числом N_{tap} – с максимальной витковой коррекцией). Устройство РПН имеет реверс, что позволяет подсоединять регулировочную обмотку встречно или согласно. Коэффициент умножения V_{nom2}/V_{nom1} (см. рис. 2) называется коррекцией напряжения и определяется как: $1/(1 + N \cdot \Delta U)$ – для РПН на обмотке 1 или $(1 + N \cdot \Delta U)$ – для РПН на обмотке 2. Здесь N – номер ответвления; ΔU – приращение напряжения на отпайке относительно напряжения обмотки 1 или 2. Отрицательное значение N соответствует реверсивному переключению (пунктирная линия).

Автоматический контроль напряжения на регулируемом трансформаторе осуществляется системой управления напряжением обычно на обмотках или шинах. Такая система управления в данном случае обеспечивается блоком "Three-Phase OLTC Regulating Transformer", которая автоматически определяет положение ответвлений, сравнивая измеренное напряжение V_m с заданным в блоке относительным значением напряжения V_{ref} .

При каждом переключении отпаек регулятор подает импульс на вход "ВЫШЕ" или "НИЖЕ" элемента управления (контроллера) устройством РПН. Для дальнейшего переключения регулятор проверяет соответствие следующему выражению:

$$abs(V_m - V_{ref}) > DeadBand/2 \text{ в течение времени (during time) } t > Delay, \quad (2)$$

где V_{ref} – заданное значение напряжения в блоке управления; $DeadBand$ – параметр зоны нечувствительности ΔU регулятора напряжения;

$Delay$ – временная задержка при переключении отпаек.

Выбор управления происходит по следующему алгоритму:

- 1) определяется вход V_m ;
- 2) устанавливается позиция "ВЫШЕ" или "НИЖЕ";
- 3) прикладывается импульс на вход "ВЫШЕ" или "НИЖЕ" и осуществляется смена отпаек в прямом или обратном порядке, таким образом, сигнал меняется с логического нуля на единицу.

Диалоговые окна (рис. 3 и 4) задают параметры соответственно трансформатора и РПН (Transformer parameters; OLTC and Voltage Regulator parameters).

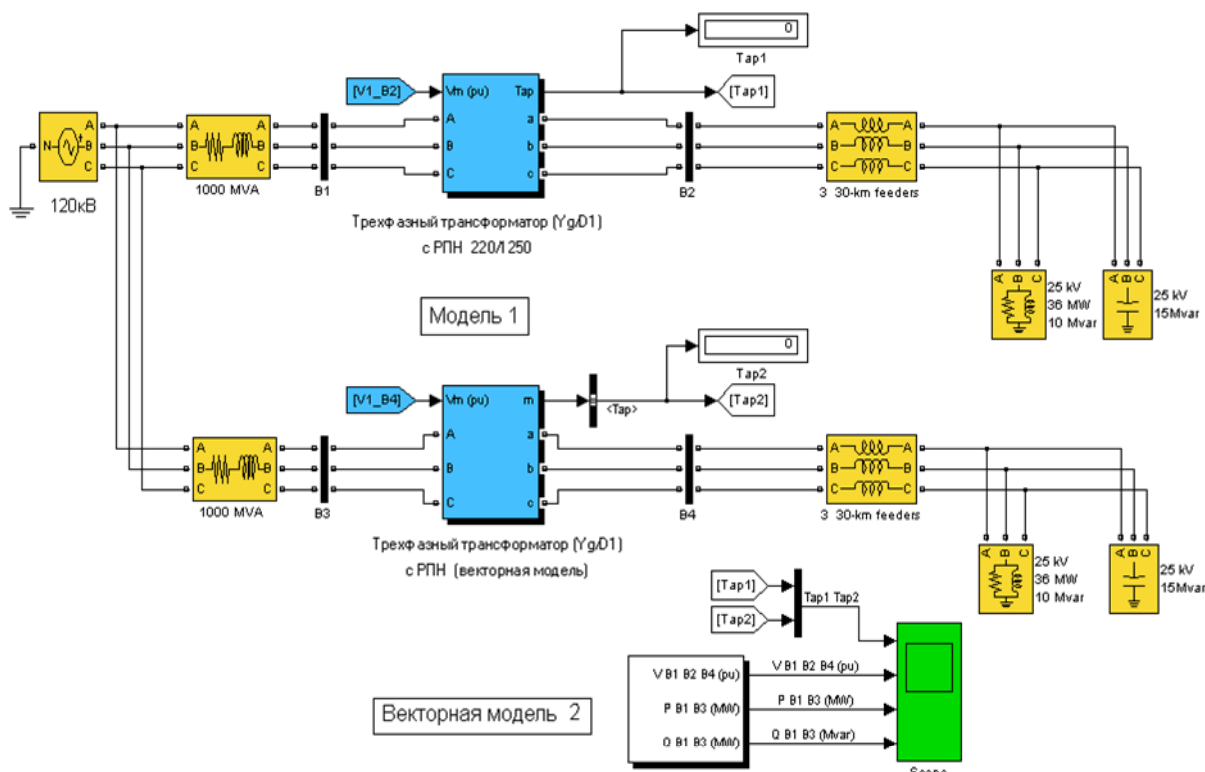


Рис. 1. Модель трехфазного регулируемого двухобмоточного силового трансформатора с РПН

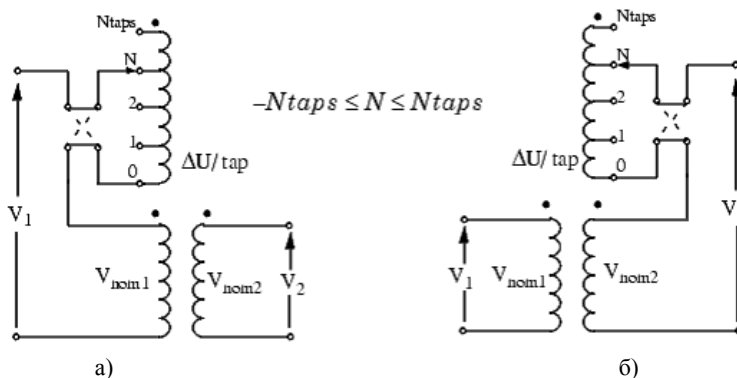


Рис. 2. Схема регулирования напряжения на одной фазе трехфазного регулируемого трансформатора:

а) на первой обмотке: $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{(1 + N \cdot \Delta U)} \times \frac{V_{nom2}}{V_{nom1}}$; б) на второй обмотке: $\frac{V_2}{V_1} = (1 + N \cdot \Delta U) \times \frac{V_{nom2}}{V_{nom1}}$

Для моделирования задавались следующие параметры:

- 1) номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) [P_{nom} ; F_{nom}];
- 2) обмотка 1 [$V1$ $R1$ $X1$] – с номинальным межфазным напряжением обмотки 1 (В); сопротивлением обмотки (о.е.); сопротивлением утечки (о.е.);
- 3) соединение обмотки 1 может быть: Y (незаземленная звезда); Yg (заземленная звезда); треугольник D1 (угол сдвига фаз составляет 30 градусов); треугольник D11 (угол сдвига - 30 градусов);
- 4) обмотка 2 [$V2$, $R2$, $X2$];
- 5) соединение обмотки 2;
- 6) регулировочная обмотка [Rt , Xt] – с сопротивлением цепи и сопротивлением утечки, зависящим от положения ответвлений; сопротивление (в о.е.) необходимо выставить относительно максимального положения отпаяк.
- 7) ветвь намагничивания [Rm , Xm] – с активным сопротивлением (о.е.) и реактивным сопротивлением

(о.е.) параллельных ветвей, смоделированными в зависимости от потерь в стали и токов намагничивания (без учета насыщения).

8) величина выходного тока обмотки 2 [Mag Phase] – начальная величина положительно направленного вектора тока (в о.е.), выходящего из обмотки 2. (Ток, входящий в обмотку 1 определяется так же). Начальное значение токов [0, 0]. После запуска системы, она примет установившееся состояние после окончания переходного процесса.

Исходные параметры РПН и регулятора напряжения для моделирования следующие (см. рис. 4):

- 1) подсоединение устройства РПН – к обмотке 1 либо обмотке 2;
- 2) напряжение ступени (Delta U) на одну отпайку;
- 3) минимальное или максимальное положение РПН [$MinTap$ $MaxTap$].
- 4) начальное положение отпаяк N устанавливается с учетом выражения $MinTap \leq N \leq MaxTap$;
- 5) время выбора отпайки – определяет механиче-

скую задержку времени в секундах, позволяющую устройству РПН переместиться на 1 позицию. Временной диапазон составляет 3–10 секунд;

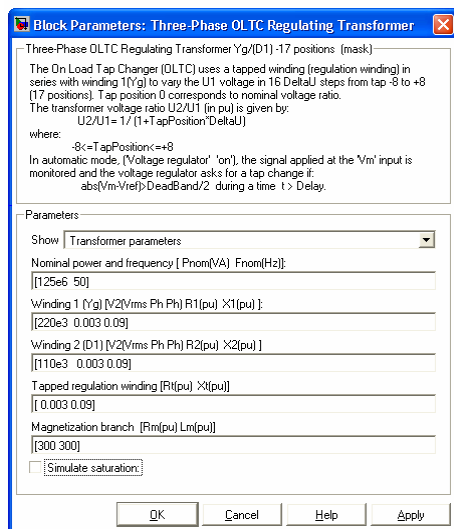


Рис. 3. Исходные значения параметров трехфазного трансформатора с РПН

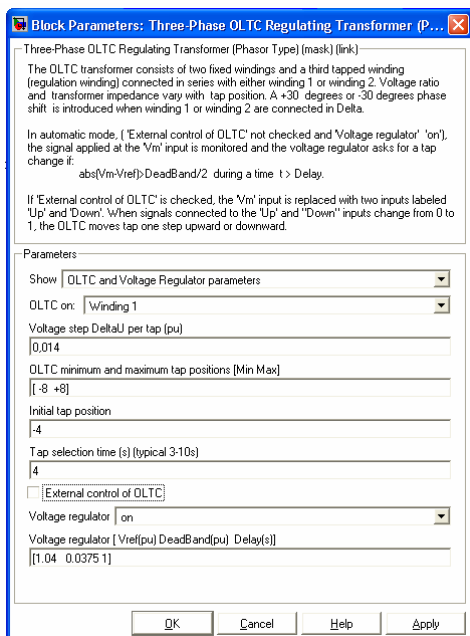


Рис. 4. Исходные значения параметров РПН и регулятора напряжения

б) внешнее управление устройством РПН осуществляется регулятором напряжения;

7) регулятор напряжения $[V_{ref} \text{ DeadBand Delay}]$ – этот параметр недоступен, когда выбрана установка внешних параметров управления устройством. В нашем случае регулятор установлен в положение "Вкл" ("on").

Определяется относительное напряжение V_{ref} (в о.е.), зона нечувствительности гистерезисного регулятора (в о.е.) и время задержки в секундах, за которое отклонение напряжения должно быть выше половины величины зоны нечувствительности устройства при прямом и обратном ходе регулирования. Зона нечувствительности устанавливается равной величине, превышающей в 2 раза напряжение ступени в окне "Напряжение ступени ΔU ". Все параметры указаны на рис. 4.

Распределительная сеть (см. рис. 1) имеет на

стороне высокого напряжения 220 кВ, трехфазный трансформатор с РПН, соединенный по схеме Y/Δ , мощностью 125 МВА типа РНОА – 110/800, на стороне низкого напряжения 110 кВ – 50 км параллельно соединенных питающих линий с источником на 136 МВт/20 МВАр. Компенсация реактивной мощности, поступающая на шину нагрузки, составляет 45 МВАр.

Для сравнения характеристик, рассчитанных на двух разных моделях, дублируем эту же цепь на выходах В2 и В4. Модель 1 является типичной моделью трансформатора с РПН и может быть использована как для дискретных решений (с целью получения точных волновых графиков), так и для векторного моделирования (для наблюдения изменений величин токов и напряжений).

Модель 2 является упрощенной векторной моделью, в которой трансформатор с РПН управляет источниками тока. Такая модель используется только при векторном моделировании и для исследования установившихся процессов (так как отличается повышенным быстродействием).

Функционирование двухтрансформаторных моделей с РПН происходит следующим образом. Оба трансформатора с РПН имеют параметры: 47 МВА, 120 кВ/25 кВ, Y/Δ , соединены на высоковольтной стороне (220 кВ) и предназначены для регулирования напряжения на шинах В2 и В4. Регулирование напряжения происходит изменением коэффициента трансформации. Данное регулирование происходит при различном соединении фаз; обмотка с отводами (регулирующая обмотка) соединена последовательно с каждой обмоткой (отличается на $220/\sqrt{3}$ кВ).

Таблица 1
Обозначение сигналов, принятых в модели на рис. 1

Сигнал	Группа сигналов	Сигнал	Описание
1-3	VABC (cmplx)	VA (pu), VB (pu), VC (pu)	Векторные напряжения (фаза на землю) на вводах А, В, С (о.е.) трансформатора
4-6	Vabc (cmplx)	Va (pu), Vb (pu), Vc (pu)	Векторные напряжения (фаза на землю) на выводах а, b, с (о.е.) трансформатора
7-9	IABC (cmplx)	IA (pu), IB (pu), IC (pu)	Векторные входные токи на фазах А, В, С
10-12	Iabc (cmplx)	Ia (pu), Ib (pu), Ic (pu)	Векторные выходные токи на фазах а, b, с
13-14	Z (cmplx)	Z1 (pu), Z0 (pu)	Положительное и нулевое значения комплексного сопротивления ($R+jX$)
15	Тар (Отпайка)	Тар	Положение отпайки
16	Ready (Готово)	Ready	Логический сигнал контроллера устройства РПН. Этот сигнал показывает работу регулятора напряжения. Сигнал "Готово" (1) поступает после завершения выбора отпайки и показывает готовность к выбору следующей. Импульсы "ВЫШЕ" и "НИЖЕ" блокируются до подачи следующего сигнала готовности (т.е. пока сигнал "Готово" равен 0)

Девять положений регулятора позволяют переключать 8 отпаяк (включая нулевую с коэффициентом трансформации 220 кВ/110 кВ). Реверс в устройстве РПН позволяет встречно или согласно подсоединять регулировочную обмотку. Для фиксированного значения вторичного напряжения 110 кВ каждое ответвление обеспечивает витковую коррекцию ± 0.01875 о.е. (или $\pm 1.875\%$ номинального напряжения 220 кВ). Общее число положений составляет 17 (так как включает нулевую отпайку) и позволяет изменять напряжение в пределах от 0.85%. (при напряжении 187 кВ) до 1.15% (при напряжении 253 кВ) со ступенью 0.01875% (с напряжением 1.4 кВ). Положительное напряжение, измеряемое на шинах В4 и В2, используется как входное напряжение регулятора (input 'Vmeas' of the transformer blocks).

Параметры меню блока трансформатора были такими:

- подключен регулятор напряжения ('Voltage regulator "on"');
- установлено относительное напряжение 1.04%;
- для запуска модели выбирается начальное положение -4, а напряжение трансформатора увеличивается коэффициентом $1/(1-4 \cdot 0,01875)=1,081$.

Первая модель имеет постоянное число ответвлений (равное 8), а векторная модель является более гибкой и позволяет подобрать любое соединение обмоток трансформатора и менять число отпаяк при необходимости. Переключение отпаяк происходит при кратковременном закорачивании двух смежных отпаяк через резисторы (с сопротивлением 5 Ом, временем переключения – 60 мс, которое вводится через блок меню). В векторной модели питание от источни-

ка тока характеризуется величиной падения напряжения, которая зависит от сопротивления обмотки, реактивного сопротивления утечки и положения отпаяк. Обе модели снабжены регуляторами напряжения, которые вырабатывают импульсы в положениях "прибавить" или "убавить" для переключения в прямом или обратном направлении. Регулирование напряжения зависит от величины зоны нечувствительности DB (которая вдвое превышает величину напряжения ступени и составляет 0,00375 о.е.). Это означает, что максимальное отклонение напряжения на шинах В2 и В4 должно составлять 0,01875 о.е. Пока максимальная величина количества отпаяк (-8 или +8) не будет достигнута, напряжение остается в пределах:

$$(V_{ref} - DB/2 < V < 1.04 + DB/2) = (1.021 < V < 1.059).$$

Так как механический процесс выбора ответвления происходит относительно быстро (4 сек.), то устанавливается время симуляции, равное 120 секундам. Трехфазный источник, изменяющий напряжение в сети 220 кВ, предназначен для исследования характеристик РПН. Изначально источник вырабатывает свое номинальное напряжение. Затем напряжение падает до $0.95 \cdot U_n$ за 10 секунд и вновь повышается до $1.1 \cdot U_n$ через 50 секунд. Все процессы при запуске наблюдаются на осциллографе (Score). На рис. 5 приведены осциллограммы процесса переключения отпаяк. В частности, осциллограмма а) показывает текущее положение отпайки, равное -4; осциллограмма б) – положительное напряжение (220 кВ) на шине В1 (график 1), 110 кВ на шине В2 (график 2) и на шине В4 (график 3). Осциллограммы в) и г) – активную и реактивную мощности, рассчитанные на высоковольтной стороне (при 220 кВ) для шин В1 и В3.

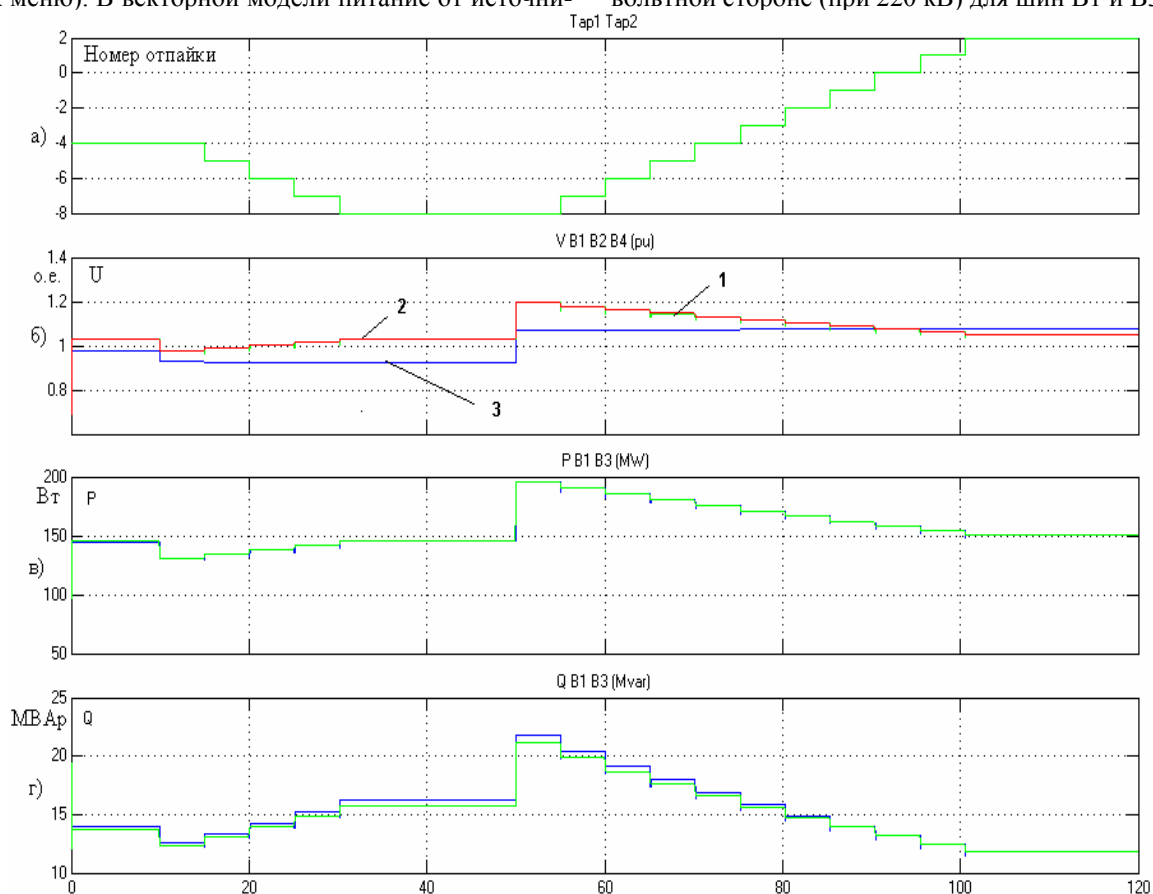


Рис. 5. Осциллограммы процессов: а) переключения отпаяк; б) напряжения на шинах В1, В2 и В4; в) активной мощности на стороне высокого напряжения (220 кВ); г) реактивной мощности на стороне высокого напряжения (220 кВ)

Моделирование начинается с запуска системы в положении -4, полученное напряжение на шинах В2 и В4 составило при этом $1,038 \cdot U_n$. При времени $t=10$ секунд внешнее напряжение источника снизилось до $0,95 \cdot U_n$, падение напряжения при 25 кВ составило $0,986 \cdot U_n$, что не соответствует допустимому диапазону ($1,021 < V < 1,059$). Регулятор повышает напряжение и РПН останавливается на -6 отпайке ($V=1,025 \cdot U_n$) (см. рис. 5, а). Через 50 секунд внешнее напряжение источника увеличилось до $1,1 \cdot U_n$, поэтому регулятор напряжения подает сигнал на понижение напряжения до ($V=1,043 \cdot U_n$), и РПН устанавливается в положении +1 (осциллограмма на рис. 5, а).

Перепады напряжения в модели происходят при $t = 10$ секунд (напряжение увеличивается) и $t=50$ секунд (напряжение уменьшается) (см. рис. 5). Это вызвано передаточной функцией (задающий цикл за определенный промежуток времени), принятой в алгебраических циклических моделях.

Проверка окончания процесса переключения трансформатора с одной ступени на другую происходит по формуле (1). Расчетные графики напряжений U (в безразмерном виде: через ноль или единицу, – в зависимости от длительности переходного процесса в момент переключения отпайки на РПН типа РНОА – 110/800 с восемью ступенями переключений) представлены на рис. 6 – рис. 8.

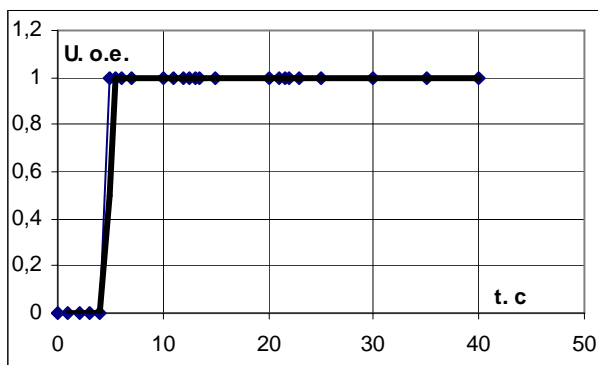


Рис. 6. График сигнала возбуждения РПН

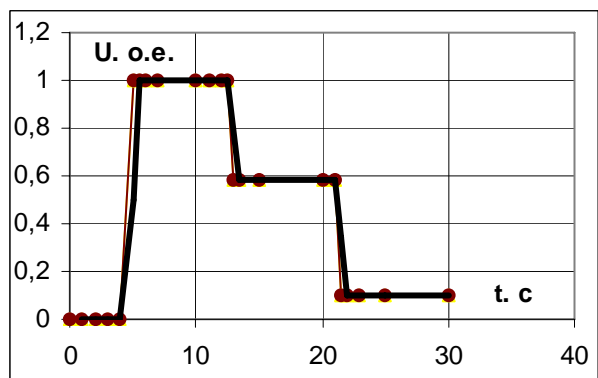


Рис. 7. График переходного процесса при аperiodическом характере сигнала управления U_m

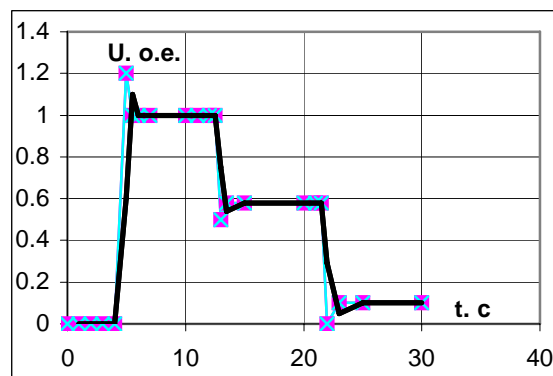


Рис. 8. График переходного процесса при колебательном характере сигнала управления U_m

Эти графики позволяют оценить насколько быстро в синтезированной системе автоматического регулирования напряжения силового трансформатора с РПН типа РНОА – 110/800 происходит затухание переходных процессов при воздействии на них ступенчатого возбуждения. А также – требуется ли дополнительное переключение ответвлений РПН, пока не закончился переходный процесс? Если графики демонстрируют затухание переходного процесса, то процесс переключений можно закончить, а броски напряжения у потребителя уменьшить. Это, в свою очередь, позволит при модернизации существующих подстанций сократить затраты за счет увеличения времени службы контактов устройств РПН силовых трансформаторов, снизить потерю мощности и электроэнергии в сетях, предупредить нежелательные аварийные режимы работы у потребителей этой энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-67. Введ. 16.12.87. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.
- [2] Говоров Ф.П. К вопросу о регулировании напряжения в городских электрических сетях // Энергетика и электрификация. – 1993. - №4. – С. 42-44.
- [3] Розанов Ю.К., Рябчинский М.В. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) // Электротехника. – 1998. - №3. – С. 10-17.
- [4] Мокин Б.И., Выговский Ю.Ф. Автоматические регуляторы в электрических сетях. – К.: Техніка, 1985. – 104 с.
- [5] В.В. Грабко. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 109 с.
- [6] Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
- [7] Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Под ред. Г.Е. Поспелова. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 216 с.
- [8] Орлов В.С. Дополнительные потери мощности и энергии при отклонении напряжения и частоты // Изв. Вузов: Сер. Энергетика. – 1985. - №6. – С. 19-23.
- [9] Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
- [10] Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.

Поступила 05.10.2006

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВНОМ РОТОРЕ ШНЕКОВОГО ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Заблодский Н.Н., к.т.н., доц., Овчаров А.А., Филатов М.А.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Алчевск, Луганской обл., пр. Ленина, 16, ДонГТУ, каф. "Электрические машины и аппараты"
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, e-mail: info@dgmi.edu.ua

Наведені результати теоретичних досліджень, отримані залежності розподілу електричної напруженості вихрових струмів на поверхні масивного ротора ЕТМП, встановлені закономірності розподілу теплового поля.

Приведены результаты теоретических исследований, получены зависимости распределения электрической напряженности вихревых токов на поверхности массивного ротора ЭТМП, установлены закономерности распределения теплового поля.

ВВЕДЕНИЕ

Массивный ротор шнекового электротепломеханического преобразователя (ЭТМП) – один из самых нагруженных узлов системы преобразования энергии, поскольку он наделен полифункциональными свойствами и непосредственно воспринимает нагрузки технологической среды [1, 2]. В известных публикациях, посвященных электрическим машинам с массивными ротором не представлены исследования процессов распределения удельных мощностей и температурного поля внешнего массивного ротора многомодульной системы и взаимодействие со средой охлаждения, обладающей, в общем случае, различными реологическими свойствами вдоль ротора [3, 4]. Вместе с тем, расчет и проектирование ЭТМП невозможен без оценки конкретного распределения вихревых токов, удельных мощностей и температур как по толщине, так и вдоль оси массивного ротора, включая между-модульную область.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение картины распределения вихревых токов, удельной мощности и температурного поля в массивном роторе шнекового ЭТМП.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное определение картины распределения вихревых токов, удельной мощности и температурного поля в массивном роторе шнекового ЭТМП.

На основании закона электромагнитной индукции можно записать $\oint E \cdot dl = \omega_2 \cdot \Phi_{1m}$, т.е. интеграл напряженности электрического поля на поверхности массивного ротора вдоль контура, взятого вдоль линии тока, охватывающего весь поток взаимоиндукции (диаметрального контура), определяется однозначно через поток взаимоиндукции Φ_{1m} и электрическую частоту $\omega_2 = \omega_1 \cdot s$. При этом интеграл может быть заменен суммой интегралов по контуру:

$$\oint E \cdot dl = 2 \cdot \left(\int_{l_a} E \cdot dl + \int_{l_t} E \cdot dl \right) = 2 \cdot (E_a \cdot l_a + E_t \cdot l_t), \quad (1)$$

где E_a - средняя напряженность электрического поля на поверхности вдоль активной длины; E_t - среднее значение E на поверхности торца вдоль линии тока; l_a, l_t - соответственно длина активной и торцевой частей ротора.

Входящие в (1) значения E_a и E_t являются

мгновенными значениями периодических функций \dot{E}_a и \dot{E}_t , которые в общем случае не совпадают по фазе. Если воспользоваться результатами численного расчета поля либо экспериментальными данными, методика [3] дает возможность вести довольно точные расчеты параметров тока массивного ротора. В данной работе экспериментальная оценка распределения вихревых токов и определение напряженности электрического поля на поверхности массивного ротора выполнена на натурном образце шнекового ЭТМП с применением потенциальных зондов. Измерения выполнены в квазиустановившемся тепловом режиме при неподвижном роторе.

На рис. 1 представлена схема расположения потенциальных зондов и термопар на массивном роторе шнекового ЭТМП.

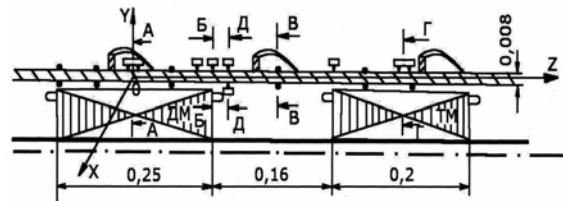


Рис. 1. Схема расположения датчиков на массивном роторе

Расстояние между иглообразными электродами потенциального зонда составляло $d = 10$ мм. Напряженность электрического поля контура вихревых токов на поверхности ротора определяется выражением $E = U/d$, где U - напряжение, измеряемое милливольтметром. Результаты измерений напряженности электрического поля вихревых токов представлены на рис. 2 и 3. Начало координатной системы условно привязано к середине полюсного деления в среднем сечении толщи массивного ротора.

Ориентация иглообразных электродов при измерениях следующая: измерение аксиальной составляющей напряженности E_a - оба электрода установлены вдоль оси Z; измерение тангенциальной составляющей E_t - оба электрода установлены вдоль оси X. Опрос измерительных каналов происходил с периодичностью, определяемой угловой частотой вращающегося магнитного поля статора.

Результаты измерений напряженности электрического поля вихревых токов ротора использованы для построения картины мгновенного распределения вихревых токов на поверхности массивного ротора (рис. 4).

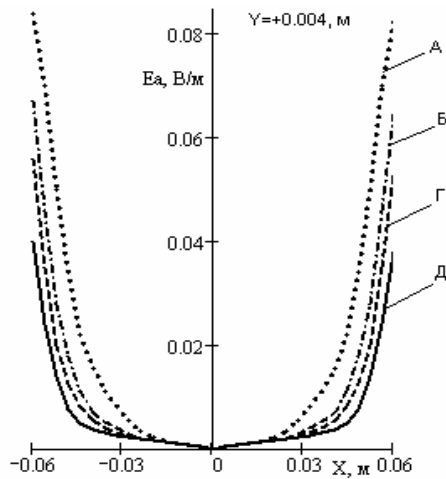


Рис. 2. Распределение аксиальной составляющей электрической напряженности

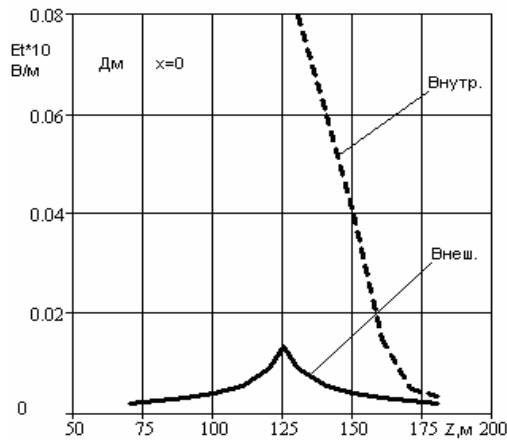


Рис. 3. Распределение тангенциальной составляющей электрической напряженности

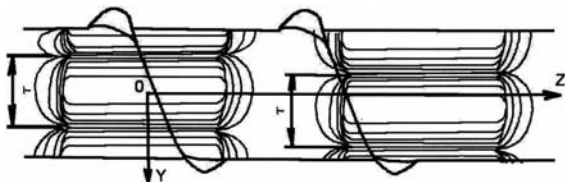


Рис. 4. Распределение вихревых токов в поверхностном слое ротора шнекового ЭТМП

Анализ кривых указывает на неравномерность мгновенного распределения вихревых токов по длине ротора и в пределах полюсного деления, а так же на существенное увеличение плотности вихревых токов в области торцов пакетов статоров двигательного (ДМ) и тормозного (ТМ) модулей. Однако достаточно высокая скорость вращения магнитного поля и инерционность тепловых процессов обеспечивает равномерность температурного поля на поверхности в пределах активных зон статоров. Контрольный осмотр ротора экспериментального образца ЭТМП показал наличие в областях ротора, располагающихся против торцов пакетов статоров, узких кольцевых зон с цветами побежалости металла (усиленный нагрев) более яркими, чем в активной зоне.

Ввиду малости воздушного зазора ЭТМП возможность регистрации E на внутренней поверхности ротора имела только для торцевых областей. Из рис. 3 следует, что максимальные значения тангенциальных составляющих E_t на внешней и внутренней поверхностях ротора отличаются примерно в 10 раз. Следует отметить и тот факт, что контуры вихревых токов заре-

гистрированы на внешней поверхности ротора, т.е. на глубине 8 мм от поверхности с максимальным значением напряженности магнитного поля, что превышает расчетные значения глубины проникновения на частоте $f = 50$ Гц, полученные по известным методикам расчета. Полученные результаты совпадают с результатами моделирования плотности вихревого тока по глубине ротора, проведенного с использованием обобщенной математической модели [5].

При измерении характеристик весьма сложных процессов, каковым является электротепломеханическое преобразование энергии, для получения результатов высокой достоверности целесообразно производить своеобразное дублирование результатов, полученных иным способом. В частности, удельные потери на поверхности или в элементарном объеме, определяемые через электромагнитные характеристики, логично дублировать результатами измерений тепловых процессов. В данной работе применен термометрический метод для измерения местных потерь.

Мы рассматриваем изменение температур в отдельных точках поверхности ротора, начиная с момента внезапного возникновения объемного тепловыделения $q_v(x, y, z)$, которое, в общем случае, может меняться в ходе нагрева. Условия теплообмена на граничных поверхностях ротора неизменны во времени. Граничные условия определяются уравнением теплового баланса, согласно которому количество теплоты q_λ , подведенное к единице поверхности посредством теплопроводности, уравновешено удельным тепловым потоком q_α , снимаемым конвективным путем с единицы поверхности, охлаждающей средой:

$$\frac{-\partial T_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (T_f - T_0), \quad (2)$$

где T_f, T_0 - соответственно температура в точке измерения и температура охлаждающей среды; α, λ - коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности материала ротора соответственно.

Процесс взаимосвязи теплового потока и температуры в роторе может быть описан неоднородным дифференциальным уравнением:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = q_v + \lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3)$$

где C - удельная теплоемкость материала ротора, Дж/(кг К), ρ - плотность, кг/м³.

В момент времени $t = 0$ (момент включения ЭТМП) ротор находится в состоянии теплового равновесия с охлаждающей средой и уравнение (3) выглядит следующим образом:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=0} = q_v(x, y, z). \quad (4)$$

Таким образом, рассматривая процесс, как адиабатический, удельное тепловыделение в любой точке ротора находим экспериментально по начальной скорости нарастания температуры при внезапном включении ЭТМП.

Сохранение адиабатного режима нагрева, безусловно, может быть обеспечено только в промежутки времени, очень близкий к моменту включения. Однако наличие большой индуктивности в ЭТМП не позволяет создавать скачкообразные импульсы тепловыделения. Поэтому выбор расчетного участка кривой нагрева в конкретной точке поверхности ротора должен определяться погрешностью начального уча-

стка кривой, куда, впрочем, включается и тепловая инерционность измерительной системы. Неравномерность тепловыделений по толщине ротора ЭТМП вызывает еще один вид погрешности. Закон распределения потерь по толщине ротора подчинен экспоненциальной зависимости:

$$q_v = q_{v0} \cdot \exp(-\beta \cdot y/\delta), \quad (5)$$

где q_v - тепловыделение на внутренней поверхности массивного ротора; δ - толщина ротора; y - координата по толщине ротора; β - коэффициент неравномерности потерь (для массивного ротора из стали марки Ст. 3 $\beta = 4,2$).

Таким образом, указанная поправка, величину которой можно определить по известной зависимости [6], может достигать 15%, но вместе с тем, несколько увеличивается допустимое расчетное время процесса.

На рис. 5 представлены температурные кривые по показаниям термодатчиков, размещенных в массиве цилиндрического ротора на глубине 5 мм от внешней поверхности ротора.

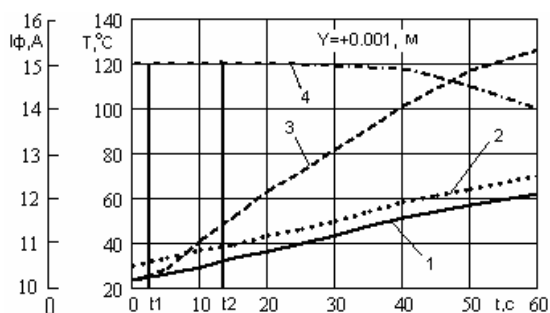


Рис. 5. Зависимость $T = f(t)$ в массивном роторе ЭТМП:

- 1 – активная зона с преимущественным значением E_a ;
- 2 – активная зона с преимущественным значением при повторном включении; 3 – кольцевая зона концевых частей с преимущественным значением E_t ; 4 – изменение значений фазного тока статора

Как видим, проявляется погрешность начального участка температурных кривых, вызванная в основном индуктивностью ЭТМП.

Расчет удельных потерь ведем по практической формуле $q_v = c \cdot \rho \cdot \Delta T / (t_2 - t_1)$. Предельное значение времени t_2 выбрано исходя из двух условий: сохранение адиабатического режима и постоянство значения q_v .

Первое условие будет выполняться, если t_2 рассчитать по формуле

$$t_2 \leq 1,2 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\delta^3 / \alpha \cdot \lambda}, \quad (6)$$

где δ - расстояние от точки размещения горячего слоя термодатчика до охлаждаемой поверхности ротора; λ - коэффициент теплопроводности материала ротора (для углеродистой стали $\lambda = 45$ Вт/(м·К)); α - коэффициент теплоотдачи (для цилиндра с винтовыми лопатками $\alpha = 15$ Вт/(м²·К)).

Для нашего случая предельное время t_2 , найденное по формуле (6), составляет примерно 16 с. Такое же значение t_2 мы получаем и по второму условию: изменение тока статора ЭТМП становится заметным после 15 с (см. рис. 5). Поэтому расчетное значение величины ΔT и Δt берем после плоского участка температурной кривой в диапазоне времени $t_1 < t \leq t_2$.

Для установления баланса активной мощности ЭТМП наряду с регистрацией температурных изменений и последующих расчетов q_v были выполнены измерения потребляемой активной мощности, расчет потерь в обмотке статора P_{m1} и потерь в стали статора P_c . Расчет удельных потерь в роторе произведен для таких основных зон: зона с преимущественным значением E_a , две кольцевые зоны концевых частей модулей, где преимущественное значение имеет тангенциальная составляющая электрической напряженности E_t контуров вихревых токов.

Очевидно, что суммарная активная мощность в роторе определяется по выражению:

$$P_p = q_{va} \cdot V_{pa} + 2q_{vt} \cdot V_{pt}, \quad (7)$$

где q_{va}, q_{vt} - соответственно удельные потери в активных и торцевых частях массивного ротора; V_{pa}, V_{pt} - соответственно объемы цилиндрических активных и концевых частей ротора.

С учетом расчетов по формуле (5) значение P_p , полученное по формуле (7) увеличено на 13%.

Распределение потребляемой активной мощности ЭТМП представлено на рис. 6.

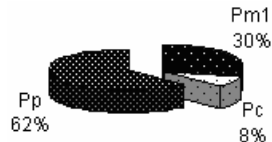


Рис. 6. Диаграмма распределения активной мощности двигательного модуля ЭТМП

ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности распределения теплового поля и электрического поля контуров вихревых токов в массиве ротора ЭТМП.

2. Установлены зоны экстремальных значений напряженности электромагнитного поля, плотности вихревых токов и удельных потерь, влияющие на равномерность распределения температуры и электромагнитных моментов вращения.

3. Получено экспериментальное подтверждение адекватности обобщенной модели для расчета электромагнитных и тепловых характеристик ЭТМП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пат. 50242 Украина. 7F26B17/16. Шнековый сушильный аппарат / М.М. Заблудский, В.Ф. Шинкаренко, П.И. Захарченко та інш.- №8244; Заявлено 11.2001; Опубл. 17.01.2005, Бюл.№1.
- [2] Заблудский Н.Н. Нелинейность тепломеханических нагрузок шнекового электротепломеханического преобразователя // Электротехника і Електромеханіка.- 2005.- №1.- С. 41-43.
- [3] Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором.- К.: Наукова думка, 1984. - 168 с.
- [4] Вербовой П.Ф., Сьянов А.М., Зеленый Б.Г. Асинхронные двигатели с внешним чугуном ротором // Техн. електродинаміка.- 1995.- №6.- С. 21-24.
- [5] Васильковский Ю.Н., Заблудский Н.Н. Моделирование полей и характеристик электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Техн. електродинаміка. Тем. вип.. Проблеми сучасної електромеханіки.- 2006, част.7.- С. 41-44.
- [6] Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин.- Л.: Энергия, 1977.- 296 с.

Поступила 18.10.2006

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В БЕСКОНТАКТНЫХ СОВМЕЩЁННЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Клементьев А.В.

Таврийский факультет Херсонского национального технического университета, ООО "КЛГ-ИНЖИНИРИНГ" Украина, 74900, Херсонская обл., Новая Каховка, ул. Первомайская, 35, каф. "Электрические машины и аппараты" тел. +38(05549) 7-85-15, факс +35(05549) 7-95-00, e-mail KLG@kahovka.net

Досліджуються особливості розрахунку струмів несиметричних коротких замикань в безконтактних синхронних генераторах з поєднанням по магнітопроводу і обмоткам ротора.

Исследуются особенности расчёта токов несимметричных коротких замыканий в бесконтактных синхронных генераторах с совмещением по магнитопроводу и обмоткам ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Несимметричные короткие замыкания существуют кратковременно, что обеспечивается защитой, однако они оказывают сильное влияние на работу, как генератора, так и потребителя. Поэтому их анализ является важным этапом при проектировании генераторов и выборе системы защиты.

При внезапных несимметричных коротких замыканиях возникают также переходные процессы, однако **целью данной статьи** является выявление главных особенностей установившихся однофазных и двухфазных коротких замыканий на зажимах бесконтактного совмещённого по магнитопроводу и обмоткам ротора явнополюсного синхронного генератора при работе на холостом ходу, а также найти соотношение, позволяющее оценить токи при этих замыканиях.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ГЕНЕРАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Конструктивные особенности генераторов рассматриваемого типа изложены в работах [1÷3]. На статоре таких машин находятся силовая обмотка (статорная обмотка генератора - СОГ) и обмотка возбуждения возбудителя (ОВВ). Обмотка ротора состоит из нескольких частей, каждая из которых в свою очередь состоит из отдельных катушек, соединённых между собой через переключающие устройства. При изменении состояния этих устройств по определённому закону по обмотке ротора протекает ток, возбуждающий генератор. В наиболее простом виде функции переключающих устройств могут выполнять диоды при их естественной коммутации от ЭДС, которая индуцируется в частях обмотки ротора через магнитное поле тока ОВВ. В этом случае по катушкам обмоток ротора протекают постоянный и синусоидальный ток частоты $\frac{f \cdot p_b}{p}$ (f , p - частота тока и число полюсов генератора, p_b - полюсность ОВВ), при этом постоянный ток является током возбуждения генератора, а синусоидальный ток создаёт поле, имеющее полюсность ОВВ. Величинами высших гармонических тока можно пренебречь [5, 6].

В данной статье рассматриваются явнополюсные генераторы, у которых полюсность СОГ с соединением фаз в звезду вдвое превышает полюсность ОВВ.

На рис. 1 изображён ротор четырёхполюсной машины. На статоре помимо СОГ располагаются обмотка питания регулятора и двухполюсная ОВВ. Обмотка ротора является двухфазной по синусоидальному току, который создаёт вращающееся поле, неподвижное относительно статора, что исключает индуктирование паразитной ЭДС в ОВВ [3].

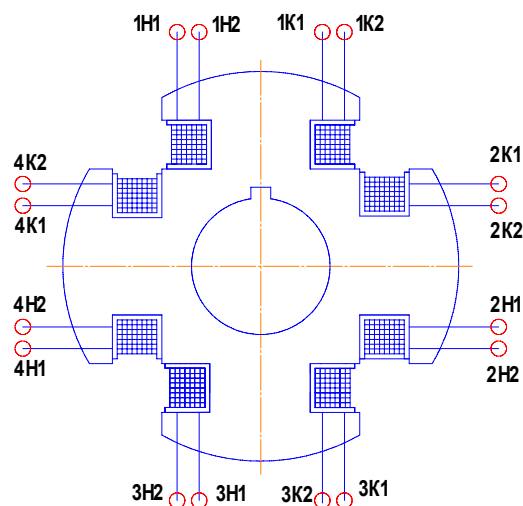


Рис. 1. Ротор с двухфазной обмоткой по переменному току

На рис. 2 приведена схема соединения концов катушек обмотки ротора исследуемого генератора через полупроводниковые диоды. В катушках обмотки ротора дополнительно индуцируются ЭДС через обратно-синхронное поле (ОСП) тока СОГ при несимметричном коротком замыкании.

ЭДС $E_{r2\gamma}$ одинакова по фазе во всех катушках обмотки ротора, соединённых между собой, и является практически синусоидальной с частотой $2f$, поскольку ротор и ОСП вращаются в противоположных направлениях. Наличие этой ЭДС вызывает дополнительное подмагничивание ротора генератора за счёт увеличения постоянного результирующего тока его обмотки, что приводит к увеличению тока несимметричного короткого замыкания. Кроме того, протекающие по обмотке ротора токи двойной частоты

возбуждают пульсирующее поле, которое также может быть разложено на два.

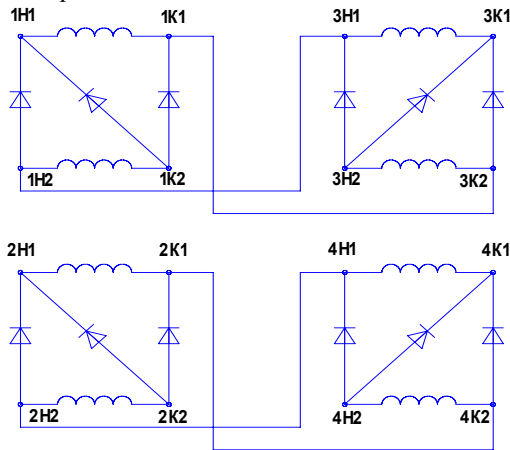


Рис. 2. Схема соединения концов катушек обмотки ротора

Через поле, вращающееся в направлении вращения ротора, в фазах СОГ индуцируется ЭДС генерируемой частоты, при этом действующее значение результирующей ЭДС уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению тока несимметричного короткого замыкания до величины, обеспечивающей соответствующее электромагнитное равновесие.

ВЫВОД СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ТОКА КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известны выражения для установившихся токов несимметричных коротких замыканий и токов обратной последовательности [4]. Эти выражения для трёхфазной системы в обобщённом виде и в комплексной форме записи можно представить следующим образом:

$$\underline{I}'_{k,2-\gamma} \approx \frac{(j \cdot \sqrt{3})^{\gamma+1} \cdot \underline{E}'_f}{j \cdot (\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2)}; \quad (1)$$

$$\underline{I}'_{2,\gamma} \approx (-1)^{\gamma+1} \frac{\underline{E}'_f}{j \cdot (\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2)}, \quad (2)$$

где $\gamma=0$ для двухфазного короткого замыкания, $\gamma=1$ для однофазного короткого замыкания, \underline{E}'_f - комплекс ЭДС возбуждения, x_0, x_1, x_2 - индуктивные сопротивления нулевой, прямой, и обратной последовательностей соответственно.

Штрихи в соотношениях (1) и (2) означают, что в них учитывается фактор подмагничивания индуктора через обратно-синхронное поле несимметричного короткого замыкания.

Ввиду повышенной сложности решения поставленной задачи было принято решение величину ЭДС E'_f представить в упрощённом виде:

$$E'_f = E_f + \alpha_\gamma \cdot E_{r2\gamma}, \quad (3)$$

где α_γ - эмпирический коэффициент.

Для расчёта ЭДС $E_{r2\gamma}$ разложим обратно-синхронное поле тока несимметричного короткого замыкания по отношению к ротору на два неподвиж-

ных пульсирующих синусоидальных поля. Ось одного из этих полей будет совпадать с продольной осью ротора – продольно-пульсирующая составляющая обратно-синхронного поля. Ось другого составит с продольной осью ротора электрический угол, равный $\frac{\pi}{2}$ – поперечно пульсирующая составляющая обратно-синхронного поля. Только через продольно пульсирующую составляющую индуцируется ЭДС $E_{r2\gamma}$. Запишем выражение для потокосцепления первой гармоники этого поля с катушкой обмотки ротора $\Psi_{adr\gamma}$, используя известные в классической теории синхронных машин соотношения [4]:

$$\Psi_{adr\gamma} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{w_f}{2p} \cdot k_{ad} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \times \right. \\ \left. \times \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{(\sqrt{3})^{1-\gamma} \cdot w_1 \cdot k_{обм1} \cdot I'_{2,\gamma}}{p} \right] \cdot \tau \cdot L_\delta,$$

где w_f - число витков обмотки ротора; k_{ad} коэффициент формы поля продольной реакции якоря; μ_0 - магнитная постоянная; $k_{\mu d}$ - коэффициент насыщения по продольной оси; k_δ - коэффициент воздушного зазора; δ - воздушный зазор; p - число пар полюсов; w_1 и $k_{обм1}$ - число витков фазы и обмоточный коэффициент первой гармоники СОГ; τ - полюсное деление; L_δ - расчётная длина якоря.

Соотношения (1) и (2) позволяют установить связь между модулями токов несимметричного короткого замыкания и обратной последовательности:

$$I'_{2,\gamma} = \frac{I_{k,2-\gamma}}{(\sqrt{3})^{\gamma+1}}. \quad (4)$$

Переходя к действующему значению ЭДС $E_{r2\gamma}$ с заменой тока обратной последовательности на ток короткого замыкания исходя из соотношения (4), получаем:

$$E_{r2\gamma} = \frac{1}{3^\gamma} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 \cdot f}{p^2} \cdot \tau \cdot L_\delta \times \quad (5)$$

$$\times w_1 \cdot k_{обм1} \cdot w_f \cdot k_{ad} \cdot I'_{2,\gamma} = \frac{1}{3^\gamma} \cdot Q_{r2\gamma} \cdot I'_{2,\gamma}.$$

Разделив обе части выражения (3) на знаменатель выражений токов (1) и (2), получаем:

$$I'_{k,2-\gamma} = I_{k,2-\gamma} + \alpha_\gamma \cdot \frac{E_{r2\gamma}}{\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2}. \quad (6)$$

Ток $I_{k,2-\gamma}$ рассчитывается без учёта подмагничивания индуктора по известным соотношениям.

Результаты испытаний опытного образца восьмиполюсного генератора мощностью 8 кВт приведены в табл. 1 и 2. (при этом ток ОБВ 0,5 А, ток трёхфазного короткого замыкания равен 12 А) Они дают основание пренебречь в практических расчётах эффектом изменения тока при изменении полярности питания ОБВ, изменении направления (\pm) и частоты вращения ротора, а также зависимостью от того, ка-

кие фазы замыкаются и ограничиться интервальной оценкой значений токов несимметричного короткого замыкания.

Таблица 1
Токи однофазных коротких замыканий

Полярность питания ОВВ		Частота вращения, об/мин	Ток КЗ в замыкаемых фазах, А		
F1	F2		A	B	C
-	+	+650	56,3	53,0	56,4
-	+	-650	53,3	58,5	56,0
+	-	+650	55,7	53,0	57,0
+	-	-650	52,5	58,5	58,8
-	+	+750	59,3	56,3	60,0
-	+	-750	56,0	62,3	60,5
+	-	+750	58,8	56,6	60,5
+	-	-750	56,0	61,5	62,6
-	+	+900	64,5	60,0	65,0
-	+	-900	60,0	66,8	65,3
+	-	+900	63,0	60,8	65,3
+	-	-900	60,0	65,3	67,5

Таблица 2
Токи двухфазных коротких замыканий

Полярность питания ОВВ		Частота вращения, об/мин	Ток КЗ в замыкаемых фазах, А		
F1	F2		AB	BC	AC
-	+	+650	24,0	29,8	31,5
-	+	-650	25,0	32,8	30,3
+	-	+650	23,8	29,3	30,8
+	-	-650	24,9	32,5	29,3
-	+	+750	25,0	31,8	33,3
-	+	-750	26,0	34,8	32,3
+	-	+750	25,0	31,3	32,5
+	-	-750	25,8	34,5	31,0
-	+	+900	26,8	34,3	36,0
-	+	-900	28,0	37,3	34,5
+	-	+900	26,5	33,8	35,0
+	-	-900	27,3	37,0	33,5

Указанные изменения тока связаны с тем, что постоянная составляющая тока обмотки ротора сложным образом зависит от разности начальных фаз ЭДС $E_{r2\gamma}$ и ЭДС, индуцируемой от поля тока ОВВ, а также от соотношения их модулей.

После оценки значения эмпирического коэффициента α_γ по средним значениям токов и решения уравнения (6) относительно тока короткого замыкания находим следующее его выражение:

$$I'_{k,2-\gamma} \approx \frac{(0,8 \div 1,2) \cdot I_{k,2-\gamma}}{1 - 0,15 \cdot (\sqrt{3})^\gamma \cdot \frac{Q_{r2\gamma}}{\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2}}$$

Расчётные значения токов: однофазного короткого замыкания – (49÷70 А), двухфазного – (22÷37 А).

Такая же точность была достигнута и на трёх других опытных образцах генераторов рассматриваемого типа.

Вследствие подмагничивания индуктора токами несимметричных коротких замыканий известное соотношение ($I_{k1} : I_{k2} : I_{k3} \approx 3 : \sqrt{3} : 1$) в бесконтактных совмещённых по магнитопроводу синхронных генераторах не сохраняется, эти токи имеют увеличенные значения на 20÷40%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клементьев А.В. Расчёт ЭДС возбуждения бесконтактной синхронной машины с переменной структурой обмотки ротора // Электротехника і Електромеханіка. - 2005. - № 3. - С. 31-32.
- [2] Клементьев А.В. Определение соотношения между токами обмоток одного типа бесконтактной явнополюсной синхронной машины // Известия вузов. Электротехника. 2005.- № 6. - С. 21- 23.
- [3] Клементьев О.В. Основні особливості суміщених синхронних генераторів зі структурою обмотки ротора, що періодично змінюється // Електротехніка і Електромеханіка (Харків). -2006. - № 2. - С. 30-31.
- [4] Вольдек А.И. Электрические машины. - М. - Л.: Энергия, 1974. - 839 с.
- [5] Клементьев А.В. Расчет ЭДС, взаимной и собственной индуктивностей обмоток бесконтактного совмещённого генератора // Технічна електродинаміка. – 1996. - №6. - С. 59-61.
- [6] Клементьев А.В., Олейников А.М. Особенности электромагнитных процессов в бесконтактном совмещённом генераторе с периодически изменяющейся структурой обмотки ротора // Электротехника. - №2000. - №3. - С. 22-25.

Поступила 17.10.2006

МІЖНАРОДНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СЛОВНИК: УКРАЇНСЬКІ ПЕРСПЕКТИВИ

Клименко Б.В., д.т.н., проф.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"

тел. (057) 707 62 81, e-mail: kbv@kpi.kharkov.ua

Продовжується публікація перекладів вибраних частин МЕС, а саме частини 441 - Switchgear, controlgear and fuses (Комутаційна апаратура, апаратура керування та запобіжники). Пропонується переклад розділів 441-15 – "Parts of switching devices (Частини комутаційних апаратів)" та 441-16 – "Operation (Оперування)".

Продолжается публикация переводов избранных частей МЭС, а именно части 441 - Switchgear, controlgear and fuses (Коммутационная аппаратура, аппаратура управления и предохранители). Предлагается перевод на украинский язык разделов 441-15 – "Parts of switching devices (Части коммутационных аппаратов)" и 441-16 – "Operation (Оперирование)".

(продовження, початок у №№ 2, 3)

Розділи Міжнародного електротехнічного словника з частини 441 – "Switchgear, controlgear and fuses", неофіційний переклад яких наводиться нижче, мають дуже важливе значення для тих, хто стикається з комутаційною апаратурою та апаратурою керування, оскільки саме у цих розділах наведено тлумачення термінів, які визначають основні частини комутаційних апаратів та їх функціонування. Значна частина з цих термінів увійшла не тільки до груп стандартів, які опікуються комутаційними апаратами та апаратами керування (IEC 60947 "Low-voltage switchgear and controlgear – all parts" та, IEC 62271 "High-voltage switchgear and controlgear – all parts"), а й до багатьох стандартів, пов'язаних з іншими різновидами апаратів комутації та керування: IEC 60898 "Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations", IEC 61008 "Residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCBs)" тощо.

Слід зазначити, що тлумачення деяких термінів у стандартах не завжди співпадають із тлумаченнями у Словнику, але цей факт зовсім не означає, що відповідні тлумачення Словника втратили свою актуальність, адже ці зміни не потрапили до Словника, який постійно доповнюється. Аналіз розбіжностей у тлумаченнях Словника та стандартів представляє певний інтерес, але у даній статті ми цю задачу не ставили.

Розбіжності у тлумаченнях мають місце не тільки по лінії Словник – Стандарти, а й у самому Словнику, у різних його частинах. Наприклад, вже згадуваний у першій статті (EIE 2007*2) **актуатор** трактується у частині 441 як орган керування, до якого прикладається зовнішня сила і який має форму ручки, кнопки, ролика тощо, у от частині 151 той самий актуатор (щоправда, з доданням у дужках визначення "електричний") тлумачиться як привідний пристрій, який викликає відповідний рух внаслідок надходження електричного сигналу (IEV 151-13-49: (electric) Actuator - device that produces a specified movement when excited by an electric signal).

Певні контекстні розбіжності мають місце також при тлумаченні поняття "контакт". Якщо у розділі 441-15 термін "контакт" застосовано для визначення певно-

го конструктиву, частини контактної комутаційної апаратури, який здійснює комутаційні операції (IEV 441-15-05: Conductive parts designed to establish circuit continuity when they touch and which, due to their relative motion during an operation, open or close a circuit or, in the case of hinged or sliding contacts, maintain circuit continuity), то в інших частинах (151, 195) термін "контакт" (як і у випадку з актуатором, з доданням у дужках визначення "електричний") тлумачиться як будь-яка сукупність струмопровідних елементів, які, випадково чи навмисно, дотикаються один до одного, створюючи єдиний струмопровідний канал (наприклад, у випадку дотику людини до струмопровідних частин електрообладнання). Отже, поняття "контакт" та "електричний контакт" це досить різні поняття, які до того ж застосовуються у різних контекстах.

Ще один момент, на якому вважаємо за необхідне загострити увагу читача. У Словнику розрізняються поняття операцій (IEV 441-16-01: Operation) в електричному (комутаційні операції) та механічному (механічні операції) смислі. Комутаційні операції пов'язані з включенням (*make*) та відключенням (*break*) електричного струму, а механічні операції здійснюються без струму, але контакти апарату при цьому замикаються (*close*) або розмикаються (*open*). З урахуванням наведених вище міркувань терміни "make contact" (IEV 441-15-12) та "break contact" (IEV 441-15-13) слід було б перекласти відповідно як "контакт включення" та "контакт відключення", але, якщо уважно прочитати відповідні тлумачення, то стає цілком зрозуміло, що мова йде про замикання та розмикання контактів (отже, "make contact" – це "контакт замикання", а "break contact" – це "контакт розмикання", адже факти замикання та розмикання контактів зовсім не є еквівалентними включенню та відключенню електричного струму.

На наступних сторінках наведено неофіційний переклад розділів 15 та 16 частини 441 Міжнародного електротехнічного словника, у яких зустрічаються терміни "Switch" та "Circuit-breaker", які перекладено відповідно як "Вимикач" та "Розмикач". Аргументи щодо саме таких перекладів зазначених термінів було наведено у попередній статті (EIE 2007*3).

<p style="text-align: center;">INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL VOCABULARY Chapter 441 SWITCHGEAR, CONTROLGEAR AND FUSES</p>	<p style="text-align: center;">МІЖНАРОДНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СЛОВНИК Частина 441 КОМУТАЦІЙНА АПАРАТУРА, АПАРАТУРА КЕРУВАННЯ ТА ЗАПОБІЖНИКИ</p>
<p>441-15 PARTS OF SWITCHING DEVICES</p>	<p>441-15 ЧАСТИНИ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ</p>
<p>441-15-01 Pole of a switching device The portion of a switching device associated exclusively with one electrically separated conducting path of its main circuit and excluding those portions which provide a means for mounting and operating all poles together. <i>Note.</i> – A switching device is called single-pole if it has only one pole. If it has more than one pole, it may be called multi-pole (two-pole, three-pole, etc.) provided the poles are or can be coupled in such a manner as to operate together.</p>	<p>441-15-01 Поліос комутаційного апарату Частина комутаційного апарату, яка пов'язана тільки з однією електрично незалежною частиною головного кола і не містить частин, призначених для спільного монтажу та оперування всіма полюсами разом. <i>Примітка.</i> – Комутаційний апарат називають однополюсним, якщо він має тільки один полюс. Якщо він має декілька полюсів, його називають багатополюсним (двополюсним, триполюсним тощо), якщо полюси поєднані або можуть бути поєднані таким чином, щоб оперувати разом.</p>
<p>441-15-02 Main circuit (of a switching device) All the conductive parts of a switching device included in the circuit which it is designed to close or open.</p>	<p>441-15-02 Головне коло (комутаційного апарату) Сукупність струмопровідних частин комутаційного апарату, що входить до кола, яке він має замикати та розмикати.</p>
<p>441-15-03 Control circuit (of a switching device) All the conductive parts (other than the main circuit) of a switching device which are included in a circuit used for the closing operation or opening operation, or both, of the device.</p>	<p>441-15-03 Коло керування (комутаційного апарату) Сукупність струмопровідних частин (крім головного кола) комутаційного апарату, що входить до кола, яке має застосовуватися для виконання апаратом операцій замикання або розмикання чи обох операцій.</p>
<p>441-15-04 Auxiliary circuit (of a switching device) All the conductive parts of a switching device which are intended to be included in a circuit other than the main circuit and the control circuits of the device. <i>Note.</i> – Some auxiliary circuits fulfil supplementary functions such as signalling, interlocking, etc., and, as such, they may be part of the control circuit of another switching device.</p>	<p>441-15-04 Допоміжне коло (комутаційного апарату) Сукупність струмопровідних частин комутаційного апарату, призначених для застосування у будь-яких колах апарату крім головного кола та кола керування. <i>Примітка.</i> – Деякі допоміжні кола мають специфічні функції, такі як сигналізація, блокування і, таким чином, вони можуть бути частиною кола керування іншого комутаційного апарату.</p>
<p>441-15-05 Contact (of a mechanical switching device) Conductive parts designed to establish circuit continuity when they touch and which, due to their relative motion during an operation, open or close a circuit or, in the case of hinged or sliding contacts, maintain circuit continuity.</p>	<p>441-15-05 Контакт (контактного комутаційного апарату) Струмопровідні частини, призначені для встановлення безперервності електричного кола, коли вони стикаються, та які під час свого відносного переміщення під час операції розмикають або замикають коло або у випадку шарнірних та ковзних контактів підтримують безперервність кола.</p>
<p>441-15-06 Contact (piece) One of the conductive parts forming a contact.</p>	<p>441-15-06 Контакт (деталь) Одна з струмопровідних частин, що створюють контакт.</p>
<p>441-15-07 Main contact A contact included in the main circuit of a mechanical switching device, intended to carry, in the closed position, the current of the main circuit.</p>	<p>441-15-07 Головний контакт Контакт, який входить до головного кола контактного комутаційного апарату та призначений, у замкненому стані проводити струм головного кола.</p>
<p>441-15-08 Arcing contact A contact on which the arc is intended to be established. <i>Note.</i> – An arcing contact may serve as a main contact; it may be a separate contact so designed that it opens after and closes before another contact which it is intended to protect from injury.</p>	<p>441-15-08 Дугогасний контакт Контакт, призначений для того, щоб на ньому встановлювалася електрична дуга. <i>Примітка.</i> – Дугогасним контактом може бути головний контакт; він може бути окремим контактом, виконаний таким чином, щоб розмикатися пізніше та замикатися раніше іншого контакту, який він має захищати від ушкоджень.</p>
<p>441-15-09 Control contact A contact included in a control circuit of a mechanical switching device and mechanically operated by this device.</p>	<p>441-15-09 Контакт керування Контакт, що входить до кола керування контактним комутаційним апаратом та механічно приводиться у дію цим апаратом.</p>
<p>441-15-10 Auxiliary contact A contact included in an auxiliary circuit and mechanically operated by the switching device.</p>	<p>441-15-10 Допоміжний контакт Контакт, що входить до допоміжного кола контактного комутаційного апарату та механічно приводиться у дію цим апаратом.</p>
<p>441-15-11 Auxiliary switch (of a mechanical switching device) A switch containing one or more control and/or auxiliary contacts mechanically operated by a switching device.</p>	<p>441-15-11 Перемикач допоміжних кіл (контактного комутаційного апарату) Перемикач, який містить один або декілька контактів керування та / або допоміжних контактів та механічно приводиться у дію комутаційним апаратом.</p>
<p>441-15-12 "a" contact; make contact A control or auxiliary contact which is closed when the main contacts of the mechanical switching device are closed and open when they are open.</p>	<p>441-15-12 "a" контакт; контакт замикання Контакт керування або допоміжний контакт, який є замкненим, коли головні контакти контактного комутаційного апарату є замкненими та розімкненим, коли вони розімкнені.</p>

<p>441-15-13 “b” contact; break contact A control or auxiliary contact which is open when the main contacts of a mechanical switching device are closed and closed when they are open.</p>	<p>441-15-13 “b” контакт; контакт розмикання Контакт керування або допоміжний контакт, який є розімкненим, коли головні контакти контактного комутаційного апарату є замкненими та замкненим, коли вони розімкнені.</p>
<p>441-15-14 Butt contact A contact in which relative movement of the contact pieces is substantially in a direction perpendicular to the contact surface.</p>	<p>441-15-14 Стичний контакт Контакт, у якому відносно пересування його контактних деталей відбувається, переважно, у напрямі, перпендикулярному контактній поверхні.</p>
<p>441-15-15 Sliding contact A contact in which relative movement of the contact pieces is substantially in a direction parallel to the contact surface.</p>	<p>441-15-15 Ковзний контакт Контакт, у якому відносно пересування його контактних деталей відбувається, переважно, у напрямі, паралельному контактній поверхні.</p>
<p>441-15-16 Rolling contact A contact in which one contact piece rolls on the other.</p>	<p>441-15-16 Контакт, що котиться Контакт, у якому одна контактна деталь котиться по іншій.</p>
<p>441-15-17 Release (of a mechanical switching device) A device mechanically connected to a mechanical switching device, which releases the holding means and permits the opening or the closing of the switching device.</p>	<p>441-15-17 Розчеплювач (контактного комутаційного апарату) Пристрій, механічно з'єднаний з контактним комутаційним апаратом, який вивільняє засоби утримання та дозволяє відключення або включення комутаційного апарату.</p>
<p>441-15-18 Arc control device A device, surrounding the arcing contacts of a mechanical switching device, designed to confine the arc and to assist in its extinction.</p>	<p>441-15-18 Дугогасний пристрій Пристрій, який оточує дугогасні контакти контактного комутаційного апарату та призначений для обмеження (локалізації) електричної дуги та сприяння її гасінню.</p>
<p>441-15-19 Arc chute A chamber into which the arc is transferred to assist in its extinction.</p>	<p>441-15-19 Дугогасна камера Камера, у яку спрямовується електрична дуга з метою сприяння її гасінню.</p>
<p>441-15-20 Blow-out coil A coil designed to produce a magnetic field arranged to deflect an arc, e.g. into an arc-chute.</p>	<p>441-15-20 Котушка магнітного дуття Котушка, призначена для створення магнітного поля, яке організує рух дуги, наприклад, до дугогасної камери.</p>
<p>441-15-21 Actuating system (of a control switch) All the operating means of a control switch which transmits the actuating force to the contact elements. <i>Note.</i> – The operating means of an actuating system may be mechanical, electromagnetic, hydraulic, pneumatic, thermal, etc.</p>	<p>441-15-21 Привідна система (перемикача керування) Усі робочі засоби перемикача керування, які передають силу впливу на контактні елементи. <i>Примітка.</i> – Робочі засоби привідної системи можуть бути механічними, електромагнітними, гідравлічними, пневматичними, термічними тощо.</p>
<p>441-15-22 Actuator The part of the actuating system to which an external actuating force is applied. <i>Note.</i> – The actuator may take the form of a handle, knob, push-button, roller, plunger, etc.</p>	<p>441-15-22 Орган керування Частина привідної системи, до якої прикладається сила зовнішнього впливу. <i>Примітка.</i> – Орган керування може мати форму важеля, ручки, кнопки, ролика, поршня тощо.</p>
<p>441-15-23 Contact element (of a control switch) All the structural parts, fixed and movable, conducting and insulating, of a control switch necessary to close and open one single conducting path of a circuit.</p>	<p>441-15-23 Контактний елемент (перемикача керування) Усі складові частини перемикача керування – нерухомі та рухомі, струмопровідні та ізоляційні, що необхідні для замикання та розмикання однієї окремої гілки кола.</p>
<p>441-15-24 Electrically separated contact elements Contact elements belonging to the same control switch, but adequately insulated from each other so that they can be connected into electrically separated circuits.</p>	<p>441-15-24 Електрично розділені контактні елементи Контактні елементи одного перемикача керування, достатньо мірою ізольовані один від одного таким чином, що вони можуть бути включені в електрично розділені кола.</p>
<p>441-15-25 Position indicating device A part of a mechanical switching device which indicates whether it is in the open, closed, or where appropriate, earthed position.</p>	<p>441-15-25 Показчик положення Частина контактного комутаційного апарату, яка показує, чи знаходиться апарат у включеному, відключеному або, у деяких випадках, заземленому стані.</p>
<p>441-16 OPERATION</p>	<p>441-16 ОПЕРУВАННЯ</p>
<p>441-16-01 Operation (of a mechanical switching device) The transfer of the moving contact(s) from one position to an adjacent position. <i>Notes</i> 1. – For a circuit-breaker, this may be a closing operation or an opening operation. 2. – If distinction is necessary, an operation in the electrical sense, e.g. make or break, is referred to as a switching operation, and an operation in the mechanical sense, e.g. close or open, is referred to as a mechanical operation.</p>	<p>441-16-01 Операція (контактного комутаційного апарату) Переміщення рухомого контакту (контактів) з одного положення у суміжне положення. <i>Примітки</i> 1. – Для розмикачів це може бути операцією замикання або операцією розмикання. 2. – За необхідністю, операцією в електричному смислі, наприклад включення або відключення, називають комутаційною операцією, а операцією в механічному смислі, наприклад замикання або розмикання, називають механічною операцією.</p>
<p>441-16-02 Operating cycle (of a mechanical switching device) A succession of operations from one position to another and back to the first position through all other positions, if any.</p>	<p>441-16-02 Робочий цикл (контактного комутаційного апарату) Послідовність операцій від будь-якого положення до іншого з поверненням до початкового положення з проходженням через усі проміжні положення за їх наявності.</p>
<p>441-16-03 Operating sequence (of a mechanical switching device) A succession of specified operations with specified time intervals.</p>	<p>441-16-03 Порядок операцій (контактного комутаційного апарату) Послідовність обумовлених операцій з обумовленими інтервалами часу.</p>

441-16-04 Manual control Control of an operation by human intervention.	441-16-04 Ручне керування Керування операцією внаслідок втручання людини.
441-16-05 Automatic control Control of an operation without human intervention, in response to the occurrence of predetermined conditions.	441-16-05 Автоматичне керування Керування операцією без втручання людини, внаслідок виникнення заздалегідь визначених умов.
441-16-06 Local control Control of an operation at a point on or adjacent to the controlled switching device.	441-16-06 Локальне керування Керування операцією з точки, яка розташована на керуваному комутаційному апараті, або у безпосередній близькості від нього.
441-16-07 Remote control Control of an operation at a point distant from the controlled switching device.	441-16-07 Дистанційне керування Керування операцією з точки, віддаленої від керуваного комутаційного апарату.
441-16-08 Closing operation (of a mechanical switching device) An operation by which the device is brought from the open position to the closed position.	441-16-08 Операція замикання (контактного комутаційного апарату) Операція, внаслідок якої апарат переводиться з розімкненого положення у замкнене положення.
441-16-09 Opening operation (of a mechanical switching device) An operation by which the device is brought from the open position to the closed position.	441-16-09 Операція розмикання (контактного комутаційного апарату) Операція, внаслідок якої апарат переводиться з замкненого положення у розімкнене положення.
441-16-10 Auto-reclosing (of a mechanical switching device) The operating sequence of a mechanical switching device whereby, following its opening, it closes automatically after a predetermined time.	441-16-10 Автоматичне повторне замикання (контактного комутаційного апарату) Послідовність операцій контактного комутаційного апарату, за якої після операції розмикання виконується автоматична операція замикання через заздалегідь визначений проміжок часу.
441-16-11 Positive opening operation (of a mechanical switching device) An opening operation which, in accordance with specified requirements, ensures that all the main contacts are in the open position when the actuator is in the position corresponding to the open position of the device.	441-16-11 Завершена операція розмикання (контактного комутаційного апарату) Операція розмикання, яка, у відповідності до визначених вимог, гарантує, що усі головні контакти будуть у розімкненому положенні, коли орган керування апарату знаходиться у положенні, яке відповідає розімкненому положенню апарату.
441-16-12 Positively driven operation An operation which, in accordance with specified requirements, is designed to ensure that auxiliary contacts of a mechanical switching device are in the respective positions corresponding to the open or closed position of the main contacts.	441-16-12 Повністю виконана операція Операція, яка, у відповідності до визначених вимог, гарантує, що допоміжні контакти контактного комутаційного апарату будуть знаходитися у положеннях, що відповідають замкненому або розімкненому положенню головних контактів.
441-16-13 Dependent manual operation (of a mechanical switching device) An operation solely by means of directly applied manual energy, such that the speed and force of the operation are dependent upon the action of the operator.	441-16-13 Залежна ручна операція (контактного комутаційного апарату) Операція, що здійснюється винятково за рахунок прямо прикладеної м'язової енергії таким чином, що швидкість та сила операції залежать від дії оператора.
441-16-14 Dependent power operation (of a mechanical switching device) An operation by means of energy other than manual, where the completion of the operation is dependent upon the continuity of the power supply (to solenoids, electric or pneumatic motors, etc.)	441-16-14 Залежна привідна операція (контактного комутаційного апарату) Операція, що здійснюється за рахунок енергії, відмінної від м'язової, таким чином, що завершення операції залежать від безперервності живлення енергією (соленоїдів, електричних або пневматичних двигунів тощо).
441-16-15 Stored energy operation (of a mechanical switching device) An operation by means of energy stored in the mechanism itself prior to the completion of the operation and sufficient to complete it under predetermined conditions. <i>Note.</i> – This kind of operation may be subdivided according to: 1. The manner of storing the energy (spring, weight, etc.); 2. The origin of the energy (manual, electric, etc.); 3. The manner of releasing the energy (manual, electric, etc.).	441-16-15 Операція (контактного комутаційного апарату), здійснювана за рахунок накопиченої енергії Операція, що здійснюється за рахунок енергії, попередньо накопиченої у самому механізмі, і достатньої для завершення операції при заздалегідь визначених умовах. <i>Примітка</i> – Цей тип операції може бути визначений за: 1. Способом накопичення енергії (пружина, вага тощо); 2. Походженням енергії (м'язова, електрична тощо); 3. Способом вивільнення енергії (ручний, електричний тощо).
441-16-16 Independent manual operation (of a mechanical switching device) A stored energy operation where the energy originates from manual power, stored and released in one continuous operation, such that the speed and force of the operation are independent of the action of the operator.	441-16-16 Незалежна ручна операція (контактного комутаційного апарату) Операція здійснювана за рахунок накопиченої енергії, що походить від м'язової енергії, яка накопичується та вивільняється в одній безперервній дії таким чином, що швидкість та сила операції не залежать від дії оператора.
441-16-17 [18] Actuating force [moment] The force [moment] applied to an actuator necessary to complete the intended operation.	441-16-17 [18] Сила [момент] оперування Сила [момент], що прикладаються до органу керування і є необхідними для завершення призначеної операції

<p>441-16-19 [20] Restoring force [moment] The force [moment] provided to restore an actuator or a contact element to its initial position.</p>	<p>441-16-19 [20] Сила [момент] повертання Сила [момент], що є необхідними для повернення органу керування або контактної елементу у їх вихідні положення</p>
<p>441-16-21 Travel (of a mechanical switching device or a part thereof) The displacement (translation or rotation) of a point on a moving element. <i>Note.</i> — Distinction may be made between pre-travel, over-travel, etc.</p>	<p>441-16-21 Хід (контактного комутаційного апарату або його частини) Зміщення (поступальне або обертове) точки рухомого елементу. <i>Примітка</i> – Можуть бути зроблені відмінності між початковим ходом, надлишковим ходом тощо</p>
<p>441-16-22 Closed position (of a mechanical switching device) The position in which the predetermined continuity of the main circuit of the device is secured.</p>	<p>441-16-22 Замкнене положення (контактного комутаційного апарату) Положення, у якому забезпечується передбачувана безперервність головного кола апарату.</p>
<p>441-16-23 Open position (of a mechanical switching device) The position in which the predetermined clearance between open contacts in the main circuit of the device is secured.</p>	<p>441-16-23 Розімкнене положення (контактного комутаційного апарату) Положення, у якому забезпечується передбачуваний проміжок між розімкненими контактами головного кола апарату.</p>
<p>441-16-24 Position of rest (of a contactor) The position which the moving elements of the contactor take up when its electromagnet or its compressed-air device is not energized.</p>	<p>441-16-24 Стале положення (контактора) Положення, яке займають рухомі частини контактора, коли його електромагнітний або пневматичний привід не активовані (відключені від живлення)</p>
<p>441-16-25 Service position (of a removable part); connected position (of a removable part) The position of a removable part in which it is fully connected for its intended function.</p>	<p>441-16-25 Робоче положення (відокремлюваної частини); приєднане положення (відокремлюваної частини) Положення відокремлюваної частини, у якому вона є повністю приєднаною для виконання передбачуваних функцій.</p>
<p>441-16-26 Earthing position (of a removable part) The position of a removable part in which the closing of a mechanical switching device causes a main circuit to be short-circuited and earthed.</p>	<p>441-16-26 Заземлене положення (відокремлюваної частини) Положення відокремлюваної частини, у якому замикання контактної комутаційного апарату призводить до короткого замикання у головному колі та його заземлення.</p>
<p>441-16-27 Test position (of a withdrawable part) The position of a withdrawable part in which an isolating distance or segregation is established in the main circuit and in which the auxiliary circuits are connected.</p>	<p>441-16-27 Контрольне положення (висувної частини) Положення висувної частини, у якому забезпечується ізоляційний проміжок або металічне розділення у головному колі, та у якому допоміжні кола знаходяться у приєднаному стані.</p>
<p>441-16-28 Disconnected position (of a withdrawable part); isolated position (of a withdrawable part) The position of a withdrawable part in which an isolating distance or segregation is established in all the circuits of the withdrawable part, that part remaining mechanically attached to the assembly. <i>Note.</i> — In enclosed high-voltage switchgear and controlgear the auxiliary circuits may not be disconnected.</p>	<p>441-16-28 Роз'єднане положення (висувної частини); ізольоване положення (висувної частини) Положення висувної частини, у якому забезпечується ізоляційний проміжок або металічне розділення в усіх колах висувної частини, яка лишається механічно приєднаною до комплектного пристрою. <i>Примітка</i> – У закритій високовольтній комутаційній апаратурі і апаратурі керування допоміжні кола можуть не роз'єднуватися</p>
<p>441-16-29 Removed position (of a removable part) A position of a removable part when it is outside and mechanically and electrically separated from the assembly.</p>	<p>441-16-29 Відокремлене положення (відокремлюваної частини) Положення відокремлюваної частини, у якому вона знаходиться зовні комплектного пристрою, а також механічно та електрично відокремлена від нього.</p>
<p>441-16-30 Fixed trip mechanical switching device A mechanical switching device which cannot be released except when it is in the closed position.</p>	<p>441-16-30 Контактний комутаційний апарат з фіксованим розчепленням Контактний комутаційний апарат, у якому розчеплення є можливим лише у замкненому положенні.</p>
<p>441-16-31 Trip-free mechanical switching device A mechanical switching device, the moving contacts of which return to and remain in the open position when the opening operation is initiated after the initiation of the closing operation, even if the closing command is maintained. <i>Note.</i> — To ensure proper breaking of the current which may have been established, it may be necessary that the contacts momentarily reach the closed position.</p>	<p>441-16-31 Контактний комутаційний апарат з вільним розчепленням Контактний комутаційний апарат, рухомі контакти якого повертаються у розімкнене положення та лишаються у цьому положенні, коли розпочинається операція розмикання після операції замикання навіть коли команда на замикання зберігається. <i>Примітка</i> – Для належного забезпечення операції відключення струму, який міг би встановитися, може бути необхідним, що контакти на короткий час приймали замкнене положення.</p>
<p>441-16-32 Instantaneous release A release which operates without any intentional time-delay.</p>	<p>441-16-32 Миттєвий розчеплювач Розчеплювач, що спрацьовує без навмисної витримки часу.</p>
<p>441-16-33 Over-current release A release which permits a mechanical switching device to open with or without time-delay when the current in the release exceeds a predetermined value. <i>Note.</i> — This value can in some cases depend upon the rate-of-rise of current.</p>	<p>441-16-33 Максимальний розчеплювач Розчеплювач, що дозволяє розмикання контактної комутаційного апарату з витримкою часу або без витримки часу, коли струм у розчеплювачі перевищує задане значення. <i>Примітка</i> – У деяких випадках це значення може залежати від швидкості зростання струму.</p>

<p>441-16-34 Definite time-delay over-current release</p> <p>An over-current release which operates with a definite time-delay, which may be adjustable, but is independent of the value of the overcurrent</p>	<p>441-16-34 Максимальний розчеплювач з визначеною витримкою часу</p> <p>Максимальний розчеплювач, який спрацьовує з визначеною витримкою часу, яка може регулюватися, але не залежить від значення надструму.</p>
<p>441-16-35 Inverse time-delay over-current release</p> <p>An over-current release which operates after a time-delay inversely dependent upon the value of the over-current <i>Note.</i> – Such a release may be designed so that the time-delay approaches a definite minimum value for high values of over-current.</p>	<p>441-16-35 Максимальний розчеплювач із зворотно залежною витримкою часу</p> <p>Максимальний розчеплювач, який спрацьовує з витримкою часу, яка зворотно залежить від значення надструму. <i>Примітка</i> – Такий розчеплювач може мати конструкцію, яка забезпечує наближення витримки часу до певного мінімального значення при великих надструмах.</p>
<p>441-16-36 Direct over-current release</p> <p>An over-current release directly energized by the current in the main circuit of a mechanical switching device.</p>	<p>441-16-36 Первинний максимальний розчеплювач</p> <p>Максимальний розчеплювач, що приводиться у дію без посередньо струмом головного кола контактної комутаційної апаратури.</p>
<p>441-16-37 Indirect over-current release</p> <p>An over-current release energized by the current in the main circuit of a mechanical switching device through a current transformer or a shunt.</p>	<p>441-16-37 Вторинний максимальний розчеплювач</p> <p>Максимальний розчеплювач, що приводиться у дію струмом головного кола контактної комутаційної апаратури через трансформатор струму або шунт.</p>
<p>441-16-38 Overload release</p> <p>An over-current release intended for protection against overloads.</p>	<p>441-16-38 Розчеплювач перевантаження</p> <p>Максимальний розчеплювач, призначений для захисту від перевантажень.</p>
<p>441-16-39 Thermal overload release</p> <p>An inverse time-delay overload release depending for its operation, including its time-delay, on the thermal action of the current flowing in the release.</p>	<p>441-16-39 Тепловий розчеплювач перевантаження</p> <p>Розчеплювач перевантаження із зворотно залежною витримкою часу, спрацьовування якого, враховуючи витримку часу, залежить від термічної дії струму, що тече через розчеплювач.</p>
<p>441-16-40 Magnetic overload release</p> <p>An overload release depending for its operation on the force exerted by the current in the main circuit exciting the coil of an electromagnet. <i>Note.</i> — Such a release usually has an inverse time-delay/current characteristic.</p>	<p>441-16-40 Електромагнітний розчеплювач перевантаження</p> <p>Розчеплювач перевантаження, спрацьовування якого забезпечується силою, що створюється струмом головного кола, який збуджує обмотку електромагніта. <i>Примітка</i> – Такий розчеплювач зазвичай має зворотно залежну від струму характеристику витримки часу.</p>
<p>441-16-41 Shunt release</p> <p>A release energized by a source of voltage. <i>Note.</i> - The source of voltage may be independent of the voltage of the main circuit.</p>	<p>441-16-41 Шунтовий (незалежний) розчеплювач</p> <p>Розчеплювач, що активується джерелом напруги. <i>Примітка</i> – Джерело напруги може бути незалежним від напруги головного кола.</p>
<p>441-16-42 Under-voltage release</p> <p>A shunt release which permits a mechanical switching device to open or close, with or without time-delay, when the voltage across the terminals of the release falls below a predetermined value.</p>	<p>441-16-42 Мінімальний розчеплювач</p> <p>Шунтовий розчеплювач, який дає дозвіл на замикання або розмикання контактної комутаційної апаратури з витримкою часу або без неї, коли напруга на терміналах розчеплювача знижується відносно заданого значення.</p>
<p>441-16-43 Reverse current release (d.c. only)</p> <p>A shunt release which permits a mechanical switching device to open, with or without time-delay, when the current flows in reverse direction and exceeds a predetermined value.</p>	<p>441-16-43 Розчеплювач зворотного струму (тільки для постійного струму)</p> <p>Шунтовий розчеплювач, який дає дозвіл на розмикання контактної комутаційної апаратури з витримкою часу або без неї, коли струм змінює напрям та перевищує задане значення.</p>
<p>441-16-44 Inching</p> <p>Energizing a motor or solenoid repeatedly for short periods to obtain small movements of the driven mechanism.</p>	<p>441-16-44 Поштовховий режим</p> <p>Активізація двигуна або соленоїда впродовж коротких періодів для забезпечення малих переміщень керованого механізму.</p>
<p>441-16-45 Operating current (of an over-current release)</p> <p>The current value at and above which the release can operate.</p>	<p>441-16-45 Струм спрацьовування (максимального розчеплювача)</p> <p>Значення струму, при якому розчеплювач має спрацювати.</p>
<p>441-16-46 Current setting (of an over-current release)</p> <p>The value of the operating current for which the release is adjusted and in accordance with which its operating conditions are defined.</p>	<p>441-16-46 Струм уставки (максимального розчеплювача)</p> <p>Значення струму спрацьовування, на який розчеплювач відрегульовано та по відношенню до якого визначені умови його спрацьовування</p>
<p>441-16-47 Current setting range (of an over-current release)</p> <p>The range between the minimum and maximum values over which the current setting of the release can be adjusted.</p>	<p>441-16-47 Діапазон струмів уставки (максимального розчеплювача)</p> <p>Діапазон між мінімальним та максимальним значеннями струму, у якому має міститися струм уставки розчеплювача.</p>
<p>441-16-48 Anti-pumping device</p> <p>A device which prevents reclosing after a close-open operation as long as the device initiating closing is maintained in the position for closing.</p>	<p>441-16-48 Протистрибковий пристрій</p> <p>Пристрій, що не допускає повторне замикання після операції замикання-розмикання доки пристрій, який видає команду на замикання, лишається у положенні, що викликає замикання.</p>
<p>441-16-49 Interlocking device</p> <p>A device which makes the operation of a switching device dependent upon the position or operation of one or more other pieces of equipment.</p>	<p>441-16-49 Пристрій блокування</p> <p>Пристрій, який ставить спрацьовування комутаційної апаратури у залежність від положення або спрацьовування одного або декількох інших елементів обладнання.</p>

Надійшла 20.02.2007

ВПЛИВ ФОРМИ КРИВОЇ СПАДАННЯ СТРУМУ НА ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ ПРИ ВИМИКАННІ НАВАНТАЖЕННЯ

Комісаренко О.І., к.т.н., доц., Ламанов С.Л.

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

Україна, 91034, Луганськ, кв. Молодіжний, 20-А, СНУ ім. В. Даля, кафедра електромеханіки

Показано, що в реальному діапазоні зміни параметрів ланцюга, що відключається, для суттєвого зниження енерговиділення в навантаженні, за інших рівних умов, необхідно покращувати форму кривої $i(t)$, а коефіцієнт комутаційних перенапруг доводити до максимально допустимого рівня. Аналіз проводиться у відносних одиницях.

Показано, что в реальном диапазоне изменения параметров цепи, которая отключается, для существенного снижения энерговыделения в нагрузке, при прочих равных условиях, необходимо улучшать форму кривой $i(t)$, а коэффициент коммутационных перенапряжений довести до максимально допустимого уровня. Анализ проводится в относительных единицах.

ПРОБЛЕМА ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ НАУКОВИМИ ТА ПРАКТИЧНИМИ ЗАДАЧАМИ

При відключенні деяких видів навантажень виникає проблема мінімізації енергетичних характеристик процесу відключення. Наприклад, при захисному відключенні при зриві інвертування автономних інверторів із ланкою постійного струму, для збереження напівпровідникових приладів необхідно мінімізувати джоуль інтеграл (захисний показник). При цьому часто схеми випрямляча й інвертора припускають наявність у колії значної індуктивності фільтрових і комутуючих дроселів, у якій накопичується магнітна енергія.

$$W_M = \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{T_H \cdot R_H \cdot I^2}{2},$$

де L - сумарна індуктивність контуру; I - струм у контурі на момент комутації; T_H - стала часу; R_H - активна складова опору навантаження.

У такому випадку необхідність розсіяти значний запас електромагнітної енергії без істотних перенапруг приводить до значного побіжного виділення енергії джерела живлення (ДЖ). Становить інтерес дослідження факторів, що впливають на енергетичні характеристики навантаження й оцінка ступеня такого впливу.

Результати аналізу факторів, що впливають на енерговиділення, пошук шляхів зниження енергії на навантаженні дозволяють виробляти рекомендації по конструюванню комутаційних апаратів із якнайкращими характеристиками.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У [1], використовуючи розроблену методику [2] досліджено вплив форми кривої спаду струму $i(t)$ на енерговиділення від ДЖ. Проведений аналіз дозволив зробити висновки про те, що у розглянутому діапазоні зміни форми кривої $i(t)$ величина енергії, що надходить від ДЖ - $W_{ДЖ}$ може змінюватися в десятки разів. Отже, змінюючи конструкцію й параметри дугогасного пристрою (ДП), від яких залежить форма кривої спаду струму $i(t)$, можна суттєво впливати на кількість енергії від ДЖ, що надходить у коло, що відключається. Однак, у [3] приведені результати досліджень, які вказують на порівняно слабку залежність від форми кривої $i(t)$ енергії дуги відключення при коефіцієнті перенапруг більш ніж 2,3.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Якщо реалізувати шляхом зміни конструкції ДП комутаційного апарата надані в [1, 3] рекомендації, то можна знизити надходження енергії від ДЖ і енерговиділення у дузі відключення, що важливо, наприклад, для апаратів керування. Але для апаратів захисту, із точки зору їх призначення, більш важливими є енергетичні характеристики навантаження.

Енергія, що розсіюється на активному опорі навантаження, не здійснює такого безпосереднього впливу на апарат, що відключає, як енергія дуги. Однак при аварійних відключеннях апарат, що відключає, не можна розглядати поза його зв'язком із навантаженням. Від того, який процес відключення аварійного режиму забезпечить апарат, залежить кількість енергії, що виділилася на навантаженні, а від неї залежить, зокрема, надійність навантаження. Показовий у цьому змісті приклад, коли плавкі запобіжники захищають напівпровідникові прилади. Аналіз енергетичних характеристик навантаження дозволить визначити шляхи зниження енерговиділення на навантаженні в період аварійних відключень. Крім того, такий аналіз дозволить до кінця з'ясувати взаємозв'язок енергетичних характеристик із характером процесу відключення.

Тому ставиться задача, використовуючи ту ж методику, проаналізувати вплив форми кривої $i(t)$ на енерговиділення в навантаженні. Для цього в контурі, що вмикається, який містить послідовно ввімкнені ДЖ, активно-індуктивне навантаження і комутатор із дугою відключення, замінимо нелінійний елемент - дугу відключення з опором $r_d(i)$ - параметричним комутуючим елементом (КЕ), який змінює свій опір $r_{КЕ}(t)$ таким чином, щоб реалізувати у контурі, що вмикається, криву спадання струму, описувану відомим виразом:

$$i(t) = I \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{t_K} \right)^n \right] = I \cdot \left[1 - \left(\frac{K_{П-1}}{n} \cdot t \right)^n \right], \quad (1)$$

або у відносних одиницях:

$$i^*(t^*) = 1 - \left(\frac{t^*}{t_K^*} \right)^n = 1 - \left(\frac{K_{П-1}}{n} \cdot t^* \right)^n, \quad (2)$$

де $t_k = \frac{n}{u_{KE}(t_k) - 1} = \frac{n}{K_{\Pi} - 1}$ - час комутації; $u_{KE}(t_k)$ - максимальна за період відключення напруга на КЕ; n - емпіричний коефіцієнт, що змінюється в межах $1 \leq n \leq 4$ залежно від типу дугогасильного пристрою; $K_{\Pi} = \frac{u_{KE}(t_k)}{E_{ДЖ}}$ - коефіцієнт комутаційних перенапруг; $E_{ДЖ}$ - ЕРС ДЖ; $i^*(t^*) = i(t)/I$, $t^* = t/T_H$ - нормовані чинники.

Зробимо аналіз енергетичних характеристик процесу відключення (2).

АНАЛІЗ І РЕЗУЛЬТАТИ

Кількість енергії, що виділяється в навантаженні, визначається виразом:

$$W_H = \int_0^{t_k} u_H(t) \cdot i(t) \cdot dt = R_H \int_0^{t_k} i^2(t) \cdot dt, \quad (3)$$

де $u_H(t)$ - напруга на навантаженні; чи у відносних одиницях:

$$W_H^* = \frac{W_H}{E_{ДЖ} \cdot I \cdot T_H} = \int_0^{t_k^*} [i^*(t^*)]^2 dt^*. \quad (4)$$

Підставивши у (4) вираз (2), одержимо:

$$W_H^* = \int_0^{t_k^*} \left[1 - \left(\frac{t^*}{t_k^*} \right)^n \right]^2 dt^*, \quad (5)$$

або, після інтегрування:

$$W_H^* = t_k^* \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} = \frac{2n^3}{(K_{\Pi} - 1)(n+1)(2n+1)}. \quad (5)$$

По (5) розраховані графіки залежності $W_H^* = f(K_{\Pi})$ для різних значень емпіричного коефіцієнта n . Графіки зображено на рис. 1.

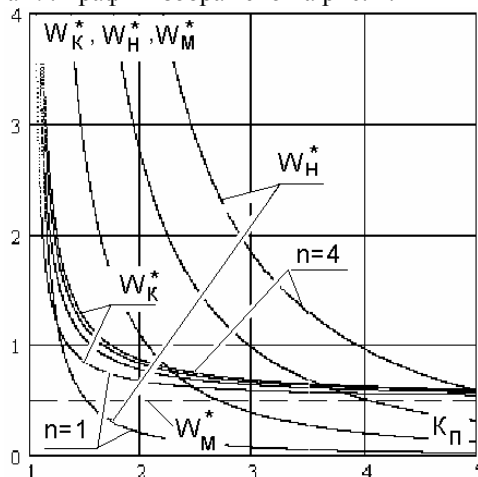


Рис. 1. Криві залежності $W_H^* = f(K_{\Pi})$, $W_K^* = f(K_{\Pi})$ та $W_M^* = f(K_{\Pi})$ при різних n

Графіки, наведені на рис. 1 показують, що енерговиділення в навантаженні суттєво залежить як від рівня перенапруг K_{Π} , так і від форми кривої $i^*(t^*)$.

Таким чином, має сенс знижувати енергію W_H , в першу чергу, шляхом "поліпшення" кривої спадання струму в процесі відключення, а не за рахунок збільшення рівня K_{Π} (наприклад, збільшуючи інтенсивність дугтя, звужуючи ширину щілини дугогасильної камери). Збільшений рівень K_{Π} призведе до збільшення ймовірності повторних запалювань дуги, це може звести нанівець отримані переваги.

Співставлення кривих $W_H^* = f(K_{\Pi})$ і $W_K^* = f(K_{\Pi})$ та прямої, яка відображає запас електромагнітної енергії $W_M^* = 0,5$ приведених на рис. 1, показує, що при певних параметрах ДП (низькі значення K_{Π} та великі n) на елементах контуру, що вимикається, за період відключення розсіюється дуже багато енергії від ДЖ. Особливо це стосується енерговиділення на навантаженні. Тому, окрім наведених вище рекомендацій щодо проектування ДП, найбільш радикальним рішенням є розробка та впровадження схемних рішень, які дозволяють у період відключення відокремлювати навантаження та ДП від ДЖ.

ВИСНОВКИ Й НАПРЯМОК ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таким чином, із проведеного аналізу можна зробити такі висновки. Для того щоб зменшити енерговиділення на навантаженні, необхідно прагнути до того, щоб розроблюваний ДП реалізував процес відключення, близький до емпіричного процесу з коефіцієнтом $n = 1$ при максимально припустимому рівні K_{Π} . Однак, перевагу слід надавати тим конструкціям ДП, які забезпечують кращу форму кривої спадання струму при менших рівнях K_{Π} .

Зроблені висновки цілком відносяться і до джоулева інтеграла, вираз для якого у відносних одиницях збігається з виразом для енергії навантаження W_H^* :

$$D^* = \int_0^{t_k^*} [i^*(t^*)]^2 dt^*. \quad (6)$$

Оскільки відносна кількість енергії $W_{ДЖ}^*$ згідно з методикою, пропонується прийняти за універсальний показник якості процесу відключення, в подальшому необхідно встановити криву спадання струму, яка мінімізує цей показник та уточнити наведені рекомендації і висновки.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Комиссаренко А.И., Ламанов С.Л., Ткаченко Ю.С. О роли источника питания в энергетическом балансе отключаемой цепи постоянного тока. Вісн. Східноукр. нац. Ун-ту ім. В. Даля. - 2003 - №4(62). С. 110-114.
- [2] Комиссаренко А.И., Ламанов С.Л. Методика исследования процесса отключения цепей постоянного тока контактными коммутационными аппаратами. Вісн. Східноукр. нац. Ун-ту ім. В. Даля. - 2002-№1(47). С. 18-24.
- [3] Ламанов С.Л., Михайлова Л.Ф., Яковенко В.В., Комиссаренко О.І. Влияние формы кривой спадания струму на энерговиділення у комутуючому елементі. Вісн. Східноукр. нац. Ун-ту ім. В. Даля. - 2006-№9 (103). С. 227-230.

Надійшла 01.10.2006

К ПРОБЛЕМЕ РАСЧЕТА СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТОПРОВОДА НА ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Кузьмин В.В., д.т.н., проф., Шпатенко В.С.
НИИ "Электротяжмаш"
Украина, 61055, Харьков, пр-т Московский, 299
тел. (0572) 95-66-81, e-mail: kuzmin@spetm.com.ua

Виконано порівняльний аналіз наслідків застосування нетрадиційних теоретичних засобів вирішення проблеми розрахунку силового впливу магнітопроводу на обмотки електричних машин, коли у зоні розташування обмоток індукція магнітного поля дорівнює нулю ("парадокси трансформатора та генератора").

Выполнен сравнительный анализ результатов применения нетрадиционных теоретических подходов к решению проблемы расчета силового воздействия магнітопроводу на обмотки електрических машин, когда в зоне расположения обмоток индукция магнітного поля равна нулю ("парадоксы трансформатора и генератора").

ВВЕДЕНИЕ

Из довольно большого ряда неразрешённых парадоксов, присущих современной теоретической электротехнике [1], "парадокс трансформатора" и "парадокс генератора" наиболее приближены к запросам практики, вследствие чего их обсуждение и попытки разрешения не теряют актуальности и по сей день.

Для машин традиционной конструкции речь идёт о том, что э.д.с. наводится в обмотках, в районе расположения которых отсутствует "классическое" вихревое магнитное поле ($B = 0$). Кроме того, из опыта известно, что на якорную обмотку электрической машины не воздействуют тангенциальные силы от момента нагрузки. Другими словами э.д.с. наводится, а силовых воздействий – нет.

На первом этапе решения этой проблемы внимание уделялось выяснению механизма наведения э.д.с. в обмотке при $B = 0$. Здесь "камнем преткновения" являлось фарадеевское представление о том, что э.д.с. в обмотке наводится только вследствие пересечения проводников силовыми линиями магнитного поля B . Откуда следовало, что при $B = 0$ согласно уравнению Максвелла $rot \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial t$ не действует принцип "вихревое магнитное поле порождает вихревое электрическое", т.е. процесс наведения э.д.с. не реализуется.

Был выдвинут ряд гипотез [2, 3] согласно которым вне замкнутого магнітопровода трансформатора при питании первичной обмотки переменным током возникает вихревое магнитное поле.

В [4] нами показано, что и на переменном токе вне длинного (замкнутого) соленоида поле векторного потенциала остаётся безвихревым.

Столь же несостоятельны попытки доказать, что в пазу электрической машины э.д.с. наводится тем же фарадеевским механизмом за счёт того, что силовые линии B в пазу движутся с большей скоростью, чем в зубцах, сохраняя неизменным соотношение $B \cdot v = const$.

Например, если магнітопровод выполнен из анизотропной стали, то при индукции в нём порядка 1 Тл в прилегающих слоях зоны расположения обмотки индукция имеет порядок несколько мкТл, т.е. практически равна нулю. В мощном турбогенераторе ок-

ружная скорость перемещения поля индуктора составляет 200 м/с; для той же эффективности силовые линии индукции в пазу должны перемещаться с релятивистской скоростью, что лишено физического смысла. С другой стороны, "силовая линия" с почти нулевым значением индукции не может существовать в пакете силовых линий рабочего поля индуктора.

Впрочем, надобность в описанных попытках спасти консервативные представления о механизме наведения э.д.с. в рассматриваемых случаях начисто отпадает, если перейти к более реальной и физически непротиворечивой концепции, согласно которой "переменное во времени соленоидальное поле вектора \bar{A} порождает такого же типа переменное поле вектора \bar{E} " в полном соответствии с известным уравнением

$$\bar{E} = -\partial \bar{A} / \partial t.$$

Гораздо сложнее найти решение второй части рассматриваемой проблемы. С момента открытия эффекта Ааронова-Бома [5] не прекращаются попытки найти теоретические подходы к расчёту силовых взаимодействий элементов тока в соленоидальном поле вектора \bar{A} , т.е. в тех же условиях, когда $B = 0$.

За последние годы было экспериментально обнаружено много фактов макрофизического проявления аналогичных эффектов. В [6] отмечено, что попытки объяснения эффекта Ааронова-Бома на базе квантово-механических представлений противоречат данным макрофизических экспериментов и часто приводят к неверным физическим предсказаниям.

Настоящая статья посвящена поиску теоретических подходов к расчёту силовых взаимодействий в соленоидальном поле вектора \bar{A} .

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Наряду с "каноническими" классическими уравнениями силовых взаимодействий в магнитном поле

- законом Лоренца

$$\bar{F}_{12} = q_2 (\bar{v}_2 \times \bar{B}_1), \quad (1)$$

- и законом Ампера

$$d\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} (d\bar{l}_2 \times (d\bar{l}_1 \times \bar{r})), \quad (2)$$

известны также пять нетрадиционных уравнений силовых взаимодействий элементов тока или зарядов:

- симметрированный закон Ампера

$$d\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left[-2(d\bar{l}_1 \cdot d\bar{l}_2) \bar{r} + \frac{3}{r^2} (d\bar{l}_1 \cdot \bar{r})(d\bar{l}_2 \cdot \bar{r}) \bar{r} \right], \quad (3)$$

- модифицированный закон Ампера по Николаеву

$$d\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} (d\bar{l}_2 \times (d\bar{l}_1 \times \bar{r})) - I_2 \operatorname{div} \bar{A} (I_1 \cdot d\bar{l}_1) d\bar{l}_2, \quad (4)$$

- модифицированный закон Ампера по нашим предложениям

$$d\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left[d\bar{l}_2 \times (d\bar{l}_1 \times \bar{r}) + d\bar{l}_1 \times (d\bar{l}_2 \times \bar{r}) \right], \quad (5)$$

- закон Лоренца-Маринова по [6]

$$\begin{aligned} \bar{F}_{12} = & q_2 \bar{E}_1 - q_2 \frac{\partial \bar{A}_1}{\partial t} + q_2 (\bar{v}_2 \times \operatorname{rot} \bar{A}) - \\ & - q_2 \bar{v}_2 \operatorname{div} \bar{A} / 2 - \left(\bar{v}_2 \frac{q_2}{2v_2^2 r^3} \times \right. \\ & \left. \times \int_V (q_1 \bar{v}_1 \times \bar{v}_2) (\bar{r} \cdot \bar{v}_2) \right) - \\ & - \bar{v}_2 \cdot \frac{q_2}{2v_2^2 r^3} \int_V (q_1 \bar{v}_1 \times \bar{v}_2) (\bar{r} \times \bar{v}_2). \end{aligned} \quad (6)$$

И, наконец, соотношение, основанное на расширении сферы применения известного закона

$$\bar{F}_{12} = q_2 \bar{E}_1 = -q_2 \frac{\partial \bar{A}_1}{\partial t}$$

за счёт перехода от частной к общей производной по времени, которая включает в себя вектор-градиент поля \bar{A} в направлении движения заряда q_2 со скоростью v_2

$$\begin{aligned} \bar{F}_{12} = & q_2 \bar{E}_1 = -q_2 \frac{d\bar{A}_1}{dt} = \\ = & -q_2 \left[\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + (\bar{v}_2 \operatorname{grad} \bar{A}) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Известно, что вне длинного соленоида, питаемого постоянным током, поле векторного потенциала описывается уравнением [4]

$$\bar{A} = \frac{\mu_0 i R^2}{2X} e_\varphi, \quad (8)$$

где i - поверхностная плотность тока в обмотке в аксиальном направлении (А/м), R - радиус обмотки соленоида, X - радиальная координата.

Нетрудно видеть, что в данном случае

$$\bar{B} = \operatorname{rot} \bar{A} = 0,$$

т.е. поле имеет безвихревой характер, вследствие чего согласно (1) и (2) вне соленоида никакие силы не должны действовать на движущийся заряд (элемент тока).

Рассмотрим, что дают в такой ситуации расчёты по альтернативным подходам (3) - (7) в поле \bar{A} , на-

пример, для элемента тока $I_2 dl_2$ расположенного параллельно оси Y (рис. 1).

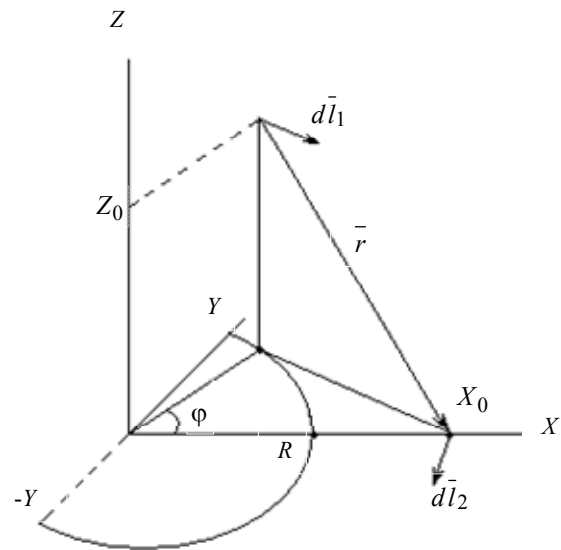


Рис. 1

В праввинтовой системе основные векторные элементы равны

$$\begin{aligned} d\bar{l}_1 &= dl_1 (\sin\varphi \bar{i} - \cos\varphi \bar{j}), \\ d\bar{l}_2 &= dl_2 (-\bar{j}), \\ \bar{r} &= (X - R \cos\varphi) \bar{i} - R \sin\varphi \bar{j} - Z_0 \bar{k}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $dl_1 = R d\varphi$.

При равномерно навитой обмотке соленоида (n витков на метр длины) и запитке её постоянным током i_f линейная плотность тока по оси составит

$$i = n i_f,$$

а элемент тока будет равен

$$I_1 dl_1 = i dZ R d\varphi. \quad (10)$$

Перейдём к системе безразмерных координат относительно R

$$\begin{aligned} X_0 = x_0 R, X = xR, Y = yR, Z = zR, dZ = dzR; \\ Z_0 = hR; r = \rho R; dl_1 = R d\varphi, dl_2 = R dy. \end{aligned} \quad (11)$$

Прежде чем приступить к расчётам по (3)–(7) отметим следующее. В силу того, что

- расчёты внешних сил по (1) и (2) дают нулевой результат,

- во внешнем поле соленоида

$$\bar{E} = 0, \operatorname{rot} \bar{A} = 0, \operatorname{div} \bar{A} = 0, \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = 0$$

результаты расчётов по (4) обращаются в нуль, в (5) остаётся только второе слагаемое в квадратных скобках, а в (6) – только два последних слагаемых.

Итак, для рассматриваемого случая в расчёт следует брать формулу (3), вторые слагаемые формул (5) и (7), а также последние два слагаемых формулы (6).

Учитывая тождество

$$I_i d\bar{l}_i \equiv q_i \bar{v}_i, \quad (12)$$

переходя к безразмерным параметрам (11) и вводя константу

$$k = \frac{\mu_0 i_1 R I_2 dy}{4\pi} \quad (13)$$

с учётом направленности базовых векторов (9), приходим к следующему представлению упомянутых формул для радиальных составляющих dF_{12x}

$$dF_{12x} = k \frac{dzd\varphi}{\rho^3} \left[\begin{array}{l} -2 \left(\begin{array}{l} x \cos \varphi - \\ - \cos^2 \varphi \end{array} \right) + \\ + \frac{3}{\rho^2} \left(\begin{array}{l} x^2 \sin^2 \varphi - \\ - x \sin^2 \varphi \cos \varphi \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (14.1)$$

по формуле (3);

$$\begin{aligned} dF_{12x} &= k \frac{dzd\varphi}{\rho^3} (\cos^2 \varphi - x \cos \varphi) \equiv \\ &\equiv -k \frac{dzd\varphi}{\rho^3} \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (14.2)$$

по (5);

$$dF_{12x} = -k \frac{dzd\varphi}{\rho^3} \cdot \frac{\sin^2 \varphi}{2} \quad (14.3)$$

по закону (6).

Используя подход к интегрированию выражений (14), описанный в [4] и учитывая, что

$$\int_0^\infty \frac{dz}{(z^2 + b^2)^{3/2}} = \frac{1}{b^2}, \quad \int_0^\infty \frac{dz}{(z^2 + b^2)^{5/2}} = \frac{2}{3b^4} \quad (15)$$

где $b^2 = 1 + x^2 - 2x \cos \varphi$, приходим к следующим выражениям для искомых сил взаимодействия:

$$F_{12} = \frac{4k}{x(x^2 - 1)} \left[\pi + 1 + (\pi - 1)(x^2 + x) \right] \quad (16.1)$$

по (3);

$$F_{12} = -2k \frac{\pi}{x^2} \quad (16.2)$$

по (5);

$$F_{12} = -k \frac{\pi}{x^2} \quad (16.3)$$

по (6).

Кроме того, ряд авторов [6] предполагал использовать понятие вектор-градиента в поле A для расчёта сил взаимодействия этого поля с зарядом q_2 движущимся со скоростью v_2

$$F_{12} = -q_2 \left[(\vec{v}_2 \operatorname{grad}) \vec{A} \right], \quad (17)$$

что представляет собой правую часть формулы (7).

Нетрудно показать, что с учётом введенных обозначений на базе (8) последнее соотношение даёт результат

$$F_{12} = -\frac{\mu_0 i_1 R I_2 dy}{2x^2} = -2k \frac{\pi}{x^2}, \quad (18)$$

который полностью совпадает с (16.2).

Результаты расчёта силовых взаимодействий для законов (16.1) - (16.3) сведены в таблицу.

Силловые взаимодействия элементов тока

Силловые взаимодействия в долях k при	Закон		
	По (3)	По (5) и (18)	По (6)
$x=1$	∞	-6.28	-3.14
$x=1.1$	+71.4	-5.19	-2.60
$x=1.5$	+26.6	-2.79	-1.40
$x=2$	+11.3	-1.57	-0.79
$x=3$	+4.98	-0.70	-0.35
$x=5$	+2.28	-0.25	-0.13

В связи с тем, что силловые взаимодействия по (3) и качественно и количественно резко расходятся с двумя другими, для дальнейшего анализа остановимся на законе (16.2).

Сначала определим характер силового взаимодействия "бесконечно длинных" соленоидов различной конфигурации.

Наиболее простой для анализа представляется пара "бесконечно длинный цилиндр - токнесущая плоскость шириной $\pm y_0$ " (рис. 2). Здесь сила действия цилиндра на элемент тока в плоскости на единицу её относительной длины dz составит

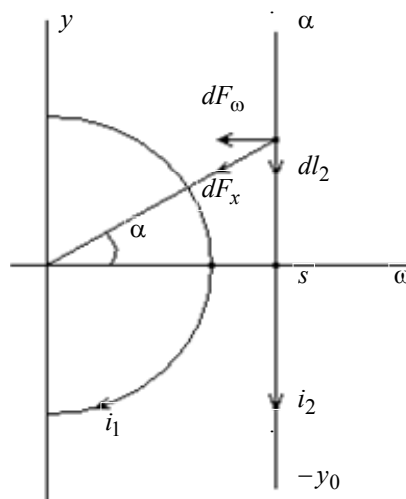


Рис. 2

$$\begin{aligned} dF(dz)_\omega &= 2k_2 \int_0^{y_0} F_{12}(x) \cos \alpha dy = -4k_2 \pi \times \\ &\times \int_0^{y_0} \frac{s dy}{(s^2 + y^2)^2} = -4k_2 \frac{\pi y_0}{s \sqrt{s^2 + y_0^2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $k_2 = \frac{\mu_0 i_1 i_2 R^2}{4\pi}$; $x^2 = s^2 + y^2$, а для плоскости с током, имеющей конечные размеры $\pm h$ по длине сила взаимодействия равна

$$F(h)_\omega = 2hF(z)_\omega. \quad (20)$$

Для более сложной конфигурации пары цилиндров одинакового диаметра (рис. 3) при условии, что первый (левый) цилиндр - "бесконечно длинный" сила на элемент длины dz второго цилиндра равна

$$dF(dz)_\omega = 2k_2 \int_0^\pi \left[F_{12}(x) \cos \alpha \cdot \cos(\alpha + \psi) d\psi \right] =$$

$$= -4k_2 \pi \int_0^\pi \frac{\pi (s^2 + 1) \cos \psi - s \cos^2 \psi - s}{(1 + s^2 - 2s \cos \psi)^2} d\psi =, \quad (21)$$

$$= -\frac{2k_2 \pi^2}{s(s^2 - 1)},$$

а для второго цилиндра конечных размеров $\pm h$

$$F(h)_\omega = 2hF(z)_\omega.$$

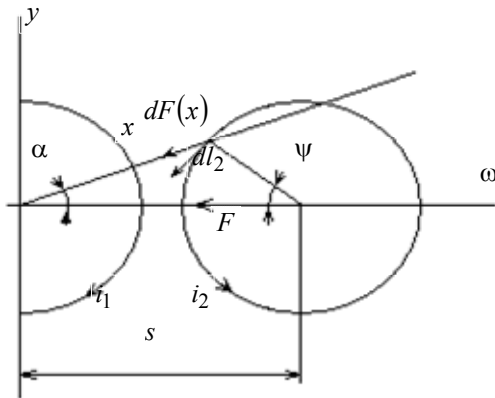


Рис. 3

Если же и левый цилиндр (источник поля) также имеет конечные размеры $\pm h$ по высоте, то силовое поле источника становится несимметричным по оси $U = uR$ (рис. 4) вследствие чего выражение (15) значительно усложняется. Интегрирование по оси аппликат вместо (15) приходится вести по несимметричным пределам

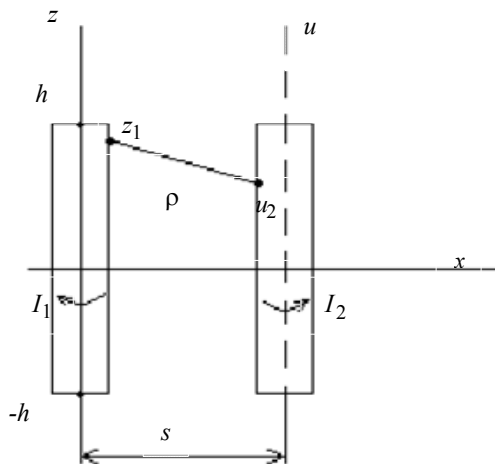


Рис. 4

$$\int_{-h-u}^{h-u} \frac{dz}{(z^2 + b^2)^{3/2}} =$$

$$= \frac{1}{b^2} \left(\frac{h-u}{\sqrt{(h-u)^2 + b^2}} - \frac{-(h+u)}{\sqrt{(h+u)^2 + b^2}} \right). \quad (22)$$

На оси $U = uR$, параллельной оси Z , полоска поверхности второго соленоида площадью $S = 2h df$, обтекаемая током с линейной плотностью i_2 и перпендикулярная оси x , будет притягиваться с усилием

$$dF(x) = \frac{\mu_0 i_1 i_2 R^2}{4\pi} \times 2 \int_0^\pi \sin^2 \psi d\psi \times$$

$$\times \frac{1}{b^2} \int_{-h}^h \left(\frac{h-u}{\sqrt{(h-u)^2 + b^2}} + \frac{h+u}{\sqrt{(h+u)^2 + b^2}} \right) du = \quad (23)$$

$$= C_1 \int_0^\pi \frac{(\sqrt{4h^2 + b^2} - b) \sin^2 \psi d\psi}{b^2},$$

где $C_1 = \mu_0 i_1 i_2 R^2 / \pi$, $b^2 = 1 + x^2 - 2x \cos \psi$.

Интеграл (23) не может быть представлен в виде аналитической функции аргумента x , и поэтому для вычисления требует применения методов численного интегрирования.

Таким же способом приходится определять и силу взаимодействия рассматриваемых соленоидов конечных размеров

$$F = 2 \int_0^\pi dF(x) \cos \alpha \cos(\alpha + \psi) d\psi, \quad (24)$$

где $x = \sqrt{1 + s^2 - 2s \cos \psi}$, $\alpha = \arcsin(\sin \psi / x)$.

Ответ на вопрос о том, какое из рассмотренных нетрадиционных соотношений (16) ближе к истине, должен дать эксперимент, проведение которого нами планируется в ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Николаев Г.В. Современная электродинамика и причины её парадоксальности. - Томск, 2003.
- [2] Брон О. Электромагнитное поле как вид материи. - М, 1964.
- [3] Боев В.М., Грибская Е.А., Лавриненко О.В. "Электротоническое состояние" и закон электромагнитной индукции Фарадея. - Електротехніка і електромеханіка. - 2004, № 4.
- [4] Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. К проблеме нелокального действия магнитного поля на обмотки электрических машин. "Електроінформ", 2005, №1.
- [5] Физическая энциклопедия. - М, 1989-1998, т.1.
- [6] Маринов С. Является ли эффект Ааронова-Бома эффектом Ааронова-Бома? Сб. Трудов III МНТК "Проблемы пространства, времени, тяготения". - С.Пб. "Политехника", 1995.

Поступила 18.10.2006

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА МОТАЛКИ

Лимонов Л.Г., к.т.н.

АОЗТ "Тяжпромавтоматика", Украина, 61072, Харьков, пр. Ленина, 56
тел. (057)758-64-88, e-mail: lgl@tpa5.vk.kh.ua

Стаття присвячена розгляданню питань використання асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором для приводу моталки прокатного стана або агрегата обробки прокатаної полоси, з використанням різних систем керування з частотним регулюванням швидкості.

Стаття посвящена розгляду питань використання асинхронного електродвигателя с короткозамкнутым ротором для привода моталки прокатного стана или агрегата обработки прокатанной полосы, с применением различных систем управления при частотном регулировании скорости.

Известны системы управления тиристорным электроприводом моталки с использованием приводного электродвигателя постоянного тока [1, 2]. Эти системы обеспечивают поддержание постоянного натяжения полосы путем увеличения момента двигателя с одновременным снижением скорости вращения.

Современной альтернативой такому электроприводу моталки является электропривод переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель, с использованием преобразователя частоты с векторным управлением. В таком преобразователе осуществляется раздельное управление двумя составляющими тока статора электродвигателя – активной и реактивной (поток возбуждения) благодаря наличию двух регуляторов и, соответственно, двух независимых контуров регулирования. Применение такого электропривода для моталки полосы дает возможность построить несколько вариантов систем управления, которые отличаются степенью использования основных параметров приводного электродвигателя.

Ниже рассматривается использование асинхронного электродвигателя при различных вариантах построения системы управления. При этом приняты следующие обозначения: d - диаметр барабана моталки, D_m - максимальный диаметр рулона, T - максимальное натяжение, а V - максимальная скорость полосы. В качестве допущения не учитывается насыщение магнитной системы электродвигателя, принято, что потокосцепление пропорционально реактивной составляющей тока статора, следовательно, вращающий момент электродвигателя [3, 4] пропорционален произведению

$$M \equiv I_{sq} \cdot \Psi \equiv I_{sq} \cdot I_{sd}, \quad (1)$$

где I_{sq}, I_{sd} - составляющие тока статора, а Ψ - потокосцепление электродвигателя.

ОДНОДИАПАЗОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

При такой системе управления, в процессе намотки величина активной составляющей тока статора I_{sq} поддерживается постоянной в соответствии с величиной заданного натяжения, и при номинальной

величине $I_{sq} = I_{sqn}$ натяжение полосы равно максимальному значению T .

Увеличение момента электродвигателя при росте диаметра рулона в процессе намотки и, соответственно, снижение его частоты вращения обеспечивается увеличением реактивной составляющей тока статора I_{sd} от минимального значения

$$I_{sd \min} = \frac{I_{sdn}}{K_\omega} \quad (2)$$

при минимальном d до номинальной величины I_{sdn} при максимальном диаметре рулона D_m . В выражении (2) введено обозначение коэффициента

$$K_\omega = \frac{D_m}{d}, \quad (3)$$

характеризующего требуемый диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя.

Особенностью рассматриваемой системы управления является то, что при достижении максимального диаметра D_m электродвигатель выходит на номинальные значения частоты вращения, частоты и амплитуды питающего напряжения, а регулирование его частоты вращения в процессе намотки производится увеличением частоты питающего напряжения сверх номинального значения. Это означает, что электродвигатель должен допускать возможность увеличения частоты вращения в K_ω раз по сравнению с номинальной. Требуемые величины номинальных параметров - момента и мощности приводного электродвигателя определяются следующими выражениями

$$M_n \geq \frac{T \cdot D_m}{2}; \quad (4)$$

$$P_n \geq M_n \cdot \omega_n. \quad (5)$$

Рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки рулона, используя методику, основные допущения и некоторые выражения из [1]. Закон изменения реактивной составляющей тока статора в процессе намотки рулона описывается выражением

$$I_{sd1} = I_{sdn} \frac{D}{D_m} = \frac{I_{sdn} \cdot D}{K_\omega \cdot d}, \quad (6)$$

в котором D - текущее значение диаметра рулона, равное при толщине полосы h и скорости V [1]

$$D = d \sqrt{1 + \frac{4h \cdot V \cdot t}{\pi \cdot d^2}}. \quad (7)$$

Эквивалентный (среднеквадратичный) ток за цикл намотки рулона

$$I_{sd1э} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_{sd1}^2 \cdot dt}, \quad (8)$$

где T_0 - время намотки рулона максимального диаметра, равное из (7)

$$T_0 = \frac{\pi \cdot d^2 (K_\omega^2 - 1)}{4h \cdot V}. \quad (9)$$

Используя выражения (6) и (9), из (8) получаем

$$I_{sd1э} = I_{sdn} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{2K_\omega^2}}. \quad (10)$$

Теперь, с учетом известных соотношений $I_{sdn} = I_{sn} \cdot \sin \varphi$ и $I_{sqn} = I_{sn} \cdot \cos \varphi$ найдем эквивалентный ток статора за цикл намотки из равенства

$$I_{s1э} = \sqrt{I_{sdn}^2 + I_{sq1э}^2}. \quad (11)$$

После подстановки в (11) полученного значения (10) и преобразования получим выражение полного тока статора электродвигателя за цикл намотки

$$I_{s1э} = I_{sn} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{2K_\omega^2} + \frac{K_\omega^2 - 1}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (12)$$

Численный анализ полученного выражения показывает, что рассмотренная система управления обеспечивает неплохое использование приводного электродвигателя в цикле намотки рулона: так, при изменении величины K_ω в диапазоне от 2 до 6 коэффициент использования электродвигателя при его коэффициенте мощности равном 0,8 находится в диапазоне от 0,93 до 0,908.

ОДНОДИАПАЗОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

В процессе намотки рулона в такой системе величина реактивной составляющей тока статора поддерживается постоянной и равной номинальной I_{sdn} . Увеличение момента электродвигателя по мере роста диаметра рулона производится путем увеличения активной составляющей тока статора от минимального

$$I_{sq2\min} = \frac{I_{sqn}}{K_\omega} \quad (13)$$

до номинального значения I_{sqn} при максимальном диаметре рулона D_m . Частота вращения приводного электродвигателя при этом снижается от номинальной при минимальном диаметре рулона до минимальной при максимальном диаметре рулона, благодаря соответствующему снижению частоты и амплитуды питающего напряжения, то есть регулирование частоты вращения электродвигателя производится вниз от номинальной. Величина момента приводного элек-

тродвигателя для создания натяжения T определяется (4), а номинальная мощность электродвигателя будет

$$P_{n2} \geq M_n \cdot \omega_{\max} = P_{n1} \cdot K_\omega \quad (14)$$

в K_ω раз выше, а номинальная частота вращения в K_ω раз ниже, чем в предыдущем случае.

Так же, как и в предыдущем случае, рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки. Закон изменения активной составляющей тока статора в процессе намотки рулона имеет вид, подобно (6)

$$I_{sq2} = I_{sqn} \frac{D}{D_m} = \frac{I_{sqn} \cdot D}{K_\omega \cdot d}, \quad (15)$$

а среднеквадратичное значение за цикл намотки рулона равно

$$I_{sq2э} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_{sq2}^2 \cdot dt}. \quad (16)$$

Подставив в (15) T_0 из (9), D из (7) и I_{sq2} из (15), после интегрирования получаем

$$I_{sq2э} = I_{sq2n} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{K_\omega^2}}. \quad (17)$$

Теперь, используя (11), после подстановки полученного значения (16) найдем величину эквивалентного полного тока электродвигателя за цикл намотки рулона максимального диаметра

$$I_{s2э} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{K_\omega^2 - 1}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (18)$$

Анализ выражения (18) показывает, что рассмотренная система управления обеспечивает худшее использование приводного электродвигателя в цикле намотки, чем предыдущая: так, при изменении величины K_ω в диапазоне от 2 до 6 коэффициент использования электродвигателя при его коэффициенте мощности равном 0,8 находится в диапазоне от 0,87 до 0,83.

ДУХДИАПАЗОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Применение двухдиапазонной системы управления позволяет использовать асинхронный электродвигатель с меньшей требуемой величиной диапазона регулирования частоты вращения ослаблением потока возбуждения по сравнению с однодиапазонной системой с регулированием потока возбуждения, и в то же время меньшей требуемой мощности, чем при применении однодиапазонной системы без регулирования потока возбуждения.

В этой системе, в отличие от двух рассмотренных выше, цикл намотки рулона максимального диаметра разделяется на два диапазона: первый - от минимального диаметра рулона d до некоторого промежуточного D_0 , и второй - от диаметра D_0 до максимального D_m . В первом диапазоне, при постоянной величине активной составляющей тока статора, равной минимальному значению

$$I_{sq31\min} = I_{sqn} \frac{D_0}{D_m}, \quad (19)$$

и номинальном напряжении снижение частоты вращения электродвигателя производится посредством увеличения реактивной составляющей тока статора (потока возбуждения) от минимальной величины

$$I_{sd31\min} = I_{sqn} \frac{d}{D_0} \quad (20)$$

до номинальной, которая достигается при диаметре рулона D_0 . Во втором диапазоне, при увеличении диаметра рулона от D_0 до D_m поток возбуждения электродвигателя поддерживается постоянным, равным номинальному, а увеличение момента электродвигателя происходит путем увеличения активной составляющей тока от минимального до номинального значения, которое достигается при максимальных величинах натяжения и диаметра рулона. Снижение частоты вращения электродвигателя в этом диапазоне производится снижением частоты и амплитуды питающего напряжения.

Применение рассматриваемой системы управления позволяет применить в качестве приводного электродвигателя с меньшим диапазоном регулирования частоты вращения свыше номинальной, равным отношению

$$K_0 = \frac{D_0}{d}. \quad (21)$$

Требуемый номинальный момент электродвигателя определяется выражением (4), а номинальная частота вращения достигается при диаметре D_0 , таким образом, мощность электродвигателя для создания натяжения T равна

$$P_{n3} = M_n \cdot \omega_0 = P_{n1} \frac{d}{D_0} = P_{n1} \frac{K_0}{K_0}. \quad (22)$$

Рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки рулона при использовании двухдиапазонной системы управления.

В первом диапазоне намотки активная составляющая тока статора не изменяется, а реактивная составляющая изменяется по закону

$$I_{sd31} = I_{sdn} \frac{D}{D_0}. \quad (23)$$

Используя (7), найдем время намотки рулона в первом диапазоне

$$T_1 = \frac{\pi \cdot d^2 (K_0^2 - 1)}{4h \cdot V}. \quad (24)$$

Из (8), применительно к первому диапазону намотки, можно записать выражение эквивалентного значения реактивной составляющей тока

$$I_{sd31\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} I_{sd31}^2 \cdot dt}, \quad (25)$$

которое после подстановки (24) дает

$$I_{sd31\text{э}} = I_{sdn} \sqrt{\frac{1+K_0^2}{2K_0^2}}. \quad (26)$$

Используя теперь (11) с учетом (19), получим выражение эквивалентного полного тока статора в первом диапазоне намотки

$$I_{s31\text{э}} = I_{sn} \sqrt{\frac{1+K_0^2}{2K_0^2} - \frac{K_0^2 \cdot K_\omega^2 + K_\omega^2 - 2K_0^4}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (27)$$

Во втором диапазоне реактивная составляющая тока статора не изменяется и равна номинальному значению I_{sdn} , а активная составляющая увеличивается пропорционально диаметру рулона по закону

$$I_{sq32} = I_{sq31} \frac{D}{D_0} = I_{sqn} \frac{D}{K_\omega \cdot d}. \quad (28)$$

Используя (7), применительно ко второму диапазону намотки, найдем время намотки во втором диапазоне

$$T_2 = \frac{\pi \cdot d^2 (K_\omega^2 - K_0^2)}{4h \cdot V}, \quad (29)$$

а затем, аналогично предыдущему случаю, из выражения эквивалентного значения активной составляющей тока в этом диапазоне намотки

$$I_{sq32\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} I_{sq32}^2 \cdot dt} \quad (30)$$

с учетом (28) и (29) находим

$$I_{sq32\text{э}} = I_{sqn} \sqrt{\frac{K_0^2 + K_\omega^2}{2K_0^2}}. \quad (31)$$

Используя выражение (11) с учетом (31), получим значение эквивалентного полного тока статора во втором диапазоне намотки

$$I_{s32\text{э}} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{K_\omega^2 - K_0^2}{2K_0^2} \cos^2 \varphi}. \quad (32)$$

Величину эквивалентного полного тока электродвигателя за весь цикл намотки максимального диаметра определим, используя известную формулу

$$I_{s3\text{э}} = \sqrt{\frac{I_{s31\text{э}}^2 T_1 + I_{s32\text{э}}^2 T_2}{T_0}}, \quad (33)$$

которая после подстановки и преобразования дает следующее выражение (в общем виде)

$$I_{s3\text{э}} = I_{sn} \sqrt{A + B \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (34)$$

в котором

$$A = \frac{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 - K_0^4 - 1}{2K_0^2 (K_\omega^2 - 1)}; \quad (35)$$

$$B = -\frac{K_\omega^4 \cdot K_0^2 - K_\omega^2 \cdot K_0^4 + 2K_0^4 - K_\omega^2 - K_0^6}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 (K_\omega^2 - 1)}. \quad (36)$$

А анализ выражения (34) показывает, что степень использования электродвигателя при применении двухдиапазонной системы управления не лучше, чем при применении предыдущей однодиапазонной системы без регулирования тока возбуждения.

Снижение требуемой мощности приводного электродвигателя и улучшение технико-экономических показателей электропривода моталки с асинхронным электродвигателем может быть достигнуто применением модифицированных систем управления. Основная особенность этих систем за-

ключается в том, что при их использовании, в процессе намотки рулона с максимальным натяжением полюсы, часть цикла намотки рулона максимального диаметра происходит при токе статора электродвигателя, превышающем номинальное значение, но при этом среднеквадратичное значение тока за цикл намотки не превышает номинальной величины, что предотвращает перегрев электродвигателя. Ниже рассмотрены два варианта таких систем управления.

ОДНОДИАПАЗОННАЯ МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

В такой системе поток возбуждения электродвигателя в процессе намотки рулона поддерживается постоянным и равным номинальному, то есть уменьшение скорости электродвигателя производится путем снижения частоты питающего напряжения от номинального значения при минимальном диаметре рулона до минимального – при максимальном диаметре. Увеличение момента электродвигателя при намотке производится путем увеличения активной составляющей тока статора сначала от минимального значения при минимальном диаметре рулона до номинального, которое достигается при некотором промежуточном диаметре рулона

$$D_m > D_i > d, \quad (37)$$

а затем дальнейшим увеличением сверх номинального значения, так что

$$I_{sq4 \min} = I_{sqn} \frac{d}{D_i}; \quad (38)$$

$$I_{sq4 \max} = I_{sqn} \frac{D_m}{D_i} = I_{sqn} \cdot K_i. \quad (39)$$

Номинальная частота вращения электродвигателя соответствует минимальному диаметру рулона, а номинальную мощность электродвигатель развивает при максимальном натяжении и диаметре рулона D , т.е.

$$P_{n4} = P_n \frac{K_\omega}{K_i}. \quad (40)$$

Для анализа загрузки электродвигателя в рассматриваемой системе, используя примененную ранее методику, найдем эквивалентное значение активной составляющей тока статора за цикл намотки рулона максимального диаметра, принимая во внимание, что закон изменения этой составляющей имеет вид

$$I_{sq4} = I_{sqn} \frac{D}{D_i}, \quad (41)$$

$$I_{sq4\phi} = I_{sqn} \sqrt{\frac{K_i^2 (K_\omega^2 + 1)}{2K_\omega^2}}. \quad (42)$$

Соответственно, полный ток электродвигателя будет равен

$$I_{s4\phi} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{2K_\omega^2 - K_i^2 \cdot K_\omega^2 + K_i^2}{2K_\omega^2}} \cos^2 \phi. \quad (43)$$

Номинальной нагрузке электродвигателя за цикл намотки соответствует условие равенства $I_{sq4\phi}$ но-

минальному значению I_{sqn} , т.е. условие

$$\frac{K_i^2 (K_\omega^2 + 1)}{2K_\omega^2} = 1 \quad (44)$$

или

$$K_i = K_\omega \sqrt{\frac{2}{K_\omega^2 + 1}}, \quad (45)$$

из которого можно найти величину коэффициента K_i по известной величине диапазона изменения диаметра рулона K_ω .

ДВУХДИАПАЗОННАЯ МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Намотка рулона при применении этой системы, как и при использовании обычной двухдиапазонной системы, происходит в два этапа. Сначала, в первом диапазоне, при изменении диаметра рулона от d до D_0 , намотка происходит при постоянной величине активной составляющей тока, равной

$$I_{sq51 \min} = I_{sqn} \frac{D_0}{D_i} = I_{sqn} \frac{K_0 \cdot K_i}{K_\omega} \quad (46)$$

и увеличении реактивной составляющей от минимальной величины, определяемой выражением

$$I_{sd51 \min} = I_{sdn} \frac{d}{D_0} = \frac{I_{sdn}}{K_0} \quad (47)$$

до номинального значения. При этом частота вращения электродвигателя снижается от максимального до номинального значения путем снижения частоты питающего напряжения при номинальной амплитуде.

При дальнейшем увеличении диаметра рулона в процессе намотки от величины D_0 до максимального значения D_m реактивная составляющая тока поддерживается номинальной, а активная - растет пропорционально диаметру, достигая номинального значения при диаметре D_i , и далее, при диаметре рулона D_m - максимального значения, которое равно

$$I_{sq5 \max} = I_{sqn} \frac{D_m}{D_i} = I_{sqn} \cdot K_i. \quad (48)$$

Частота вращения электродвигателя при этом снижается путем снижения частоты и амплитуды питающего напряжения. Таким образом, номинальная частота вращения приводного электродвигателя соответствует диаметру рулона D_0 и величина ее меньше, чем максимальная требуемая в K_0 раз, а потребная мощность электродвигателя равна

$$P_{n5} = P_n \frac{K_\omega}{K_0 \cdot K_i}. \quad (49)$$

Определить параметры приводного электродвигателя и произвести разбивку диапазонов регулирования при конструировании такой системы управления электроприводом моталки можно, используя нижеприведенные зависимости, которые получены с использованием примененной ранее методики.

Эквивалентное значение реактивной составляющей тока за время работы в первом диапазоне

$$I_{sd51\varnothing} = I_{sdn} \sqrt{\frac{K_0^2 + 1}{2K_0^2}}, \quad (50)$$

а эквивалентный полный ток электродвигателя в первом диапазоне, с учетом (46)

$$I_{s51\varnothing} = I_{sn} \sqrt{\frac{K_0^2 + 1}{2K_0^2} - \frac{K_0^2 \cdot K_\omega^2 + K_\omega^2 - 2K_0^4 \cdot K_i^2}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (51)$$

Во втором диапазоне обмотки при номинальной величине реактивной составляющей тока эквивалентное значение активной составляющей определяется выражением

$$I_{sq52\varnothing} = I_{sqn} \sqrt{\frac{K_0^2 \cdot K_i^2 + K_\omega^2 \cdot K_i^2}{2K_\omega^2}}, \quad (52)$$

а эквивалентный полный ток электродвигателя в этом диапазоне равен

$$I_{s52\varnothing} = I_{sn} \sqrt{1 - \frac{2K_\omega^2 - K_0^2 \cdot K_i^2 - K_\omega^2 \cdot K_i^2}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi}. \quad (53)$$

С учетом (51) и (53) определяется эквивалентный полный ток электродвигателя за цикл обмотки рулона, в общем виде

$$I_{s5} = I_{sn} \sqrt{P - Q \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (54)$$

где

$$P = \frac{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 - K_0^4 - 1}{2K_0^2 (K_\omega^2 - 1)}, \quad (55)$$

а

$$Q = \frac{K_0^6 \cdot K_i^2 - 2K_0^4 \cdot K_i^2 + K_0^4 \cdot K_\omega^2 - 2K_0^2 \cdot K_\omega^4 + K_0^2 \cdot K_i^2 \cdot K_\omega^4 + K_\omega^2}{2K_0^2 \cdot K_\omega^2 (K_\omega^2 - 1)}. \quad (56)$$

Очевидно, что для полного использования электродвигателя, его ток за цикл обмотки рулона должен быть равен номинальному, а для этого выражение, находящееся в (54) под знаком радикала, должно равняться 1. Как показал численный анализ, при реальных значениях K_ω (от 2 до 6) и коэффициента K_0 (от 1,1 до 1,5) величина слагаемого P с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть принята равной 1 (максимальная погрешность достигает 12% при маловероятном сочетании значений $K_\omega = 2$ и $K_0 = 1,5$). Это означает, что полной загрузке приводного электродвигателя соответствует равенство нулю множителя Q , т.е.

$$K_0^6 \cdot K_i^2 - 2K_0^4 \cdot K_i^2 + K_0^4 \cdot K_\omega^2 - 2K_0^2 \cdot K_\omega^4 + K_0^2 \cdot K_i^2 \cdot K_\omega^4 + K_\omega^2 = 0. \quad (57)$$

Зная диапазон изменения диаметра рулона K_ω , задавшись максимальной и номинальной частотами вращения электродвигателя (K_0), из (57) можно определить величину коэффициента K_i , которая обеспечит желаемую загрузку электродвигателя при использовании рассматриваемой системы управления.

В заключение следует отметить, что любая из пяти рассмотренных систем управления может быть применена при конструировании новых или реконструкции действующих электроприводов намоточно-

размоточных механизмов полосового материала, в первую очередь, моталок и разматывателей станов холодной прокатки и агрегатов непрерывной обработки полосового материала (агрегатов непрерывного травления, цинкования, лужения и др.) с использованием в качестве приводного – асинхронного электродвигателя и с питанием его от преобразователя частоты с векторным управлением или с системой прямого управления моментом электродвигателя. При этом выбор системы управления должен определяться с учетом конкретных параметров механизма и желаемых энергетических показателей электромеханической системы. Полученные соотношения позволяют определить основные параметры приводного электродвигателя для конкретного использования любой из рассмотренных систем управления, причем в случае применения зависимостей, приведенных в разделах для модифицированных систем управления, обеспечивается некоторый запас по нагреву, так как не учтено время пауз на снятие смотанного рулона и заправку нового, а также благодаря неучтенной нелинейности магнитной системы электродвигателя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дралюк Б.Н., Тикоцкий А.Е. Двухдиапазонное управление электродвигателем моталки стана рулонной прокатки листа Электричество, Москва, №5, 1969 г.
- [2] Альшиц В.М. Зеленцов В.И. Тикоцкий А.Е. Электроприводы моталок и разматывателей станов холодной прокатки. Москва. ИНФОРМЭЛЕКТРО. 1980 г.
- [3] Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецова И.С., Лебедев Е.Д., Тарасенко Л.М. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентиляемыми преобразователями, Москва, Энергоатомиздат, 1983г.
- [4] Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателя переменного тока, Харьков, Основа, 2004 г.

Поступила 21.09.2006

НОВЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ФАЗОСДВИГАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

Пентегов И.В., д.т.н., проф., Рымар С.В., к.т.н., с.н.с.
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины
Украина, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. +38(044) 227-23-88, e-mail: elmag@paton.kiev.ua

Волков И.В., д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Украины
Институт электродинамики НАН Украины
Украина, 03680, Киев-57, пр. Победы, 56
тел. +38(044) 456-20-51, e-mail: volk@elan-ua.net

Ларченко Б.Б.
Черниговский государственный технологический университет
Украина, 14000, Чернигов, ул. Шевченко, 95
тел. +38(04622) 3-22-99, e-mail: boris@inel.stu.cn.ua

M. Levin, P. Eng., Presid.
MIRUs International Inc.
6805 Invader Cres., Unit #12, Mississauga, Ontario, Canada L5T 2K6
tel. (905) 565-6900 Ext. 12, e-mail: michael@mirusinternational.com, <http://www.mirusinternational.com>

Розроблені нові фазозсувні автотрансформаторні пристрої пригнічення вищих гармонік струму, які можуть використовуватися в трифазних електричних мережах без нульового проводу при роботі з 12-пульсними схемами випрямлячів і з рівномірно розподіленими навантаженнями. Нова конструкція пристроїв забезпечує покращені масогабаритні і техніко-економічні характеристики за рахунок розміщення обмоток тільки на крайніх стержнях магнітопровода, з вільним центральним стержнем.

Разработаны новые фазосдвигающие автотрансформаторные устройства подавления высших гармоник тока, которые могут использоваться в трехфазных электрических сетях без нулевого провода при работе с 12-пульсными схемами выпрямителей и с равномерно распределенными нелинейными нагрузками. Новая конструкция устройств обеспечивает улучшение массогабаритных и технико-экономических характеристик за счет размещением обмоток только на крайних стержнях магнітопровода, со свободным центральным стержнем.

ВВЕДЕНИЕ

На промышленных предприятиях, корабельных и береговых установках, в системах вентиляции зданий и оборудования, насосных станциях и на других технических объектах находят широкое применение различные схемы выпрямления [1], от которых питаются частотно регулируемые электроприводы.

Эти схемы выпрямления генерируют в сеть высшие гармоники тока, искажающие синусоидальную форму кривой тока и напряжения сети [1–5]. Высшие гармоники тока в питающей сети становятся причиной выхода из строя электротехнического и электронного оборудования, вычислительной техники, перегрева роторов и ускоренного износа подшипников электродвигателей и генераторов, аварий в системах управления электроприводов, взрывов электролитических конденсаторов, ложных отключений защиты электрооборудования, быстрого старения изоляции и перегорания электроосветительных приборов и других негативных последствий.

Разработкой методов подавления высших гармоник тока занимаются ученые и специалисты во всех промышленно развитых странах [1–16]. Однако практическое применение устройств подавления высших гармоник тока (УПВГТ) в Украине пока единично.

На протяжении 14 лет в Северной Америке действует стандарт [17], обязывающий потребителей электроэнергии принимать меры к подавлению высших гармоник тока. В странах Европейского Союза в течение последних лет также внедрены междуна-

рные стандарты EN 61000-2-2, EN 61000-3-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4 и др., в которых регламентированы предельные уровни эмиссии гармоник тока для различного электрооборудования в системах промышленного и коммунального электроснабжения [18]. В действующем же в Украине Межгосударственном Стандарте 13109-97 "Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения" эти проблемы не затронуты.

Снижать уровень высших гармоник тока можно "активными" и "пассивными" устройствами. Однако "активные" устройства дороги, сложны и не всегда надежны. Поэтому основное внимание уделяется "пассивным" устройствам. В основном это фильтры высших гармоник тока [3, 15, 16, 19] и УПВГТ трансформаторного и автотрансформаторного типа [1–5, 9, 10, 14–16]. Достоинством данного оборудования является его надежность, отсутствие или минимальная генерация в сеть реактивной мощности, которая отрицательно влияет на работу сетей. Поэтому работа по усовершенствованию существующих, и разработка новых УПВГТ актуальна.

Целью статьи является описание и сравнительный анализ разработанных новых фазосдвигающих автотрансформаторных УПВГТ [20], являющихся аналогами наиболее распространенному автотрансформаторному УПВГТ "гексагонального" типа [2], и работающих в трехфазных электрических сетях без нулевого провода с мощными 12-пульсными выпрямителями.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И НОВЫХ СХЕМ УПВГТ

Классический УПВГТ "гексагонального" типа [2], работающий в трехфазных электрических сетях без нулевого провода с 12-пульсными выпрямителями представляет собой многообмоточный автотрансформатор, обмотки которого соединены таким образом, чтобы подавить высшие гармоники тока за счет их сдвига по фазе и взаимной компенсации этих гармоник. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма напряжений названного устройства показаны на рис. 1, *a* и *b*.

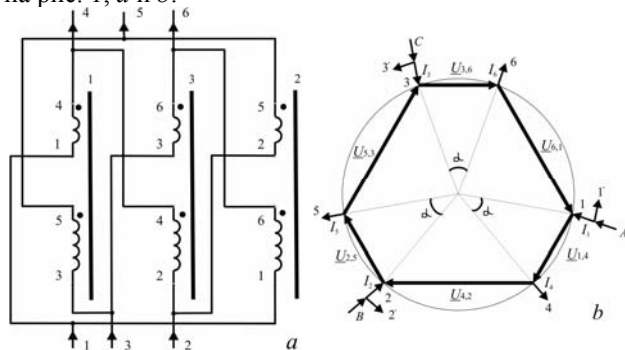


Рис. 1. Схема соединения *a* и векторная диаграмма напряжений *b* обмоток автотрансформаторного УПВГТ типа "гексагон"

Автотрансформатор на рис. 1 содержит один ввод и один вывод для каждой из фаз и обеспечивает электрический угол сдвига между векторами входного и выходного напряжения $\alpha = 30^\circ$. Автотрансформатор имеет трехстержневой магнитопровод, на двух крайних 1 и 2 и одном центральном 3 стержнях которого расположены по две обмотки – "короткая" и "длинная", намотанные в одном направлении винтовой линии. Каждая "короткая" обмотка содержит количество витков в $\sin(\alpha/2)/\sin(60^\circ - \alpha/2)$ меньшее количества витков каждой "длинной" обмотки. Обмотки на стержнях магнитопровода обозначены так: 4,1 и 5,3 – "короткая" и "длинная" обмотки на крайнем стержне 1, на векторной диаграмме напряжений им соответствуют "короткий" вектор $\underline{U}_{1,4}$ и "длинный" вектор $\underline{U}_{5,3}$; 5,2 и 6,1 – "короткая" и "длинная" обмотки на крайнем стержне 2, на векторной диаграмме напряжений им соответствуют "короткий" вектор $\underline{U}_{2,5}$ и "длинный" вектор $\underline{U}_{6,1}$; 6,3 и 4,2 – "короткая" и "длинная" обмотки на центральном стержне 2, на векторной диаграмме напряжений им соответствуют "короткий" вектор $\underline{U}_{3,6}$ и "длинный" вектор $\underline{U}_{4,2}$. Точками на схеме рис. 1, *a* отмечены начала обмоток.

Векторная диаграмма напряжения обмоток устройства образует гексагональную схему соединения векторов, см. рис. 1, *b*, откуда и возникло название данного УПВГТ. Три вершины гексагона, соответствующие фазам *A*, *B*, и *C*, являются вводами схемы – 1, 2, 3, а остальные три вершины являются выводами схемы – 4, 5, 6.

УПВГТ подавляет гармоники тока с номерами 5, 7, 17, 19 и т.д.

Подключается УПВГТ к 12-пульсной схеме, показанной на рис. 2. На рисунке изображены два трехфазных выпрямительных моста с входами 1', 2', 3', к которым подключаются соответствующие вводы устройства 1', 2', 3' и входами 4, 5, 6, к которым подсоединяются соответствующие выводы устройства 4, 5,

6, уравнивающий реактор L с бифилярно намотанными обмотками, реактор L_0 , батарея конденсаторов C и нагрузка Z_n .

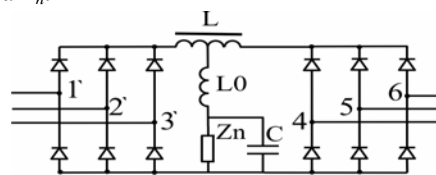


Рис. 2. Схема 12-пульсного выпрямителя, состоящего из двух параллельно включенных схем Ларионова

Таким образом, из одного питающего трехфазного напряжения сети, при помощи рассмотренного трехфазного автотрансформаторного фазосдвигающего УПВГТ, образуются две трехфазные системы напряжения, сдвинутые между собой на электрический угол α (оптимальная величина этого угла равна 30°). При этом в каждой трехфазной системе фазные напряжения одинаковы между собой по величине и сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов.

Рассмотрим новые разработанные конструкции УПВГТ, являющиеся аналогами рассмотренного выше "гексагона" [20].

Проанализировав векторную диаграмму напряжений "гексагона" на рис. 1, *b*, авторы пришли к выводу, что в такой схеме можно исключить "длинный" вектор $\underline{U}_{4,2}$, заменив его двумя "длинными" векторами $\underline{U}_{4,7}$ и $\underline{U}_{7,2}$, являющихся соответственно продолжением векторов $\underline{U}_{1,4}$ и $\underline{U}_{2,5}$, см. рис. 3, *b*, и исключить "короткий" вектор $\underline{U}_{3,6}$, заменив его двумя "короткими" векторами $\underline{U}_{3,8}$ и $\underline{U}_{8,6}$, являющихся продолжением векторов $\underline{U}_{5,3}$ и $\underline{U}_{6,1}$. При такой замене указанных векторов, векторами, соединенными по схеме "открытого треугольника", векторная диаграмма напряжений принимает форму ромба. То есть, убираются обмотки 6,3 и 4,2 с центрального стержня магнитопровода и добавляются "длинная" обмотка 7,4 и "короткая" обмотка 3,8 на крайний стержень 1, и "длинная" обмотка 2,7 и "короткая" обмотка 8,6 на крайний стержень 2. При этом обмотки 7,4 и 2,7, а также обмотки 3,8 и 8,6 соединяются по схеме "открытого треугольника".

Устройство на рис. 3 получило название УПВГТ типа "ромб" и имеет по две пары "коротких" и "длинных" обмоток на каждом стержне магнитопровода, то есть по четыре обмотки на стержне, а всего – восемь обмоток, см. рис. 3, *b*.

Система обмоток магнитно уравновешена. Сумма ампервитков обмоток 4,1 и 5,3 равна нулю. То же самое можно сказать о парах обмоток 5,2 и 6,1; 3,8 и 7,4; 8,6 и 2,7. Это основное свойство автотрансформаторов данного типа [2, 4].

Заметим, что вводы и выводы на векторной диаграмме "ромба" остались на тех же местах, что и на векторной диаграмме "гексагона". То есть устройства совместимы друг с другом и взаимно заменяемы.

Одна из возможных конструкций полученного трехфазного автотрансформаторного фазосдвигающего УПВГТ представлена на рис. 4. На рисунке даны обозначения: 1 – магнитопровод; 2, 3 – катушками с обмотками на крайних стержнях магнитопровода. Центральный стержень магнитопровода остается свободным. Такое расположение катушек применяется для трехфазно-двухфазного трансформатора, собранного по схеме "открытого" треугольника [1].

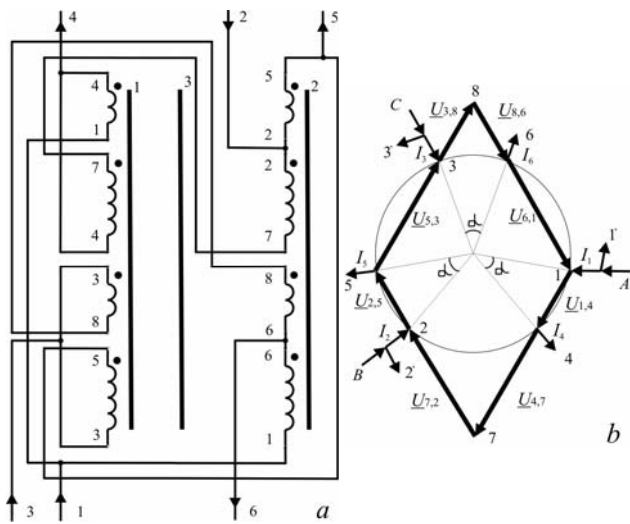


Рис. 3. Схема соединения *a* и векторная диаграмма напряжений обмоток *b* нового автотрансформаторного УПВГТ типа "ромб"

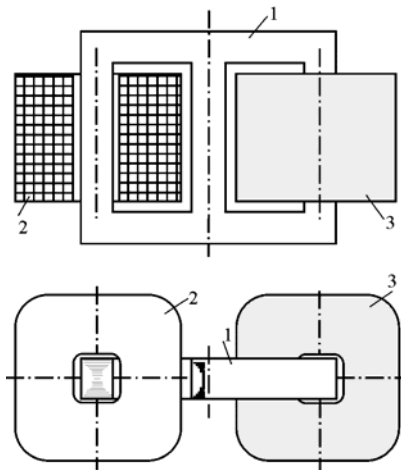


Рис. 4. Конструкция трехфазного автотрансформаторного фазосдвигающего УПВГТ с катушками с обмотками на крайних стержнях магнитопровода, со свободным центральным стержнем

Подобная конструкция имеет улучшенную технологию изготовления и условий охлаждения, уменьшенную массу магнитной системы и обмоток, и, как следствие, улучшенные технико-экономические показатели за счет свободного от обмоток центрально стержня магнитопровода.

Некоторое увеличение установленной мощности УПВГТ полностью компенсируется возможностью увеличения плотности тока в обмотках и магнитной индукции в магнитопроводе вследствие значительно лучших условий охлаждения (отсутствует наиболее нагреваемая средняя катушка).

Для получения еще одной модификации схемы, приведенной на рис. 5, изменим порядок соединения в обмотках "открытых треугольников" соответственно на участках с узлами 4, 2 и 3, 6 на рис. 3 (см. расположение векторов напряжений $\underline{U}_{4,7}$ и $\underline{U}_{7,2}$, и векторов $\underline{U}_{3,8}$ и $\underline{U}_{8,6}$ на рис. 3, *b* и расположение векторов напряжений $\underline{U}_{4,7}$ и $\underline{U}_{7,2}$, и векторов $\underline{U}_{3,7}$ и $\underline{U}_{7,6}$ на рис. 5, *b*).

На векторных диаграммах напряжений точки 7 и 8 на рис. 3, *b* совмещаются в точке 7 на рис. 5, *b*, поскольку имеют одинаковый электрический потенциал напряжений из-за своего симметричного расположе-

ния относительно центра ромба. Следовательно, эти точки можно гальванически соединить друг с другом на схеме рис. 5, образуя точку пересечения 7.

Схема соединения обмоток нового устройства показана на рис. 5, *a*. Полученная схема будет являться модификацией схемы "ромба" и полностью с ней совместима. Устройство получило название УПВГТ типа "флаги".

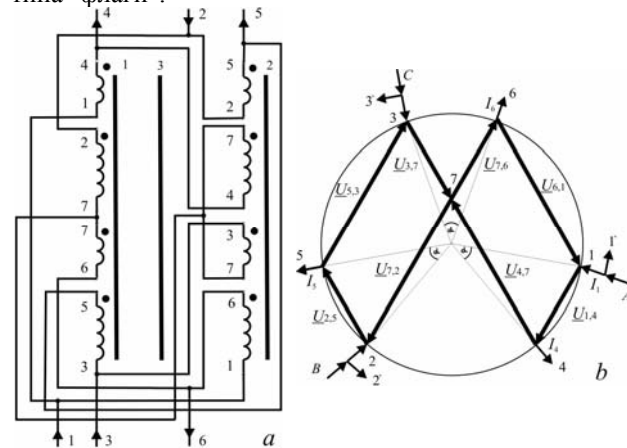


Рис. 5. Схема соединения *a* и векторная диаграмма напряжений обмоток *b* нового автотрансформаторного УПВГТ типа "флаги"

Система обмоток автотрансформатора на рис. 5 также магнитно уравновешена. Сумма ампервитков обмоток 4,1 и 5,3 равна нулю. То же относится и к парам обмоток 7,6 и 2,7; 5,2 и 6,1; 3,7 и 7,4.

Новые трехфазные фазосдвигающие автотрансформаторные УПВГТ на рис. 3 и 5 могут обеспечивать любой заданный электрический угол сдвига α в диапазоне от 0° до 120° между векторами входного и выходного напряжения, но оптимальным значением, так же как и в "гексагоне", является угол $\alpha = 30^\circ$. Количество витков "длинных" обмоток соотносится с количеством витков "коротких" обмоток как $\sin(\alpha/2)/\sin(60^\circ - \alpha/2)$. Устройства имеют три ввода 1, 2, 3 и три вывода 4, 5, 6.

Устройства работают таким образом. Вводы устройств 1, 2, 3 подключаются к сети трехфазного переменного электрического тока. При этом по обмоткам текут токи. Обусловленные этими токами магнитодвижущие силы создают в магнитопроводе устройства переменные магнитные потоки. Магнитные потоки от каждой из обмоток, проходят через три стержня магнитопровода и два его ярма и сцепляются со всеми обмотками устройства. Магнитные потоки, в соответствии с законом электромагнитной индукции, наводят во всех обмотках электродвижущие силы самоиндукции и взаимной индукции. На выводах устройства 4, 5, 6 получаем напряжения, которые сдвинуты по фазе относительно входных напряжений на угол α . Векторы 5-ой гармоники образуют обратную последовательность чередования фаз, а векторы 7-ой гармоники – прямую.

При предложенном соединении обмоток векторы напряжений каждой фазы расщепляются на векторы, смещенные один относительно другого на 30 электрических градусов. Векторы 5-ой и 7-ой гармоник токов фаз второго моста, подключенного к УПВГТ, сдвигаются на определенный угол и, проникая в первичную сеть, взаимно компенсируются с токами перво-

го выпрямительного моста. То же происходит с 17-ой и 19-ой гармониками и т.д. То есть, рассматриваемые схемы УПВГТ типа "ромб" и "флаги", также как и УПВГТ типа "гексагон", подавляют гармоники с номерами $6 \cdot (2 \cdot m - 1) \pm 1$ и $6 \cdot (2 \cdot m - 2) \pm 1$, где $m = 1, 2, 3, \dots$. Не подавляются гармоники 11, 13 и т.д. При этом от высших гармоник освобождаются не токи обмоток автотрансформатора устройства, а линейные токи сети питания.

Для расчета таких устройств можно использовать оптимизационную модель трехфазного многообмоточного автотрансформатора со свободным центральным стержнем магнитопровода из работы [21].

Применяя законы Кирхгофа и закон равновесия магнитодвижущих сил, и пренебрегая током намагничивания, можно показать, что действующие значения входных I_1, I_2, I_3 и выходных I_4, I_5, I_6 токов для всех рассматриваемых автотрансформаторов одинаковы и равны:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = \frac{I_n \cdot \sqrt{2/3}}{2}, \quad (1)$$

где I_n – усредненное действующее значение тока на входе одного выпрямителя.

Действующие значения напряжений на "длинных" U_d и "коротких" U_k обмотках для всех рассматриваемых автотрансформаторов рассчитываются по формулам:

$$U_d(\alpha) = 2 \cdot U_m \cdot \sin(60^\circ - \alpha/2); \quad (2)$$

$$U_k(\alpha) = 2 \cdot U_m \cdot \sin(\alpha/2). \quad (3)$$

Здесь U_m – амплитудное значение фазного напряжения.

Для автотрансформатора "гексагон", см. рис. 1, b , действующие значения токов в его «длинных» обмотках $I_{d(I)}$ и в «коротких» обмотках $I_{k(I)}$ вычисляются по формулам:

$$I_{d(I)} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad (4)$$

$$I_{k(I)} = I_{d(I)} \cdot \sin(60^\circ - \alpha/2) / \sin(\alpha/2), \quad (5)$$

а установочная мощность этого автотрансформатора определяется по формуле:

$$S_{(I)} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot I_{d(I)} \cdot U_d(\alpha). \quad (6)$$

Для автотрансформатора "ромб", см. рис. 3, действующие значения токов в "длинной" обмотке $I_{d(II)}$ определяются по формуле (4), в короткой обмотке $I_{k(II)}$, по выражению (5), а установочная мощность $S_{(II)}$, по уравнению:

$$S_{(II)} = 4 \cdot I_{d(I)} \cdot \frac{U_d(\alpha)}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Для автотрансформатора "флаги", см. рис. 5, действующие значения токов в длинной обмотке $I_{d(III)}$ определяется также по формуле (4), а в короткой обмотке $I_{k(III)}$, по формуле (5). Установочная мощность $S_{(III)}$ определяются по формуле (7).

На рис. 6 построены графики установленных мощностей S в зависимости от угла сдвига фаз α , отнесенных к мощности полной нагрузки P_n двух выпрямителей [4]:

$$P_n = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot U_m \cdot I_n. \quad (8)$$

Из графика видно, что при угле $\alpha = 30^\circ$ установленная мощность автотрансформаторов типа "ромб" и

"флаги" в 4/3 раза больше мощности "гексагона".

Однако, как уже было сказано, это полностью компенсируется возможностью увеличения плотности тока в обмотках и магнитной индукции в магнитопроводе. Помимо этого, эти автотрансформаторы технологичнее в изготовлении, поскольку имеют обмотки только на крайних стержнях магнитопровода.

По графику на рис. 6 можно так же приблизительно оценить установленные (типовые) мощности рассмотренных автотрансформаторов при различных значениях угла α . При $\alpha = 30^\circ$ установленная мощность новых УПВГТ составляет 0,29 от полной мощности нагрузки двух выпрямителей.

Следует также сказать о напряжениях между обмотками. Из векторных диаграмм видно, что максимальное напряжение между обмотками будет наблюдаться в "ромбе", оно в раз больше чем во всех остальных рассмотренных автотрансформаторах. Это требует повышенной изоляции между обмотками, а в тех случаях, когда указанные уравновешенные пары обмоток наматываются в этих УПВГТ бифилярно, то повышенной должна быть и межвитковая изоляция проводов.

На рис. 7 построена зависимость коэффициента гармоник тока THD_I (Total Harmonic Current Distortion) от угла α :

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{25} I_h^2 / I_1^2}. \quad (9)$$

где I_h, I_1 – действующие значения тока h -ой и 1-ой гармоник линейного тока сети.

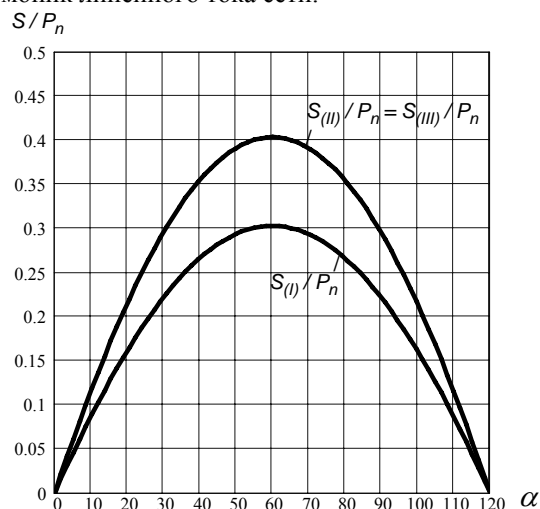


Рис. 6. Зависимость установочных мощностей автотрансформаторов, отнесенных к мощности нагрузки, от угла сдвига фаз

Зависимость THD_I от угла α в фазных токах сети с учетом гармоник до 25-й включительно (по нормам США и Канады) при применении данной схемы и в типичном случае, когда амплитуды гармоник в нагрузке пропорциональны их номерам, может быть рассчитана численными методами [4].

Из графика на рис. 7 следует, что оптимальным является угол $\alpha = 30^\circ$.

Сравнивая значение $THD_I = 0,133$ при $\alpha = 30^\circ$ с величиной $THD_I = 0,29$ при $\alpha = 0^\circ$, определяем, что применение новых типов УПВГТ в рассматриваемых случаях уменьшает THD_I в 2,184 раза.

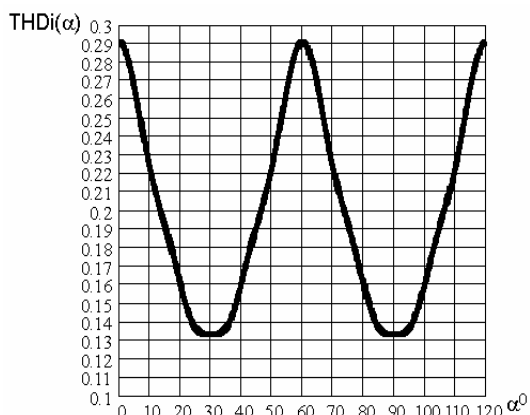


Рис. 7. Зависимость коэффициента гармоник тока от угла сдвига фаз

Зависимости на рис. 7 построены при отсутствии небаланса напряжений сети.

Из рассмотрения кривой на рис. 7 следует, что минимумы коэффициента THD_i наблюдаются при углах α равных 30° и 60° , либо очень близких к ним. То есть, в случае двух мостов, подключаемых на напряжения, сдвинутые на угол $\alpha = 30^\circ$, значения коэффициента THD_i минимальны.

Поэтому один мост нужно подключать напрямую к сети, а второй – через автотрансформатор, обеспечивающий угол сдвига фаз 30° . При этом, в случае отсутствия небаланса напряжений сети, коэффициент гармоник тока снижается до 13%.

ВЫВОДЫ

Разработанные новые фазосдвигающие автотрансформаторные устройства подавления высших гармоник тока могут быть использованы в трехфазных электрических сетях без нулевого провода при работе с 12-пульсными схемами выпрямителей для улучшения качества тока в сетях питания при подавлении гармоник тока с номерами 5, 7, 17, 19 и т.д.

Новая конструкция устройств обеспечивает улучшение массогабаритных и технико-экономических характеристик, по сравнению с существующим аналогом – автотрансформатором типа "гексагон". Задача была решена за счет размещением обмоток только на крайних стрижнях магнитопровода, со свободным центральным стрижнем. В результате существенно улучшается технология изготовления устройства, уменьшается масса магнитной системы и обмоток, улучшаются условия охлаждения, что позволяет увеличить плотность тока в обмотках и магнитную индукцию в магнитопроводе автотрансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы.– М.: Высшая школа, 1967.– 527 с.
 [2] Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power. – NY: IEEE PREss, 1995.– 202 p.
 [3] Пути улучшения качества электроэнергии в корабельных и береговых электрических сетях и электроустановках / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування.– Миколаїв: НУК, 2004.– № 3.– С. 60-70.
 [4] Пентегов И.В., Ларченко Б.Б. Особенности расчета электромагнитных процессов в гексагональных автотрансформаторных устройствах подавления высших

гармоник тока // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2, Енергетика.– Маріуполь: ПДТУ, 2005.– Вип. № 15.– С. 30-35.
 [5] Улучшение качества электроэнергии в электросетях с мощными 12-пульсными выпрямителями с помощью гексагональных автотрансформаторных устройств / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2005.– С. 23-27.
 [6] Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях.– К.: Наукова думка, 1985.– 268 с.
 [7] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий.– М.: Энергоатомиздат, 1994.– 266 с.
 [8] Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов // Техническая электродинамика.– 1999.– № 4.– С. 21-26.
 [9] Пентегов И.В., Волков И.В., Levin М. Схемы подавления высших гармоник тока с расщеплением фаз на три составляющие и методы их расчета // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2002.– С. 71-78.
 [10] Пентегов И.В., Волков И.В., Levin М. Устройства подавления высших гармоник тока // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2002.– С. 13-22.
 [11] Barton T.H., Rectifiers. Cycloconverters and AC Controllers.– Oxford: Clarendon Press, 1994.– 670 p.
 [12] Blakey R.G. Power Electronics in Warships // Power Engineering Journal.– 1993.– April.– P. 65-70.
 [13] Ykema J.I. Protective Devices in Navy shipboard Electrical Power systems // Naval Engineers Journal.– 1988.– May.– P. 12-17.
 [14] Бамдас А.М., Кулинич В.А., Шапиро С.В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз.– М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.– 208 с.
 [15] Улучшение качества электроэнергии в электросетях крупных административных зданий / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2004.– С. 93-98.
 [16] Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока / И.В. Волков, М.Н. Курильчук, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2, Енергетика.– Маріуполь: ПДТУ, 2005.– Вип. № 15.– С. 15-19.
 [17] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power systems // IEEE standard 519.– 1992.
 [18] Жаркин А.Ф., Палачев С.А. Законодательное регулирование эмиссии высших гармоник тока в системах электроснабжения стран Евросоюза // Технічна електродинаміка.– 2005.– № 6.– С. 57-61.
 [19] Patent Us 6,127,743. Universal Harmonic Mitigating system / М. Levin (CA), I. Volkov (UA).– 10.03.2000.
 [20] Заявка А.с. 2006 02375 Україна, МПК H01F27/00. Трифазный автотрансформаторный фазосувний пристрій / И.В. Пентегов, И.В. Волков, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко (Україна (UA)), Міхаель Левін (Канада (CA)); ЧДТУ (UA).– № 19335/3; Заявл. 03.03.2006.
 [21] Рымар С.В. К вопросу оптимизации трехфазных и трехфазно-двухфазных многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов // Електротехніка і електромеханіка.– 2006.– № 1.– С. 47-50.

Поступила 30.08.2006

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Плешков П.Г., к.т.н., доц., Плешков С.П., к.т.н., доц., Котыш А.И., к.т.н., доц., Солдатенко В.П.
Кировоградский национальный технический университет
Украина, 25006, Кировоград, пр-т Университетский 8, КНТУ, кафедра "Электротехнические системы"
тел. (0522) 390-461, e-mail: epp@kdtu.kr.ua

В статті розглянуто і проаналізовано ефективність застосування найбільш перспективних джерел відновлюваної енергії для сільськогосподарських споживачів в контексті нової енергетичної політики України.

В статье рассмотрено и проанализировано эффективность применения наиболее перспективных источников возобновляемой энергии для сельскохозяйственных потребителей в контексте новой энергетической политики Украины.

Для современного сельскохозяйственного производства Украины, согласно Национальной энергетической программы Украины (НЭП), к 2010 году предусмотрено для внедрения энергосберегающих технологий широкое использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) или нетрадиционных: ветровых электростанций, солнечных электрических установок, малых гидроэлектростанций, альтернативные (местные) виды топлива [1].

По плановым объемам ВИЭ могут обеспечить до 10% потребностей первичных энергоносителей, причем учитывается, как ресурсная база в Украине так согласование с соответствующими планами стран Европейского содружества.

Особенно перспективным является комплексное использование традиционных и возобновляемых источников энергии для сельскохозяйственного производства [2].

Комплексный подход к использованию традиционных источников питания (энергосистема, дизельные электрические станции (ДЭС)) и ВИЭ (ветроэлектростанции (ВЭУ), солнечные электрические установки (СЭУ), биоэнергетические установки) дает возможность экономить до 50% первичных энергоносителей и обеспечить сельскохозяйственное производство электрической и тепловой энергией.

Энергия силы ветра имеет ряд специфических особенностей: малую концентрацию, отнесенную к единице воздушного потока, случайный характер изменения скорости ветра. С другой стороны распространение этого источника энергии, широкий диапазон мощностей ВЭУ и их экономическая эффективность позволяет рассматривать его как дополнение к "большой энергетике", особенно в сельскохозяйственном производстве.

Украина имеет мощные ресурсы ветровой энергии: годовой технический ветроэнергетический потенциал равняется 30 млрд. кВт·ч.

В климатических условиях Украины с помощью ветроустановок возможно использование 15 – 19% годового объема энергии ветра, что проходит сквозь пересечение поверхности ветроколеса. Ожидаемые

объемы производства электроэнергии из 1 м² пересечения площади ветроколеса в перспективных регионах составляют 800 – 1000 кВт·ч/м² в год.

При использовании ВЭУ основной проблемой является низкое качество произведенной электроэнергии, которая вызвана неравномерностью ветрового напора как за короткие промежутки времени, так и за длительные (сутки, месяц), что обуславливает необходимость накопления запасов энергии в безветренные периоды [3].

На современных ВЭУ стоимость 1 кВт·ч произведенной электроэнергии для первого года эксплуатации составляет 36,25 коп. и снижается в течение 7 лет до 17,75 коп. [2].

В последнее время в мире вырос интерес к установкам, которые непосредственно превращают солнечную энергию в электрическую посредством фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). В современных ФЭП КПД достигает 15 – 20%, а при специальном включении КПД повышается до 27 – 30% [4].

За последнее время разрыв между стоимостью электроэнергии, полученной от традиционных источников и стоимостью энергии, которая производится солнечными элементами значительно сократился.

СЭУ малой мощности в настоящее время успешно используются в с/х производстве для питания водоподъемных насосов, электроизгородей, ирригационных систем [5].

НЭП Украины предусматривает значительный рост мощностей солнечных электрических установок до 96,5 МВт в 2010 году [1].

Стоимость электроэнергии, полученной от современных СЭУ, с учетом расходов на вспомогательное оборудование, инвестирование и обслуживание, сегодня оценивается в 1,325 – 2,475 грн/кВт·ч. Учитывая сегодняшние стоимостные показатели выработки электроэнергии СЭУ, при их наличии у с/х производителя, в алгоритм модели оптимизации вводится принудительное использование энергетического потенциала СЭУ.

Для стабильного и надежного электроснабжения от ВИЭ, разработан ряд электроэнергетических систем с использованием аккумуляторов электрической и

тепловой энергии. Комплексный подход к использованию возобновляемых источников дает возможность наиболее полной реализации обеспечения с/х производства электрической и тепловой энергией [6].

Что касается совместимого использования в сельскохозяйственном производстве возобновляемых источников энергии, дизельных, гидроэлектрических станций и централизованного электроснабжения, то эта проблема мало исследована.

На рис. 1 приведена комплексная электроэнергетическая система (КЭЭС), разработанная на основе ВЭУ, СЭУ, ДЭС и централизованного электроснабжения с использованием накопителей электрической и тепловой энергии. Выбор состава и структуры оборудования комплекса проводился на основе анализа интенсивности ветровой и солнечной энергии в Кировоградской области, возможности ее использования для энергоснабжения животноводческих комплексов, птицефабрик, малых перерабатывающих предприятий и других потребителей сельскохозяйственного производства.

Условия оптимального использования разных источников энергии определяются совокупностью критериев оптимума и системы ограничений (низкое качество электроэнергии, себестоимость электроэнергии и т.д.).

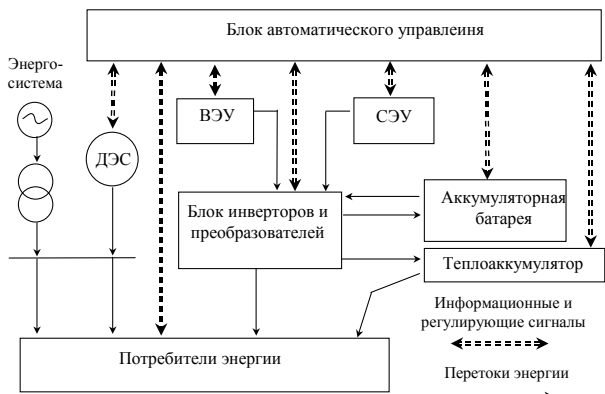


Рис. 1. Схема комплексной электроэнергетической системы с накопителями электрической и тепловой энергии

Выработка тепловой энергии и покрытия тепловых нагрузок животноводческих комплексов осуществляется посредством теплоэнергетических установок и теплоаккумуляторов.

Аккумуляторная батарея и теплоэнергетическая установка аккумулируют главным образом пиковую электроэнергию, которая производится ВЭУ и СЭУ, и которую невозможно подать в общую энергосистему. Автоматическая система управления обеспечивает оптимальные режимы работы блока инвертирования и зарядки (зарядки) аккумуляторов.

Учитывая что, в с/х производстве в качестве резервного источника питания установленные ДЭС, их также можно использовать для выработки электроэнергии в пиковой зоне суток. Расчеты себестоимости выработки электроэнергии ДЭС, выполненные при удельных потерях топлива 260 – 280 гр/кВт·ч и диапазоне мощностей ДЭС от 10 до 100 кВт, дали возможность

определить стоимость 39,2 – 36,4 коп. за 1 кВт·ч [3, 7].

Сравнительные величины стоимости электроэнергии полученной от энергосистемы, ВЭУ, ДЭС приведены на рис. 2.

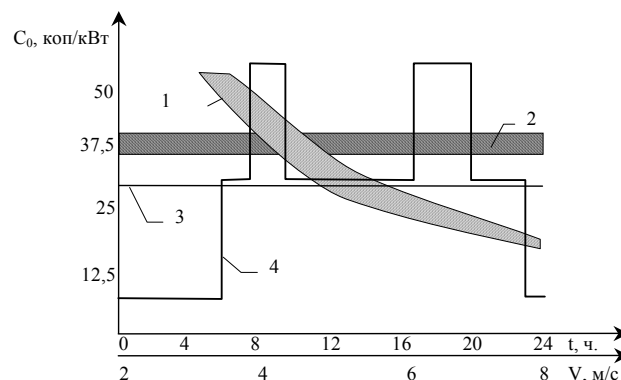


Рис. 2. Сравнительные величины стоимости электроэнергии, полученной от разных источников: 1,2 - стоимость электроэнергии произведенной ВЭУ и ДЭС соответственно; 3,4 - стоимость электроэнергии полученной от энергосистемы по одно и трехставочному тарифу для сельскохозяйственных потребителей

При моделировании энергетических ресурсов КЭЭС, были учтены ветровой и солнечный потенциалы центрального региона Украины [8, 9] и суточные графики выработки электроэнергии ВЭУ, СЭУ.

Компьютерное моделирование модели оптимизации, было проведено для КЭЭС потребителя с максимальной суточной нагрузкой 100 кВт, мощностью СЭУ - 10 кВт, ВЭУ - 20 кВт и ДЭС мощностью 30 кВт.

При параллельной работе ВЭУ, СЭУ, ДЭС и энергосистемы, алгоритм системы управления в зависимости от ветровых условий и солнечной радиации в регионе расположения КЭЭС, а также тарифов, выполняет перераспределение электропотребления с/х производства на протяжении суток от разных источников питания (для летнего периода графики приведены на рис. 3).

Результаты моделирования (рис. 4) показали, что при предложенных параметрах КЭЭС, наибольшая часть электроэнергии поступает от энергосистемы.

Но ВЭУ, СЭУ и ДЭС обеспечивают выработку значительной части электроэнергии в пиковой и полупиковой зонах с высоким тарифным коэффициентом, что в значительной мере уменьшает величину оплаты энергосистеме за употребленную электроэнергию. В летнем сезоне ВЭУ и ДЭС обеспечивают потребности потребителя в электроэнергии в пиковой зоне более чем на 85%, а при дополнительном использовании еще и СЭУ, эта цифра достигает 95% и больше.

Экономическая эффективность комплексной электроэнергетической системы определяется уменьшением оплаты за электроэнергию за счет снижения электропотребления в периоды пиковых и полупиковых тарифных зон суток, оптимизацией выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии.

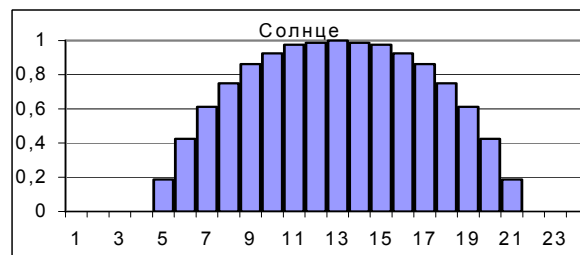
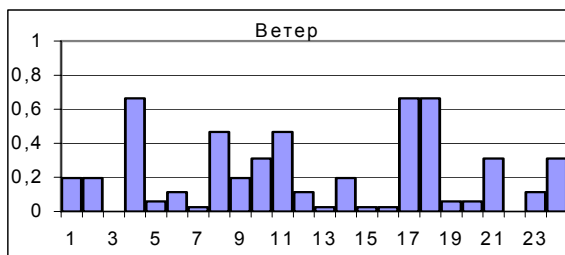


Рис. 3. Суточные графики относительной выработки электроэнергии ВЭУ (а) и СЭУ (б) в условиях центрального региона Украины в летний период

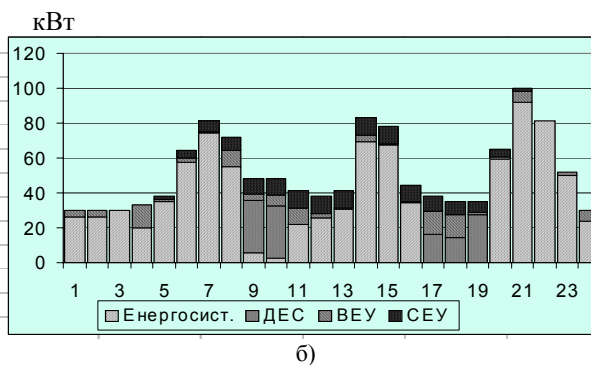
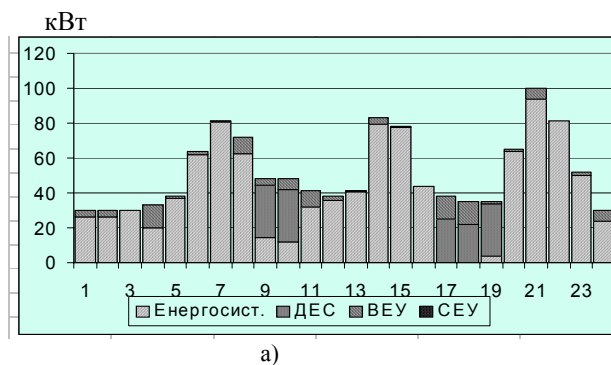


Рис. 4. Графики производства (а) и потребления (б) энергии технологическим процессом сельскохозяйственного производства для летнего периода

Был выполнен расчет экономической эффективности, указанной системы при условиях, что потребитель понес затраты на приобретение ВЭУ, СЭУ и ДЭС, а также при наличии автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). В результате произведенных расчетов суммарная эффективность от использования предложенной системы составляет порядка 45 тыс. грн., а срок окупаемости 4,3 года.

ВЫВОДЫ

– в условиях глобального подорожания и недостатка энергетических ресурсов перспективным и приоритетным есть использование возобновляемых и нетрадиционных источников энергии;

– наиболее оптимальным для энергообеспечения сельскохозяйственного производства является применение комплексных электроэнергетических систем, в состав которых входят как традиционные так и нетрадиционные источники энергии;

– в результате проведенного моделирования работы комплексной электроэнергетической системы в составе ВЭУ, СЭУ, ДЭУ и энергосистемы, определен объем произведенной электроэнергии в зонах пика и полупика, рассчитано уменьшение оплаты за электроэнергию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Національна енергетична програма України. Затверджена Верховною Радою України 15 травня 1996 року №191/96-ВВ.
- [2] Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. №2 / Наук. ред. А.К. Шидловський – К.: Державний комітет з енергозбереження України, НАН України, АТ "Укренергозбереження", 1999. – 100 с.
- [3] Будзко И.А., Левин М.С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
- [4] Алексеев В.В., Чекарев К.В. Солнечная энергетика (перспективы развития) – М. Знание 1991. – 641 с.
- [5] Денисенко Г.И. Возобновляемые источники энергии. – Л.: Выща школа. Изд.-во при КГУ, 1983. – 167 с.
- [6] Денисюк С.П. Принципи побудови автономних систем енергопостачання на базі нетрадиційних джерел енергії // Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії, №2. К.: Державний комітет з енергозбереження України, НАН України, АТ "Укренергозбереження" 1999, С. 39-42.
- [7] Источники энергии. Факты, проблемы, решения // Серия "Информационное издание", Выпуск 3. Гл.ред. В.С. Лаврус. – С-Петербург: НИЦ "Наука и техника" 1997. – 110 с.

Поступила 26.09.2006

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ ВІДНОВЛЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ КОНТАКТОРІВ ЕКГ-8Ж ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Тетерко О.А.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Україна, 49010, Дніпропетровськ, вул. Ак. В.А. Лазаряна, 2, кафедра "Теоретичних основ електротехніки"
тел. (056) 373-15-37, факс (0562) 47-18-66, e-mail: dnuzt@diit.edu.ua

В роботі представлені результати експлуатаційних випробувань електричних контактів контакторів з дугогашенням ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму відновлених напайками з різних матеріалів. Наведені результати вимірювань перехідного опору головних і розривних контактів після експлуатації.

В работе представлены результаты эксплуатационных испытаний электрических контактов контакторов с дугогашением ЭКГ-8Ж электровозов переменного тока восстановленных напайками из разных материалов. Приведены результаты измерений переходного сопротивления главных и разрывных контактов после эксплуатации.

ВСТУП

У більшості електровозів змінного струму, які використовуються на залізницях України, одним з ключових апаратів є електричний головний контролер ЕКГ-8Ж. Він призначений для переключення виводів вторинної обмотки трансформатора з метою регулювання напруги на тягових електродвигунах.

Контролер складається з 34-ох контакторів, чотири з яких з дугогашенням і тридцять без. Специфіка роботи апарату полягає в тому, що контактори без дугогашення перемикаються без струмового навантаження. Таким чином в найбільш важкому режимі працюють чотири контактора з дугогашенням, оскільки вони розмикають силове коло і замикають його.

Контактор з дугогашенням складається з двох пар контактів: головних і розривних. Головні контакти призначені для пропускання струму, а розривні – для розриву дуги. Напайки на головні контакти виконуються з композиції срібла і оксиду кадмію (матеріал СОК-15), а на розривні контакти з мідно-вольфрамового матеріалу з доданками нікелю (матеріал МВ-70). Кінематична схема контактора влаштована таким чином, що при розмиканні першими розмикаються головні контакти, а при замиканні навпаки: першими замикаються розривні контакти, а за ними головні.

Під час експлуатації контакти піддаються електричному та механічному зносу. Притому розривні контакти зношуються переважно під дією електричної дуги, а головні піддаються механічному зносу.

Знос під дією електричної дуги, або дугова ерозія, полягає в тому, що дуга викликає випаровування електродів [1]. Частина цього металу знову конденсується на електродах, частина викидається в зовнішнє середовище. Метал переноситься з одного електрода на інший, чим викликає появу раковин на робочій поверхні контакту і порушує її форму. На апаратах змінного струму, якими є контактори ЕКГ-8Ж, явище дугового переносу матеріалу менш явно виражене, ніж при розмиканні кіл постійного струму, але порушення робочої поверхні суттєво погіршує роботу контакту.

Механічне зношування зумовлене тим, що середній тиск в металічних контактах такого ж порядку,

що й твердість, і звичайно, принаймні в окремих ділянках тиск створює пластичні деформації. В контактах часто мають місце проковзування, що є умовою для фрикційного зносу. Це явище створює поверхні зачищеного металу, які в момент виникнення схильні до хімічних реакцій, таких, як окислення або каталітична дія. Змінна напруга на одній поверхні, наприклад, від великої кількості ударів може призвести до послаблення та розщеплення зерен, які не піддалися би одному чи декільком ударам.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ

З метою дослідження процесу зношування напайок на контакти, в умовах Львівської залізниці було проведено натурні випробування. Два електровози серії ВЛ-80^Т локомотивного депо "Львів-Захід" було обладнано експериментальними напайками на контакти контакторів з дугогашенням ЕКГ-8Ж. Виробниками цих матеріалів є українські та російські фірми і підприємства.

В якості напайок на головні контакти було використано такі матеріали:

- матеріал КМК-А10-М, виробництва ДП "Аргентум", м. Львів;
- композиційний матеріал (псевдосплав) МДК, виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця;
- матеріал КМК-А10-М, виробництва ТзОВ "Союз Інвест", м. Луганськ;
- композиційний матеріал (псевдосплав) ДИСКОМ С16104, виробництва ТзОВ ІНТЦ "ДИСКОМ", м. Чебоксари.

Для розривних контактів вибрали такі матеріали:

- матеріал КМК-Б25, що виготовлений двома способами, виробництва ПП "Власов", м. Запоріжжя;
- композиційний матеріал (псевдосплав) МДК, виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця;
- матеріал КМК-Б25, виробництва "Електроконтакт", м. Кінешма, Росія (постачальник ТзОВ "СоюзІнвест", м. Луганськ);
- матеріал МВ-70, виробництва "Інтер-Контакт-Пріор", м. Київ;
- композиційний матеріал Дискон С16104, виробництва ТзОВ ІНТЦ "Дискон", м. Чебоксари, Росія.

Деякі властивості та структура цих контактних матеріалів розглянута в [2].

Одним з основних критеріїв за якими оцінюють придатність напайок для подальшої експлуатації є її товщина. Для того, щоб прослідкувати, як змінюється товщина напайки в залежності від пробігу електровоза, на кожному поточному ремонті замірялись товщини напайок. Реалізації зносу різних контактів одного з досліджуваних матеріалів наведено на рис. 1.

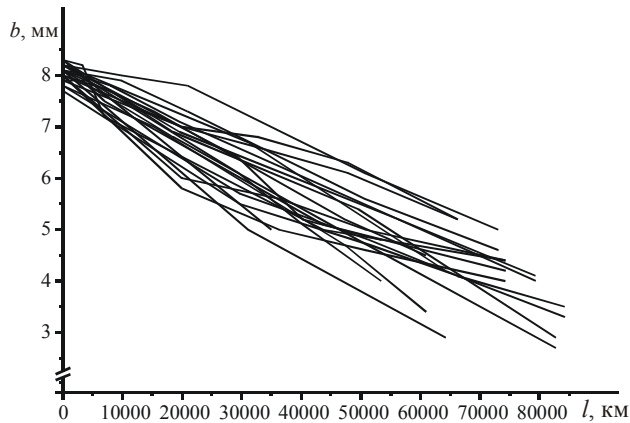


Рис. 1. Залежність товщин різних напайок з одного матеріалу від пробігу електровоза

Можна побачити, що поведінка реалізації піддається сильним варіаціям. Все це викликано різноманітним факторів, які впливають на процеси зносу. Серед них такі, як вплив зовнішнього середовища, тип матеріалу, перехідний опір контактного з'єднання, недоліки в роботі самого апарату і т.д. Ці фактори впливають на стан контактних поверхонь, які в свою чергу впливають на умови проходження струму через контакти. На порехні контакту завжди є нерівності, які виникають внаслідок обробки, зношування, пластичних деформацій. Крім того, поверхні контактів покриті плівками окислів та забруднювачів, які виникають як під дією кисню і озону, так і при випадковому попаданні різноманітних забруднювачів. Товщини таких плівок залежать від багатьох факторів, але звичайно знаходяться в межах 10^{-6} – 10^{-5} мм. Апарат цілому працює в умовах підвищених вібрацій, які негативно впливають на кінематичну схему, від якої залежить послідовність і правильність процесів замикання і розмикання.

Для того, щоб порівняти поведінку напайок з різного матеріалу було визначено залежності математичного очікування товщини напайки від пробігу електровоза (рис. 2). Нумерація матеріалів на рисунку така: 1 – МДК; 2 – "Диском"; 3 – ПП "Власов" з просочуванням; 4 – "Інтер-Контакт Пріор"; 5 – ПП "Власов" без просочування; 6 – "Союз Інвест".

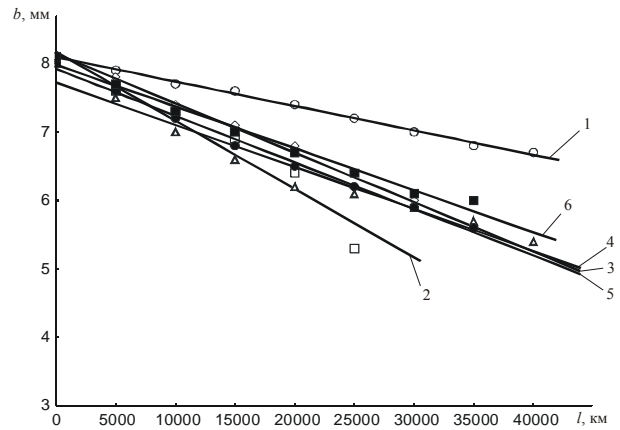


Рис. 2. Залежність математичного очікування товщини напайки від пробігу електровоза для різних матеріалів контактів

В процесі експлуатації контакторів з дослідними напайками були виявлені характерні ушкодження для деяких матеріалів. Спостерігаючи за процесами зношування напайок на розривних контактах було помічено, що найменшою зносостійкістю володіє композиційний матеріал виробництва ТзОВ ІНТЦ "Диском" (див. рис. 2). Знос напайок супроводжувався значним розбризкуванням металу, серйозними порушеннями профілю робочої поверхні та сильними оплавленнями під дією електричної дуги (див. рис. 3а). В середньому після 20-25 тис. км. пробігу електровоза напайки з цього матеріалу були не придатні до подальшої експлуатації. Отже, матеріал виробництва ТзОВ ІНТЦ "Диском" виявився не придатним для використання в якості напайок на розривні контакти.

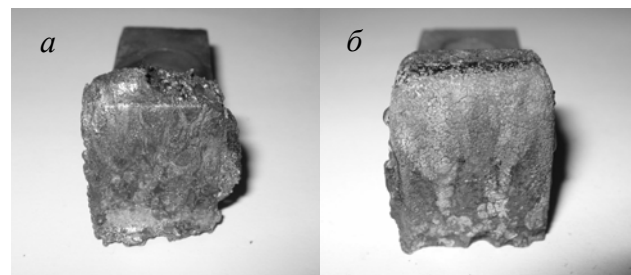


Рис. 3. Контакти після експлуатації

В свою чергу найбільш зносостійким виявився композиційний матеріал МДК, виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця (див. рис. 2). Але після певного часу в експлуатації ($\approx 50\ 000$ км. пробігу) помічаються відшарування матеріалу на контактній поверхні (див. рис. 4). Одним з недоліків є також те, що напайки з композиційного матеріалу МДК випускаються товщиною 3 мм, а, як відомо, початкова товщина напайки має бути близько 8 мм.

При експлуатації матеріалу МВ-70, виробництва "Інтер-Контакт-Пріор", м. Київ було виявлено, що найрозповсюдженішим пошкодженням було утворення раковин (див. рис. 3б). В деяких випадках їх глибина сягала 2-2,5 мм. Щоб відновити профіль робочої поверхні необхідно на поточних ремонтах чи технічних оглядах знімати шар металу, що суттєво зменшує термін експлуатації цих напайок.

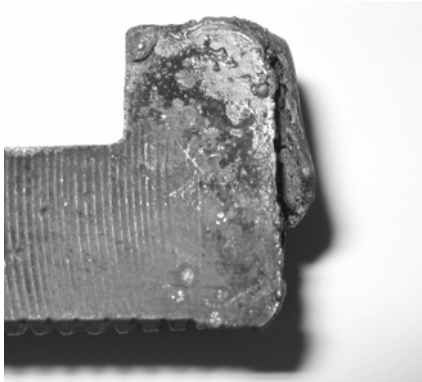


Рис. 4. Відшарування металу на напайці контакту

Матеріали виробництва інших підприємств не мали явно виражених характерних дефектів, які виникли під час експлуатації. Їх робота супроводжувалась виникненням тріщин, раковин, оплавлень, порушенням робочого профілю, яке викликалось переважно неправильним розташуванням рухомого контакту відносно нерухомого.

Незручністю при впровадженні матеріалу КМК-Б25, виробництва "Електроконтакт", м. Кінешма є те, що напайки виготовлені для експлуатації з іншої форми контактотримачами ніж ті, що використовуються на залізницях України. Тому потребують попередньої обробки перед пайкою.

Головні контакти контакторів з дугогашенням ЕКГ-8Ж знаходяться в експлуатації значно довше, ніж розривні. В процесі їх роботи були помічені невеликі оплавлення на поверхні контакту, причому оплавлення чітко окреслюють саме ті зони, де протікає струм (див. рис. 5).



Рис. 5. Напайки на головні контакти (нерухомий – зліва; рухомий – справа)

Суттєвих візуальних відмінностей в роботі головних контактів з напайками із різних матеріалів не було виявлено.

На одному з контакторів, обладнаних напайками з композиційного матеріалу МДК було виявлено відшарування. А також один контактор з напайками виробництва ТЗОВ ІНТЦ "Диском" під час роботи суттєво перегрівався і був замінений на поточному ремонті.

ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ КОНТАКТІВ

Основними причинами відмов в роботі контакту є: руйнування контактної поверхні; через виникнення на ній виступів та впадин; приварювання контактних електродів один до одного; обгоряння непровідних плівок та окислів; велике значення перехідного опору.

Явище виникнення перехідного опору викликано тим, що поверхня матеріалу ніколи не буває досконало рівною, і якщо контакти ідеально тверді, то вони торкаються не більше, ніж в трьох місцях. Як правило, під дією тиску в матеріалі контактів завжди виникає пластична або пружна деформація. Тому початкові точки дотику перетворюються в невеликі контактні поверхні і з'являються нові контактні плями. Сума всіх цих поверхонь і складає дійсну контактну поверхню, що сприймає натисне зусилля і яка набагато менше візуальної контактної поверхні. Так контактна поверхня, що фактично сприймає зусилля, може бути в сотні або навіть тисячі разів менше.

Поверхня, що сприймає зусилля, складається з наступних ділянок:

- ділянки з металічним контактом, в якому струм протікає без помітного перехідного опору, як це має місце між різними кристалітами в компактному металі;
- ділянки з квазіметалічним контактом – ділянки, яка покрита тонкою плівкою, яка легко пропускає струм завдяки тунельному ефекту, який не залежить від провідності плівки;
- ділянки, покритої мономолекулярними плівками, які фактично грають роль ізоляторів.

Утворення контактних плям і викликає стягування струму в ці зони і виникнення при цьому перехідного опору, який суттєво впливає на роботу контакту.

Методом вольтметра-амперметра було виміряно перехідний опір для різних матеріалів напайок окремо для головних і окремо для розривних контактів після їх експлуатації в реальних умовах. Результати наведено на рис. 6, 7.

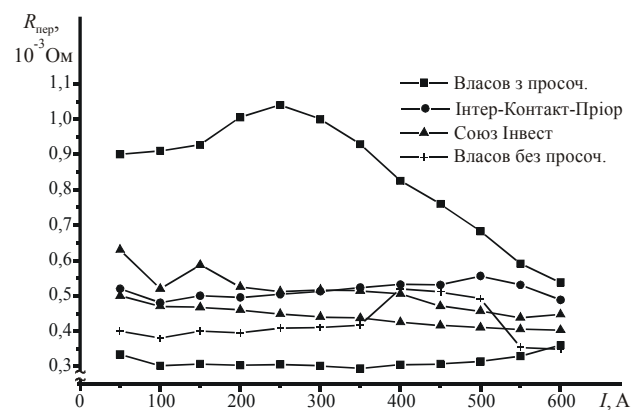


Рис. 6. Залежність перехідного опору розривних контактів від струму

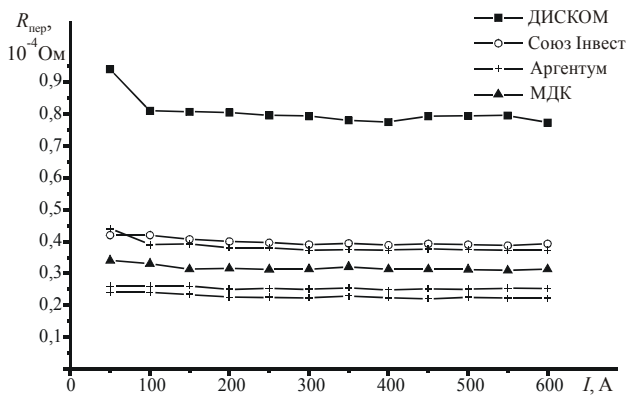


Рис. 7. Залежність перехідного опору головних контактів від струму

З наведених залежностей можна зробити висновок, що перехідний опір головних контактів контакторів з дугогашенням ЕКГ-8Ж поводить себе більш стабільно при збільшенні струму через контакти. В свою чергу перехідний опір розривних контактів, контактна поверхня яких піддається впливу електричної дуги, досить не стабільний при зростанні струму. Крім того величина перехідного опору головних контактів в середньому на порядок нижча, ніж у розривних. Це не є грубим порушенням в роботі контактора, оскільки основним призначенням розривних контактів є розрив електричної дуги, яка виникає при комутаціях силових кіл електровозів змінного струму.

ВИСНОВКИ

На основі викладених вище результатів досліджень можна зробити наступні висновки:

- композиційний матеріал на основі порошкової міді ДИСКОМ електротехнічного призначення, виробництва ТзОВ ІНТЦ "Диском" не придатний для використання в якості напайок на розривні контакти контакторів з дугогашенням ЕКГ-8Ж, через малу зносостійкість і руйнацію під дією електричної дуги;

- композиційний матеріал на основі молібдену і міді МДК, виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця володіє високою зносостійкістю, поверхня контакту з цього матеріалу не піддається значним руйнаціям під впливом електричної дуги, але контактна поверхня схильна до утворення відшарування матеріалу. Також необхідно запровадити виробництво напайок з цього матеріалу більшої товщини. Матеріал потребує додаткового дослідження причин виникнення відшарувань;

- при експлуатації напайок на розривні контакти з інших вибраних матеріалів не було виявлено суттєвих відмінностей в термінах їх функціонування, отже при виборі серед цих матеріалів слід керуватись їх собівартістю;

- при експлуатації напайок на головні контакти з матеріалів МДК, виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця і ДИСКОМ С16104, виробництва ТзОВ ІНТЦ "ДИСКОМ", м. Чебоксари не було виявлено помітних порушень в їх роботі. Перехідний опір контактів з матеріалу МДК суттєво не відрізняється від напайок із срібломісткого матеріалу. Отже, можна рекомендувати ці матеріали для заміни відносно дорогого мате-

ріалу СОК-15, який складається на 85% із срібла і на 15% з оксиду кадмія;

- перехідний опір головних контактів після експлуатації на порядок менший і більш стабільний при збільшенні струму через контакти, чим опір на розривних контактах.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Хольм Р. Электрические контакты. – М: Из-во иностранной литературы, 1961. – 464 с.
- [2] Баб'як М.О., Тетерко О.А., Мінакова Р.В. Дослідження структури та деяких властивостей контактних матеріалів контакторів електровозів змінного струму. // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – №1. – С. 93-96.
- [3] Усов В.В. Металловедение электрических контактов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 208 с.
- [4] Тягові електричні апарати контактні: / Л.В. Дубинець, В.Т. Вислогузов, А.І. Кийко та ін. / Під заг. ред. О.І. Момота. – Д.: Нова ідеологія, 2002. – 104 с.
- [5] Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М: Из-во "Советское радио", 1966. – 168 с.
- [6] Захарченко Д.Д. Тяговые электрические аппараты. – М.: Транспорт, 1991. – 247 с.
- [7] Таев И.С. Электрические аппараты автоматики и управления. – М.: Высш.шк., 1975. – 223 с.
- [8] Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
- [9] Баталов Н.М., Петров Б.П. Тяговые электрические аппараты. – М.: Энергия, 1969. – 238 с.

Надійшла 19.10.2006

ДВУМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБШИВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ МОЛНИИ

Баранов М.И., д.т.н., Носенко М.А.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

У наближенні двомірного температурного поля приведені результати уточненого аналітичного розрахунку перевищення температури у зоні прив'язки сильноточного іскрового каналу блискавки на плоскій поверхні металевої обшивці літального апарату (ЛА). Показано, що за рахунок електротеплової дії імпульсна складова повного струму блискавки часової форми 2/50 мкс з амплітудою 200 кА та тривалістю у 500 мкс викликає лише приповерхнє локальне руйнування алюмінієвої стінки обшивки ЛА, а його постійна складова амплітудою 200 А та тривалістю у 1с може забезпечувати її проплавлення на значну глибину.

В приближении двумерного температурного поля приведены результаты уточненного аналитического расчета превышения температуры в зоне привязки сильноточного искрового канала молнии на плоской поверхности металлической обшивки летательного аппарата (ЛА). Показано, что за счет электротеплового действия импульсная составляющая полного тока молнии временной формы 2/50 мкс с амплитудой 200 кА и длительностью в 500 мкс вызывает лишь приповерхностное локальное разрушение алюминиевой стенки обшивки ЛА, а его постоянная составляющая амплитудой 200 А и длительностью в 1 с может обеспечивать ее проплавление на значительную глубину.

ВВЕДЕНИЕ

Прикладная проблема обеспечения безопасности полетов в воздушном пространстве летательных аппаратов (ЛА) различного типа и назначения имела как раньше, так имеет и сейчас во всем мире повышенную актуальность и большую практическую значимость. Из обширной мировой практики эксплуатации ЛА известно, что прямой удар молнии (ПУМ) в ЛА обычно приводит к тяжелой аварии с возможными катастрофическими последствиями для авиационной и ракетно-космической техники [1-3]. Известно и то, что каждый эксплуатируемый самолет среднестатистически один раз в год подвергается прямому воздействию грозового разряда (молнии) [4]. Основными поражающими факторами молнии, на наш взгляд, являются такие: во-первых, мощные импульсные электромагнитные поля от далекого или близкого сильноточного искрового грозового разряда, вызывающие появление в бортовых электрических цепях ЛА больших электрических наводок (индуцированных высокочастотных напряжений и токов) [5]; во-вторых, большие переносимые электрические заряды (в сотни кулон) и соответственно большие импульсные токи микро – и миллисекундного временного диапазона (в сотни килоампер) в канале длинного искрового разряда молнии, обуславливающие при ПУМ протекание в зоне привязки ее сильноточного канала на обшивке ЛА и зоне растекания по ней и наружным (внутренним) проводникам тока молнии интенсивных электротепловых процессов [6, 7]; в-третьих, сверхвысокие импульсные электрические напряжения (амплитудой свыше 1МВ), негативно воздействующие при ПУМ на конструкционные металлические (изоляционные) материалы и отдельные элементы планера ЛА; в-четвертых, большие ударные электродинамические силы и соответственно механические напряжения, действующие на металлическую (композиционную) обшивку ЛА в зоне привязки на ней сильноточного канала молнии и стремящиеся нарушить ее герметичность [8]. Данные электромагнитные факторы в своей совокупности представляют

серьезную угрозу для любого ЛА, оказавшегося в поле или на земле в зоне действия такого глобального природного электрофизического явления как молния.

Из известных работ, посвященных приближенным расчетам теплового действия сильноточного канала молнии на металлическую обшивку ЛА, следует указать [9-12]. Эти исследования содержат, в основном, одномерные математические модели температурного поля в зоне прямого электротеплового действия сильноточного канала молнии на плоскую стенку металлической обшивки ЛА, которые лишь в грубом приближении отражают сложные дву- и трехмерные нестационарные электротермические процессы, протекающие в указанной обшивке ЛА при ПУМ.

Целью статьи является разработка уточненной математической модели электротепловых процессов в круговой зоне действия ПУМ на металлическую обшивку ЛА, предназначенной для приближенного аналитического расчета двумерного температурного поля стенки металлической обшивки ЛА в области опорной зоны сильноточного канала молнии как на временном участке с относительно короткой нарастающей токовой частью грозового разряда и максимальным значением импульсной составляющей полного тока молнии, так и на временном участке с относительно длинной спадающей токовой частью грозового разряда и минимальным значением постоянной составляющей полного тока молнии.

1. ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим в цилиндрической системе координат электротепловое воздействие сильноточного искрового канала 1 грозового разряда на стенку 2 металлической обшивки ЛА толщиной h , размещенной в воздушном пространстве (рис. 1). Пусть характеристики воздушной среды соответствуют нормальным атмосферным условиям (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а влажность воздуха и его температура соответственно – 80% и 20 °С). В первом приближении примем, что искровой канал молнии представляет

собой сплошной проводящий цилиндр радиусом r_0 , состоящий из низкотемпературной плазмы [13]. В связи с тем, что в реальных условиях радиус кривизны металлической обшивки ЛА значительно превышает толщину h ее стенки, то поверхность кругового контакта сильноточного искрового канала молнии с наружной поверхностью обшивки можно считать близкой к плоской поверхности [9-12].

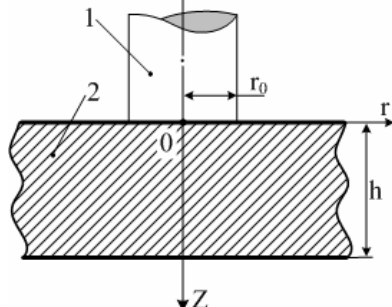


Рис. 1. Упрощенная расчетная модель стенки металлической обшивки ЛА при воздействии на нее ПУМ

Считаем, что импульсное электротепловое действие сильноточного цилиндрического канала молнии на металлическую обшивку ЛА аналогично действию во времени t непрерывного поверхностного точечного источника тепла [12]. Решение для такого теплового источника временного действия можно известным путем получить с помощью фундаментального аналитического решения для случая мгновенного точечного источника тепла в виде диска радиусом r_0 , приложенного в плоскости $z=0$ в момент времени $t=0$ к наружной поверхности обшивки в опорной круговой зоне привязки канала искрового разряда [14, 15]. При этом неравномерностью распределения плотности электрического тока молнии i_M по поперечному сечению рассматриваемого искрового канала разряда и соответственно неравномерностью плотности импульсного теплового потока в круговой опорной зоне искрового канала молнии радиусом r_0 , поступающего для $0 \leq t \leq t_0$ в металлическую обшивку ЛА, пренебрегаем. Кроме того, согласно известным экспериментальным исследованиям приэлектродных областей дугового разряда в воздухе в них (этих областях) опорная зона разряда как бы "следит" за изменением тока [16]. В этой связи средняя плотность тока разряда, равная отношению полного тока разряда в данный момент времени t к площади круговой опорной зоны канала разряда на поверхности электрода в этот же временной момент, практически не изменяется во времени t . Поэтому неизменной остается и средняя плотность q_0 поверхностного теплового потока, воздействующего со стороны плазменного канала разряда на металлический электрод (например, на анод двухэлектродной системы). Это обстоятельство для нашего случая позволяет при расчетной оценке действующей для $z=0$ на стенку металлической обшивки ЛА плотности $q(t)$ импульсного поверхностного теплового потока от сильноточного искрового канала молнии обоснованно использовать в динамике один из фиксированных моментов времени t в изменении импульса тока молнии i_M (например, время t_m , соответствующее его амплитуде I_m) и соответственно

понятие усредненной плотности q_0 поверхностного теплового потока, импульсно воздействующего на стенку обшивки ЛА в период времени $0 \leq t \leq t_0$. Учитывая быстропротекающий импульсный характер локального электротеплового нагрева (в течение не более 1000мс) стенки металлической обшивки ЛА за счет выделяющегося в ней "джоулево" тепла, влиянием теплоотдачи в окружающее стенку обшивку воздушное пространство на протекающие в ней в зоне привязки сильноточного искрового канала молнии электротепловые процессы пренебрегаем.

Принимая во внимание приближенный характер выполняемого нами аналитического расчета распределения двумерного температурного поля в стенке металлической обшивки ЛА, испытывающей действие ПУМ, изменениями коэффициента теплопроводности λ_0 (Дж/м·с·°С), удельной объемной теплоемкости c_0 (Дж/м³·°С) и теплового коэффициента удельной электропроводности β_0 (м³/Дж) материала исследуемой обшивки, вызванными его импульсным электротепловым нагревом практически в адиабатическом режиме, можно также пренебречь. Исследование импульсного нагрева рассматриваемой стенки обшивки ЛА за счет кратковременного ввода в нее теплового потока от сильноточного канала молнии не будем ограничивать для данной задачи температурой испарения $T_{И}$ ее материала. На этом этапе исследований в рамках предлагаемой уточненной двумерной математической модели электротепловых процессов в металлической обшивке ЛА рассмотрим результаты воздействия на плоскую стенку металлической обшивки ЛА вначале импульсной составляющей с временными параметрами 2/50 мкс (ее амплитуда равна 200 кА, а длительность – $t_0 = 500$ мкс), а затем постоянной составляющей амплитудой 200 А и длительностью в $t_0 = 1000$ мс полного тока молнии i_M [1, 3].

Таким образом, требуется в приближенном виде с учетом принятых допущений получить аналитические соотношения, описывающие двумерное температурное поле в зоне привязки сильноточного канала молнии на плоской металлической обшивке ЛА, и с помощью результатов известных экспериментальных лабораторных исследований по определению последствий имитационного воздействия сильноточного грозового искрового разряда на опытные образцы металлической обшивки ЛА выполнить оценку работоспособности (достоверности) этих соотношений.

2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчет двумерного температурного поля стенки обшивки ЛА. На основании известного из теории теплопроводности твердых тел фундаментального решения применительно к мгновенному точечному источнику тепла дисковой формы, воздействующему на плоскую наружную поверхность полубесконечного (массивного в электромагнитном и тепловом смысле) тела, для пространственно-временного изменения превышения температуры $\theta(r, z, t)$ материала рассматриваемой плоской стенки металлической обшивки ЛА конечной толщиной h в круговой зоне действия на нее во времени t поверхностного теплового потока плотностью $q(t)$ от плазменного сильноточного канала

молнии можно записать следующее приближенное аналитическое выражение [15, 17]:

$$\theta(r, z, t) = \frac{r_0}{(\pi\lambda_0 c_0)^{1/2}} \int_0^{t_0} q(\tau) F(r, z, t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\theta(r, z, t) = \theta_t - \theta_0$; θ_t – текущая температура материала стенки обшивки ЛА; θ_0 – температура окружающего стенку обшивки ЛА воздуха, равная в нашем случае $\theta_0 = 20$ °С; r – радиальная координата, направленная от оси канала молнии вдоль стенки обшивки ЛА; z – продольная координата, направленная от очага теплового воздействия молнии внутрь стенки обшивки ЛА; $q(\tau)$ – плотность воздействующего на металлическую стенку обшивки ЛА теплового потока, вызванного плазменным каналом молнии ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

$$F(r, z, t - \tau) = \exp[-z^2 c_0 / 4\lambda_0(t - \tau)] \times (t - \tau)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-\lambda_0(t - \tau)v^2 / c_0] J_0(vr) J_1(vr_0) dv;$$

τ, v – вспомогательные переменные; t – текущее время; t_0 – длительность протекания импульсной (постоянной) составляющей полного тока i_M молнии; J_0, J_1 – соответственно функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

В принятой постановке решаемой задачи для плотности импульсного поверхностного теплового потока $q(\tau)|_{\tau=t} = q_0$, имеющего форму диска наружным радиусом r_0 и воздействующего на стенку обшивки ЛА в зоне с координатами $z = 0$ и $0 \leq r \leq r_0$, в общем виде можно записать нижеследующее выражение:

$$q(t) = i_M U_0 (\pi r_0^2)^{-1}, \quad (2)$$

где i_M – полный ток молнии; U_0 – приэлектродное (канальное) падение электрического напряжения в опорной зоне искрового сильноточного канала молнии.

Из теории сильноточной искры следует, что величина напряжения U_0 представляет собой разность электрических потенциалов на границе раздела "плазменный канал молнии – металлический электрод", которая для различных амплитудно-временных параметров (АВП) тока искры (молнии) и токопроводящих материалов электродов (обшивки ЛА) численно составляет значение, примерно равное $U_0 = 10$ В [1, 3, 18]. Тогда выражение (2) для плотности теплового потока $q(t)$, являющейся одной из основных теплофизических характеристик, определяющих численное значение превышения температуры $\theta(r, z, t)$ в исследуемой стенке металлической обшивки ЛА, принимает такой окончательный и упрощенный вид:

$$q(t) = 10 i_M (\pi r_0^2)^{-1}. \quad (3)$$

Важной с практической и интересной с методической стороны характеристикой распределения температурного поля в стенке исследуемой обшивки ЛА является глубина проникновения Δ_T в нее теплового потока [19], на которой превышение температуры $\theta(r, z, t)$ уменьшается в e раз. Из (1) аналогично [12] можно также получить приближенное выражение для глубины проникновения Δ_T в металлическую стенку обшивки ЛА поверхностного теплового потока от

источника, равномерно распределенного по опорной зоне плазменного канала молнии и действующего на стенку обшивки ЛА в течение времени t_0 :

$$\Delta_T = 2(\lambda_0 t_0 / c_0)^{1/2}. \quad (4)$$

Соотношение (4) полностью соответствует ранее известным в электрофизике [12, 17, 19] и лазерной (электронно-лазерной) технике [20] формулам для вычисления величины Δ_T . В дальнейшем при исследовании распределения двумерного температурного поля в плоской стенке обшивки ЛА ограничимся рассмотрением в ней максимальных уровней превышения температуры $\theta(r, z, t)$, соответствующих наибольшим значениям плотности $q(t) = q_0$ воздействующего теплового потока и амплитудным значениям импульсной (постоянной) составляющей тока молнии. **Воздействие на стенку обшивки ЛА импульсной составляющей тока молнии.** В данном случае для импульсной аperiodической составляющей полного тока i_M молнии, характеризующейся временной формой 2/50 мкс, амплитудой I_m и значением длительности ее протекания $t_0 = 500$ мкс, имеем [2, 3]:

$$i_M = \beta_m I_m \cdot [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (5)$$

где $I_m = 200$ кА – нормированная требованиями межгосударственного ГОСТ 30585-98 [21] амплитуда импульсной составляющей полного тока сильноточного грозового искрового разряда (молнии);

$$\alpha_1 \approx 0,76 / \tau_{\text{и}} = 1,529 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1};$$

$$\alpha_2 \approx 2,37 / \tau_{\text{ф}} = 1,188 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$\tau_{\text{ф}} = 2 \cdot 10^{-6}$ с – длительность фронта импульсной составляющей полного тока молнии между уровнями 0,1-0,9 от его амплитуды; $\tau_{\text{и}} = 50 \cdot 10^{-6}$ с – длительность импульсной составляющей полного тока молнии на уровне 0,5 от токовой амплитуды I_m ; $\beta_m = [(\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)}]^{-1} = 1,072$ – нормирующий коэффициент [2, 3].

Для определения на стадии протекания импульсной составляющей полного тока i_M молнии максимального значения радиуса плазменного канала сильноточного искрового разряда, соответствующего токовой амплитуде I_m , и соответственно радиуса r_0 (м) его круглой опорной зоны на плоской стенке металлической обшивки ЛА воспользуемся известной формулой Брагинского, которая при принятых допущениях имеет такой вид [2, 18]:

$$r_0 = 0,093(I_m)^{1/3}(t_m)^{1/2}, \quad (6)$$

где $t_m = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)$ – время (с), соответствующее амплитуде I_m (А) импульсной составляющей полного тока молнии (при указанных выше коэффициентах ее формы α_1 и α_2 величина t_m численно составляет значение, равное примерно $t_m = 3,71$ мкс).

В результате для рассматриваемого случая, когда $q(t) = q_0$, после подстановки выражений (3) – (6) в (1) для максимального превышения температуры $\theta(r, z, t)$ материала стенки металлической обшивки ЛА на стадии воздействия на нее импульсной составляющей полного тока i_M молнии за время длительности

ности t_0 ее протекания, примерно численно равной $t_0=500$ мкс [1, 3], в безразмерном виде получаем:

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \left[\frac{10I_m c_0 \beta_0}{\pi^{3/2} \lambda_0 r_0} \right] \cdot \int_0^{t_0^*} F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) d\tau^*, \quad (7)$$

где $F(r^*, z^*, t_0^* - \tau^*) = \exp[-(z^*)^2 / 4(t_0^* - \tau^*)] \times$

$$\times (t_0^* - \tau^*)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-(t_0^* - \tau^*)v^2] J_0(vr^*) J_1(v) dv;$$

$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \theta(r^*, z^*, t_0^*) / \theta_b$; $\theta_b = (c_0 \beta_0)^{-1}$ – базисная температура; $r^* = r / r_0$; $z^* = z / r_0$; $t_0^* = t_0 / t_b$; $\tau^* = \tau / t_b$; $t_b = c_0 r_0^2 / \lambda_0$ – базисное время.

На рис. 2 приведена безразмерная графическая зависимость $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$, построенная по (7) в случае воздействия импульсной составляющей полного тока i_M молнии на алюминиевую стенку обшивки ЛА при следующих исходных расчетных данных для рассматриваемой электротепловой задачи [3, 12, 22]: $I_m=200$ кА; $t_m=3,71$ мкс; $t_0=500$ мкс; $r_0=10,48$ мм; $h=10$ мм; $c_0=2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С; $\beta_0=2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; $\theta_b=173$ °С; $\lambda_0=240$ Дж/м·с·°С. Из данных рис.2 видно, что за время действия t_0 на алюминиевую стенку обшивки ЛА импульсной составляющей полного тока i_M молнии с принятыми нами АВП максимальное значение превышения температуры ее материала в эпицентре электротермического воздействия ($z^*=0$; $r^*=0$) составляет около $\theta(0,0,t_0)=34,7 \cdot \theta_b=6003$ °С. Как известно, такого превышения температуры за время электротеплового воздействия $t_0=500$ мкс под опорной зоной плазменного канала молнии вполне достаточно не только для расплавления, но и испарения поверхностного слоя алюминиевой стенки обшивки ЛА. Заметим, что температура плавления T_{II} материала исследуемой обшивки ЛА равна $T_{II}=658$ °С, а температура его испарения составляет $T_{III}=2447$ °С [7, 23]. Причем, в этом случае (кривая 1 на рис. 2) поверхностная температура остается практически одинаковой по радиусу опорной зоны канала сильнооточного искрового разряда и лишь у ее края ($r^*=1$) она испытывает резкое радиальное затухание.

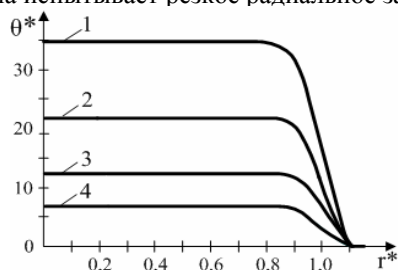


Рис. 2. Пространственное изменение безразмерного превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в стенке алюминиевой обшивки ЛА на стадии воздействия на нее импульсной составляющей полного тока i_M молнии ($I_m=200$ кА; $t_0=500$ мкс; $r_0=10,48$ мм; $h=10$ мм; для кривой 1- $z^*=0$; 2- $z^*=0,01$; 3- $z^*=0,02$; 4- $z^*=0,03$)

Такое изменение превышения поверхностной температуры $\theta^*(r^*, 0, t_0^*)$ соответствует известным расчетным и экспериментальным результатам радиального распределения температуры в сильнооточном канале воздушного искрового разряда микросекундной длительности [24]. С увеличением глубины слоев материала стенки наблюдается экспоненциальный спад превышения рассматриваемой температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ с сохранением указанной выше закономерности ее радиального изменения (кривые 2 – 4 на рис. 2).

Сравнение расчетных по формуле (7) и ранее полученных опытных данных для превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ [7] применительно к воздействию на плоскую дуралюминовую стенку обшивки ЛА ($h=10$ мм; $c_0=2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С; $\beta_0=2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; $\theta_b=173$ °С; $\lambda_0=240$ Дж/м·с·°С) импульсной составляющей тока сильнооточного канала воздушного искрового разряда длиной, примерно равной 50 мм ($I_m=100$ кА; $t_m=4,375$ мкс; $t_0=500$ мкс; $r_0=9,03$ мм), полученного с помощью высоковольтной моделирующей установки, свидетельствует об их хорошей корреляции. Так, для приведенных выше исходных данных при $z^*=0,04$ ($z=0,36$ мм) расчетная по (7) температура $\theta_t(0, z, t_0)$ стенки опытного дуралюминового образца обшивки ЛА составила примерно $\theta_t(0, z, t_0)=531$ °С, а экспериментально зафиксированная косвенным металлографическим путем – около $\theta_t(0, z, t_0)=500$ °С. Интересно отметить, что при этом опытное определение температуры $\theta_t(0, z, t_0)$ базировалось на результатах измерения согласно требованиям ГОСТ 9450-60 по глубине образца стенки дуралюминовой обшивки ЛА микротвердости, зависящей от температурного состояния (нагружения) ее материала [7]. Указанные выше результаты дают нам основание считать расчетные соотношения (1) и (7) работоспособными и отражающими на стадии протекания импульсной составляющей тока грозового разряда основные закономерности распределения двумерного температурного поля в области привязки канала молнии на металлической обшивке ЛА. Особенности численного интегрирования в выражениях (1) и (7) с точностью вычисления порядка 10^{-8} входящих в них интегралов приведены в **Приложениях 1 и 2**.

В соответствии с полученными данными следует, что импульсная составляющая тока молнии i_M с принятыми АВП ($I_m=200$ кА) может приводить к локальному проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину h_{II} не более $h_{II} \leq 0,4$ мм ($0 \leq z^* \leq 0,038$). Заметим, что при этом согласно (4) глубина проникновения Δ_T в алюминиевую стенку обшивки ЛА теплового потока от сильнооточного канала молнии принимает численное значение, равное около $\Delta_T=0,21$ мм, а в соответствии с (3) величина усредненной плотности q_0 поверхностного теплового потока оказывается примерно равной $q_0 = I_m \cdot U_0 / \pi r_0^2 = 5,79 \cdot 10^9$ Вт/м². В дальнейшем для упрощения расчетов рассмотрим независимое электротепловое действие на исследуемую стенку обшивки ЛА постоянной составляющей полного тока мол-

нии i_M , не учитывающее результатов предыдущего электротеплового воздействия на эту же стенку импульсной составляющей тока молнии.

Воздействие на стенку обшивки ЛА постоянной составляющей тока молнии. Экспериментальные данные по имитационному воздействию постоянной составляющей полного тока i_M молнии в воздушной двухэлектродной разрядной системе с алюминиевым электродом (анодом), характеризующейся практически неизменной во времени t амплитудой $I_m=200$ А и значением ее длительности $t_0=1000$ мс, свидетельствуют о том, что для этого случая электротермического нагружения алюминиевой обшивки ЛА можно использовать следующую эмпирическую зависимость максимального радиуса r_0 (м) канала искрового разряда от величины тока I_m (А) в нем [10]:

$$r_0 = 0,11 \cdot 10^{-3} (I_m)^{1/2}. \quad (8)$$

Подставив в (8) принятое нами значение амплитуды длительной составляющей полного тока молнии ($i_M = I_m = 200$ А), находим, что на стадии воздействия на исследуемую стенку обшивки ЛА практически постоянного тока ($t_0 = 1$ с) указанной силы радиус r_0 канала искрового разряда становится численно равным $r_0 = 1,55$ мм. После подстановки в выражение (7) заданных численных значений соответствующих коэффициентов и АВП постоянной (длительной) составляющей полного тока i_M молнии и численного интегрирования в нем следует, что максимальное значение превышения температуры $\theta(r^*, z^*, t_0^*)$ материала стенки алюминиевой обшивки ЛА ($h = 10$ мм) в эпицентре электротермического воздействия ($r^* = 0$; $z^* = 0$) в конце протекания постоянной составляющей тока в канале грозового разряда окажется примерно равным $\theta(0, 0, t_0) = 9,34 \theta_b = 1616$ °С (кривая 1 на рис. 3). Такая поверхностная температура материала стенки под плоской круговой областью теплового излучения от плазмы канала искрового разряда вызывает электрическую эрозию, изменение агрегатного состояния материала стенки и соответственно локальное разрушение наружной поверхности стенки алюминиевой обшивки ЛА и соответствует усредненной плотности q_0 поверхностного теплового потока от данного канала ($r_0 = 1,55$ мм) к исследуемой стенке, приближенно равной $q_0 = I_m \cdot U_0 / \pi r_0^2 = 2,65 \cdot 10^8$ Вт/м².

Из данных рис. 3 видно, что на стадии воздействия в течение времени $t_0 = 1$ с на алюминиевую обшивку ЛА постоянной составляющей тока молнии силой $I_m = 200$ А в отличие от хода кривых 1 – 4 на рис. 2 наблюдается заметное радиальное изменение превышения ее температуры $\theta(r^*, z^*, t_0^*)$ уже под опорной зоной канала молнии. Из-за высокого в материале стенки обшивки ЛА градиента температуры в радиальном направлении происходит более интенсивное радиальное перераспределение или своего рода радиальное "размытие" температуры вдоль рассматриваемой круговой области стенки. Такой ход кривых 1 – 4 на рис. 3 вдоль радиуса r может быть объяснен усилившимся за счет существенного возрастания

времени токового воздействия t_0 влиянием на распределение температуры $\theta_t(r, z, t_0)$ теплопроводности материала стенки обшивки ЛА.

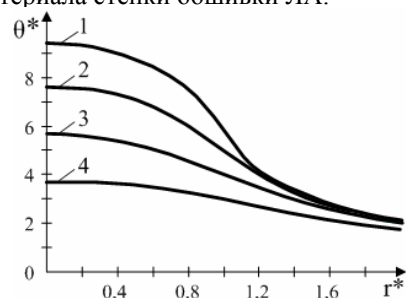


Рис. 3. Пространственное изменение безразмерного превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в стенке алюминиевой обшивки ЛА на стадии воздействия на нее постоянной (длительной) составляющей полного тока i_M молнии ($I_m = 200$ А; $t_0 = 1000$ мс; $r_0 = 1,55$ мм; $h = 10$ мм; для кривой 1- $z^* = 0$; 2- $z^* = 0,2$; 3- $z^* = 0,5$; 4- $z^* = 1,0$)

Что касается величины глубины проникновения Δ_T температурного поля в стенку, то здесь она согласно формуле (4) принимает расчетное численное значение $\Delta_T = 18,85$ мм. Несмотря на такое большое значение Δ_T , в случае электротеплового действия на алюминиевую стенку обшивки ЛА постоянной составляющей тока молнии с принятыми АВП расчетная по (7) глубина ее проплавления h_{Π} составляет примерно не более $h_{\Pi} \leq 1,5$ мм ($0 \leq z^* \leq 0,95$).

Приложение 1. На рис. П1 приведена блок-схема вычисления интеграла от обобщенной функции $F(x)$ методом Симпсона (методом парабол) с заданной точностью [25], использованная нами при численном интегрировании внутреннего несобственного интеграла вида $\int_0^{\infty} F(x) dx$ в выражениях (1) и (7). При этом

данный несобственный интеграл вида $\int_0^{\infty} F(x) dx$ был "усечен" и приближенно заменен на определенный

интеграл вида: $\int_0^b F(x) dx$. Параметр "усечения" b в

последнем интеграле численно выбирался таким образом, чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$\int_0^{\infty} F(x) dx \leq \varepsilon / 2, \quad \text{где } \varepsilon - \text{допустимая неточность } b$$

(ошибка) вычисления. Согласно рис. П1 в нашем случае $a = 0$, а $\varepsilon = 10^{-8}$.

Проведенный согласно разработанной блок-схеме, изображенной на рис. П1, численный эксперимент показал, что в указанном выше усеченном определенном интеграле параметр b может принимать численное значение $b \geq 320$, обеспечивающее при используемых нами АВП импульсной (постоянной) составляющей полного тока молнии i_M получение интегрального остатка ε не более 10^{-8} .

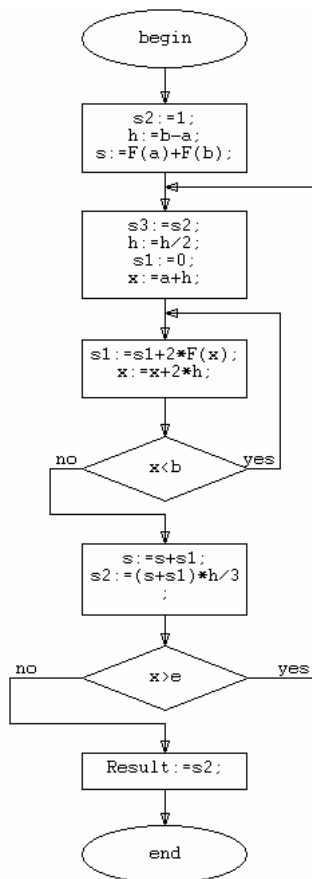


Рис. П1. Блок-схема вычисления интеграла от обобщенной функции $F(x)$ методом Симпсона

Приложение 2. Вычисление в расчетных выражениях (1) и (7) наружного определенного интеграла вида $\int_0^{t_0^*} f(\tau) d\tau$ выполнялось с использованием квадратурной формулы Гаусса–Лежандра [25]. Для этого была составлена подпрограмма определения узлов и весов в квадратурной формуле Гаусса–Лежандра. Данная подпрограмма на входе выбирала требуемое число узлов, а на выходе возвращала в основную программу вычисления превышения температуры стенки металлической обшивки ЛА массив узлов и массив весовых коэффициентов с нумерацией элементов от 0 до $n-1=M-1$. В табл. П.1 и П.2 приведены численные значения первых десяти соответственно узлов x_i и весов w_i квадратурной формулы Гаусса–Лежандра, которые были использованы нами при численном интегрировании с точностью порядка 10^{-8} в выражениях (1) и (7).

Таблица П.1

Узлы x_i квадратурной формулы Гаусса–Лежандра

x_0	$9,73906528517172 \cdot 10^{-1}$
x_1	$8,65063366688985 \cdot 10^{-1}$
x_2	$6,79409568299024 \cdot 10^{-1}$
x_3	$4,33395394129247 \cdot 10^{-1}$
x_4	$1,48874338981631 \cdot 10^{-1}$
x_5	$-1,48874338981631 \cdot 10^{-1}$
x_6	$-4,33395394129247 \cdot 10^{-1}$
x_7	$-6,79409568299024 \cdot 10^{-1}$
x_8	$-8,65063366688985 \cdot 10^{-1}$
x_9	$-9,73906528517172 \cdot 10^{-1}$

Таблица П.2

Весы w_i квадратурной формулы Гаусса–Лежандра

w_0	$6,66713443086836 \cdot 10^{-2}$
w_1	$1,49451349084399 \cdot 10^{-1}$
w_2	$2,19086362515287 \cdot 10^{-1}$
w_3	$2,69266719309992 \cdot 10^{-1}$
w_4	$2,95524224714753 \cdot 10^{-1}$
w_5	$2,95524224714753 \cdot 10^{-1}$
w_6	$2,69266719309992 \cdot 10^{-1}$
w_7	$2,19086362515287 \cdot 10^{-1}$
w_8	$1,49451349084399 \cdot 10^{-1}$
w_9	$6,66713443086836 \cdot 10^{-2}$

В результате на основе расчетного соотношения (7) и квадратурной формулы Гаусса–Лежандра выражение для вычисления безразмерного превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в исследуемой стенке металлической обшивки ЛА с импульсной (постоянной) составляющей полного тока молнии i_M может быть представлено в следующем виде:

$$\theta^*(r^*, z^*, t_0^*) = \left[\frac{5I_M c_0 \beta_0 h \tau}{\pi^{3/2} \lambda_0 r_0} \right] \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^M F_{ki}, \quad (\text{П.1})$$

где

$$F_{ki} = w_i \cdot \exp[-(z^*)^2 / 4(t_0^* - \tau_{ki}^*)] \times$$

$$(t_0^* - \tau_{ki}^*)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-(t_0^* - \tau_{ki}^*)v^2] J_0(vr^*) J_1(v) dv;$$

$\tau_{ki}^* = 0,5[2\tau_k + h_\tau(1 + x_i)]$; $\tau_k = kh_\tau$; $h_\tau = t_0^* / N$ – шаг по времени t_0^* ; N – число участков разбиения на временном отрезке интегрирования $[0, t_0^*]$; x_i – узлы квадратурной формулы Гаусса–Лежандра; w_i – веса квадратурной формулы Гаусса–Лежандра; M – число узлов на каждом участке разбиения временного отрезка интегрирования $[0, t_0^*]$; $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $i = 0, 1, 2, \dots, M$.

Выполненный по выражению (П.1) численный эксперимент показал, что при решении рассматриваемой двумерной электротепловой задачи для обеспечения заданной точности вычисления порядка 10^{-8} превышения температуры $\theta^*(r^*, z^*, t_0^*)$ в алюминиевой стенке толщиной h , испытывающей внезапное воздействие импульсной (постоянной) составляющей полного тока молнии i_M , число участков разбиения N на временном отрезке интегрирования $[0, t_0^*]$ должно составлять $N=1000$, а число узлов M на каждом участке разбиения временного отрезка интегрирования $[0, t_0^*]$ – соответственно $M=10$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана приближенная математическая модель двумерного температурного поля в области опорной круговой зоны радиусом r_0 сильноточного искрового канала грозового разряда на наружной плоской поверхности металлической обшивки ЛА, внезапно испытывающей в атмосферном воздухе прямое мощное электротепловое воздействие молнии.

2. Показано, что импульсная составляющая полного тока молнии i_M временной формы 2/50 мкс, характеризующаяся токовой амплитудой $I_m=200$ кА и полной длительностью ее протекания $t_0=500$ мкс, осуществляет в круговой опорной зоне канала молнии радиусом r_0 лишь приповерхностное оплавление и разрушение алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину h_{II} не более $h_{II} \leq 0,4$ мм.

3. Установлено, что постоянная (длительная) составляющая полного тока молнии i_M , характеризующаяся токовой амплитудой $I_m=200$ А и длительностью ее протекания $t_0=1$ с, вызывает в круговой опорной зоне канала молнии радиусом r_0 и вблизи нее электрическую эрозию исследуемой стенки, агрегатные изменения в материале металлической обшивки ЛА и может приводить к проплавлению алюминиевой стенки обшивки ЛА на глубину h_{II} не более $h_{II} \leq 1,5$ мм.

4. Пренебрегать влиянием импульсной составляющей полного тока молнии i_M с принятыми АВП на протекающие при ПУМ в металлической стенке обшивки ЛА нестационарные электротермические процессы нельзя.

5. Выполненное сравнение результатов расчета по предложенным формулам (1) и (7) температуры электротеплового нагрева $\theta_t(r, z, t_0)$ алюминиевой стенки обшивки ЛА в случае внезапного воздействия на нее в атмосферном воздухе силовоточного канала искрового грозового разряда и известных экспериментальных данных, связанных с ее (стенки) импульсным нагревом за счет джоулева тепла от имитируемого в лабораторных условиях силовоточного канала молнии, подтверждает работоспособность (достоверность) предложенной математической модели двумерного температурного поля в зоне прямого действия молнии на металлическую обшивку ЛА.

6. Полученные результаты расчета двумерного температурного поля в плоской стенке металлической обшивки ЛА позволяют заключить, что при ПУМ с принятыми АВП полного тока молнии i_M для обеспечения безопасности полетов ЛА в земной атмосфере в условиях грозовой деятельности минимальная толщина h алюминиевой стенки рассматриваемой обшивки должна составлять $h \geq 2$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Юман М.А. Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту // Труды американского ИИЭР. - 1988. - №12. - С. 5-26.
 [2] Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Технічна електродинаміка. - 1999. - №1. - С. 16-21.
 [3] Баранов М.И. Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии // Електротехніка і електромеханіка. - 2003. - №4. - С. 101-103.
 [4] Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. - М.: Радио и связь, 1987. - 256 с.
 [5] Борисов Р.К., Григорьев О.А., Ларионов В.П. Методы испытания бортового оборудования летательных аппаратов на молниестойкость // Электричество. - 1993. - №7. - С. 21-27.

[6] Баранов М.И., Бондина Н.Н. Нестационарные электромагнитные и тепловые процессы в цилиндрических проводниках при воздействии на них молнии // Электричество. - 1992. - №10. - С. 9-15.
 [7] Баранов М.И., Белозеров В.В., Кравченко В.И., Махатилова А.И. Экспериментальные исследования электротеплового воздействия импульсного силовоточного искрового разряда на металлическую обшивку летательного аппарата // Технічна електродинаміка. - 2003. - №1. - С. 3-7.
 [8] Баранов М.И. Моделирование электромеханического эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2002. - №7. - С. 58-70.
 [9] Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. - 1986. - №11. - С. 22-27.
 [10] Абрамов Н.Р., Кужекин И.П. К расчету нагрева стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // Электричество. - 1990. - №5. - С. 56-59.
 [11] Baranov M.I., Bondina N.N., Neskorodov G.F. Numerical Calculation of Nonstationary Electromagnetic and Thermal Processes under Action of Lightning Channel on the Metal Objects. -9-th International Symposium on High Voltage Engineering. Graz, Austria, 1995, Paper №6806, Vol. 6, p. 6806-1 – 6806-4.
 [12] Баранов М.И. Одномерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Електротехніка і електромеханіка. - 2007. - №1. - С. 65-71.
 [13] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 592 с.
 [14] Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
 [15] Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 487 с.
 [16] Абрамов Н.Р. Исследование приэлектродных областей дуги, свободно горящей в воздухе // Известия вузов СССР. Энергетика. - 1985. - №9. - С. 45-47.
 [17] Кучерявая И.Н. Тепловой анализ процесса электроискровой обработки гранул // Технічна електродинаміка. - 2003. - №2. - С. 67-71.
 [18] Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. - М.: Атомиздат, 1975. - 272 с.
 [19] Баранов М.И. Расчет глубины проникновения температурного поля в массивный проводник с переменным током // Електротехніка і електромеханіка. - 2004. - №2. - С. 74-79.
 [20] Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Какора А.Н. Лазерная и электронно-лазерная обработка материалов. Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
 [21] Межгосударственный ГОСТ 30585-98. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний / Рук. разработки - В.И. Кравченко. - Киев: Госстандарт Украины, 1998. - 27 с.
 [22] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. - М.: Мир, 1972. - 391 с.
 [23] Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. - М.: Мир, 1982. - 520 с.
 [24] Романенко И.Н. Импульсные дуги в газах. - Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1976. - 136 с.
 [25] Волков Е.А. Численные методы. Учебное пособие для ВУЗов. - М.: Наука, 1987. - 248 с.

Поступила 07.11.2006

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА С РАСШИРЕННОЙ ЗОНОЙ ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ КОНВЕРСИИ ТОКСИЧНЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ

Бойко Н.И., д.т.н., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М.
 Научно-исследовательский и проектно конструкторский институт "Молния"
 Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
 Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
 тел. (057) 7076183, факс (057) 7076183, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Представлено установку для конверсии токсичных газоподобных отходов за допомогою імпульсного коронного розряду з розширеною зоною іонізації з робочою напругою до 70 кВ, частотою проходження імпульсів до 2500 імпульсів за секунду та низькими питомими енерговитратами. Установка предназначена для работы на підприємствах, де потрібна конверсія газоподібних відходів. Імпульсний коронний розряд дозволяє уникнути небажаного нагріву газу.

Представлена установка для конверсии токсичных газообразных отходов при помощи импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации с рабочим напряжением до 70 кВ, частотой следования импульсов до 2500 импульсов в секунду и низкими удельными энергозатратами. Установка предназначена для работы на предприятиях, где требуется конверсия газообразных отходов. Импульсный коронный разряд позволяет избежать нежелательного нагрева преобразуемого газа.

ВВЕДЕНИЕ

Коронный разряд с расширенной зоной ионизации отличается от обычного коронного разряда тем, что зона ионизации в нем занимает значительную часть рабочего объема электродной системы [1].

Нами создана, испытана и введена в эксплуатацию первая полномасштабная установка по очистке токсичных газов при помощи импульсного коронного разряда (ИКР) с расширенной зоной ионизации (ИКРРЗИ). Установка введена в эксплуатацию на предприятии "ЭЛГА" (город Шостка Сумской области, Украина). Проблема, которую требовалось решить при помощи ИКРРЗИ, состояла в том, что сложные и различные по химическому составу газообразные промышленные отходы не удавалось довести до экологически требуемых норм содержания в выбрасываемых в атмосферу газах по всем компонентам. Обработка исходных токсичных газообразных отходов велась термическими и химическими методами.

Известно, что возможности конверсии токсичных газов коронными разрядами велики [2]. При этом возможности конверсии токсичных газов при помощи ИКРРЗИ достоверно не изучены, особенно при большой требуемой производительности, составляющей десятки кубических метров в час при конверсии газов, различных по химическому составу.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАБОТА УСТАНОВКИ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПОЧКЕ

Технические характеристики установки ИКРРЗИ

1. Состав: транзисторный генератор исходных импульсов; высоковольтный импульсный трансформатор; электродная система, состоящая из двух коаксиальных трубчатых реакторов для получения ИКРРЗИ и конверсии исходных газообразных продуктов; соединительные провода.

2. Номинальная мощность, потребляемая от сети, Вт 500

3. Амплитуда рабочего импульсного напряжения на электродной системе, кВ 60-70
 4. Номинальная частота следования импульсов в электродную систему, имп./с 2000-2500
 5. Номинальная производительность, куб. м/ч 50

Из приведенных технических характеристик следует, что удельные энергозатраты при конверсии газов в ИКРРЗИ составляют (500 Вт/50 куб. м/ч)=10 Втч/куб.м. Это существенно меньше, чем в известных элетротехнологиях.

Особенностью работы установки является то, что удельные энергозатраты слабо возрастают или вообще не возрастают при использовании двух одинаковых коаксиальных реакторов вместо одного.

Установка ИКРРЗИ была встроена в уже имеющуюся на предприятии "ЭЛГА" технологическую цепочку конверсии газов химическими методами. На рис. 1 представлена схема комплексной обработки токсичных газов на предприятии "ЭЛГА" после введения в эксплуатацию установки ИКРРЗИ.

В таблице 1 представлены результаты конверсии газов с использованием ИКРРЗИ: концентрация вредных веществ в преобразуемом газе до реактора № 2 и после реактора № 2.

Следует отметить отсутствие недоокисленных веществ после второго реактора, таких как сернистый ангидрид и окись углерода.

В настоящее время на промышленных предприятиях Украины, где в атмосферу выбрасываются газообразные промышленные отходы, в том числе исходно токсичные, коронный разряд для очистки этих отходов широко не используется. С учетом того, что объемы самых разнообразных отходов в ближайшем будущем будут прогрессивно возрастать, проблема их эффективной экономичной переработки будет обостряться. Для ее решения целесообразно широко использовать ИКРРЗИ, получение активных частиц в котором как способ и устройство для его осуществле-

ния защищены патентом на изобретение № 71940 Украины и патентом на изобретение № 2211800 Российской Федерации.

На рис. 2 представлена электрическая схема замещения основного зарядно-разрядного контура установки. Транзисторный ключ состоит из восьми включенных параллельно биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Все восемь транзисторов управляются одной микросхемой – драйвером. Транзисторы расположены каждый на своём отдельном радиаторе. Охлаждение радиаторов усилено при помощи компактных вентиляторов. Использование восьми транзисторов в ключе позволило избежать чрезмерного их нагрева при длительной (часы) непрерывной работе.

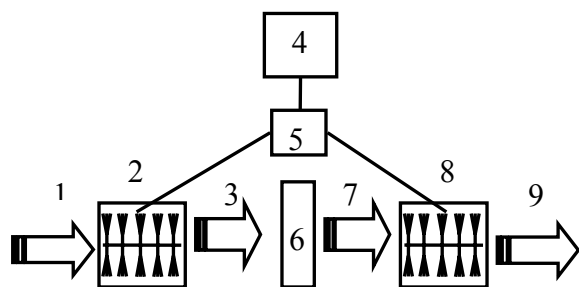


Рис. 1. Схема конверсии токсичных газовых отходов при помощи химических методов и ИКРРЗИ:
1 - газ, подлежащий конверсии; 2 - реактор № 1 с ИКРРЗИ; 3 - газ после реактора № 1; 4 - транзисторный генератор импульсов; 5 - импульсный трансформатор по схеме Тесла; 6 - химический реактор; 7 - газ после химического реактора; 8 - реактор № 2 с ИКРРЗИ; 9 - газ, выбрасываемый в атмосферу

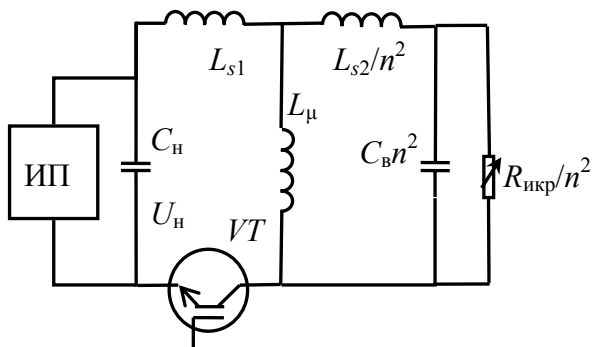


Рис. 2. Простейшая схема замещения зарядно-разрядного контура электродной системы с ИКРРЗИ:
 C_n – низковольтная емкость, предварительно заряженная от внешнего источника питания ИП до напряжения U_n ; $C_{вn^2}$ – емкость электродной системы; L_{s1} , L_{s2} – индуктивность рассеяния низковольтной и высоковольтной обмотки трансформатора соответственно; L_{μ} – индуктивность намагничения; n – коэффициент трансформации; VT – транзисторный ключ; $R_{икр}$ – нелинейное сопротивление импульсного коронного разряда

Таблица 1
Результаты замеров концентрации вредных веществ при конверсии газообразных отходов на предприятии "ЭЛГА" (г. Шостка Сумской области, Украина)

№ п/п	Название вещества	Концентрация вещества до очистки в оконечном ИКР-реакторе, мг/м ³	Концентрация вещества после очистки в оконечном ИКР-реакторе, мг/м ³
1	Бензол	0,72	0,62
2	Толуол	0,72	0,62
3	Ксилол	2,87	2,5
4	Окислы азота	129,3	112,6
5	Аммиак	8,0	не обнаружен
6	Фенол	не обнаружен	не обнаружен
7	Формальдегид	не обнаружен	не обнаружен
8	Соляная кислота	4,1	3,7
9	Уксусная кислота	70,4	56,3
10	Сажа	17,95	14,39
11	Сернистый ангидрид	11,02	не обнаружен
12	Метанол	13,23	12,93
13	Ацетон	26,76	не обнаружен
14	Бензин	535,2	66,3
15	Окись углерода	26,76	не обнаружена

ВЫВОДЫ

Создана установка для конверсии токсичных газообразных отходов не тепловым или химическим методом, а при помощи импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации.

Установка позволила очистить токсичные газообразные отходы (при использовании совместно с химическими методами) от таких вредных веществ, от которых невозможно было избавиться при использовании тепловых или (и) химических методов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Импульсный коронный разряд с расширенной зоной ионизации: физические основы получения и перспективные области применения // Электротехника и электромеханика. – 2004. - № 3. – С. 98-104.
- [2] Высоковольтные электротехнологии / О.А. Аношин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; Под ред. И.П. Верещагина – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 204 с.

Поступила 13.10.2006

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВВОДА С КОМБИНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Бржезицкий В.А., д.т.н., проф., Маслюченко И.Н., Троценко Е.А., Хоминич В.И., к.т.н., доц.
 Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
 Кафедра техники и электрофизики высоких напряжений
 Украина, 03056, Киев-56, проспект Победы 37, ФЭА НТУУ "КПИ"
 тел. (044) 241-76-35

Розглянуті особливості вводу з комбінованою ізоляцією високовольтного трансформатора напруги тороїдального типу. Описані експериментальна установка, методика виконання вимірів, а також обробка їх результатів.

Рассмотрены особенности ввода с комбинированной изоляцией высоковольтного трансформатора напряжения тороидального типа. Описаны экспериментальная установка, методика выполнения измерений, а также обработка их результатов.

Необходимость развития энергосбережения, контроля качества электрической энергии обуславливают необходимость повышения точности измерения напряжения в высоковольтных электрических сетях. В большинстве случаев такие измерения практически проводятся с помощью трансформаторов напряжения типов: НКФ, НДЕ, которые на период поверки не могут быть демонтированы и переданы в действующие центры метрологии и стандартизации. В связи с этим возникает потребность в создании новых типов мобильных высоковольтных трансформаторов напряжения с минимальными массогабаритными показателями и с высокими метрологическими характеристиками.

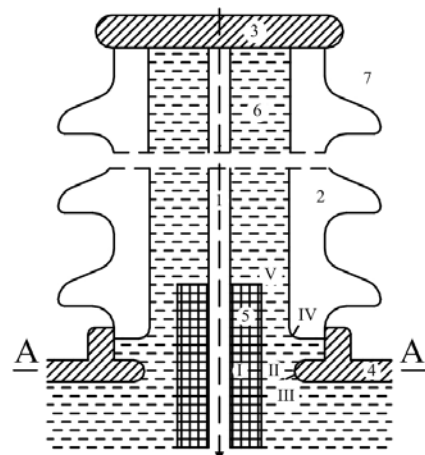
Одним из путей решения этой проблемы есть переход к конструкции высоковольтных трансформаторов напряжения тороидального типа. В свое время такой переход позволил резко улучшить характеристики высоковольтных трансформаторов тока. Переход к тороидальным высоковольтным трансформаторам напряжения требует разработки тороидальных обмоток с десятками тысяч витков на соответствующих сердечниках, обеспечения электрической прочности характерных участков высоковольтной изоляции и решения других задач.

Анализ возможных конструкций высоковольтной изоляции тороидальных трансформаторов напряжения позволяет выделить ее характерные области: зона непрерывной обмотки; край обмотки; зона ее высоковольтного вывода; высоковольтный ввод.

Одним из наиболее напряженных мест высоковольтного тороидального трансформатора напряжения является втулка его ввода, конструкция которого представлена (схематически) на рис. 1.

Наиболее напряженными в конструкции на рис. 1 являются: I - область твердого диэлектрика в сечении А-А; II, III - область трансформаторного масла в этом же сечении А-А; IV - область закругления нижней части фарфоровой покрывки; V - торцевая часть твердого диэлектрика 5.

Для теоретического исследования электрической прочности конструкции ввода важно знать нормальные (радиальные) составляющие напряженности электрического поля в областях I – II и составляющие, направленные по касательной к поверхности твердого



к высоковольтной обмотке трансформатора

Рис. 1. Конструкция ввода высоковольтного трансформатора напряжения:

- 1 - металлический цилиндрический стержень ввода;
- 2 - фарфоровая покрывка; 3 - высоковольтный электрод;
- 4 - металлическая крышка бака трансформатора;
- 5 - твердый диэлектрик; 6 - трансформаторное масло;
- 7 - окружающая среда (воздух)

диэлектрика в областях IV – V, при действии максимального рабочего и испытательного напряжений.

Для экспериментального исследования электрической прочности ввода изготовлена его модель в натурном исполнении, конструкция которой представлена на рис. 2, где дополнительно к указанным на рис. 1 элементам вносятся: противокоронный экран 8 и бак испытательной камеры 9.

Натурная модель ввода при подготовке к экспериментальным исследованиям проходит такой же технологический процесс изготовления, как и реальный трансформатор напряжения. При этом производится сушка под вакуумом при повышенных температурах, вакуумирование и сушка масла, заливка под вакуумом. Для каждого испытания изготовление изоляции и технологический процесс ее подготовки повторяется заново.

Испытания образцов модели проводятся приложенным напряжением частоты 50 Гц по схеме, представленной на рис. 3, методом непрерывно нарастающего напряжения (100% разряда) [1].

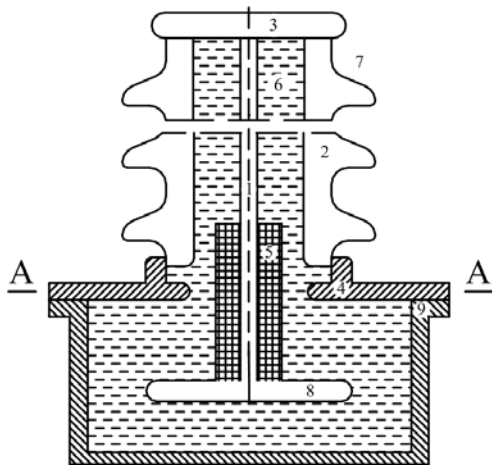


Рис. 2. Конструкция модели ввода для испытаний

При испытании методом 100% разряда результаты испытаний выбирают из серии $N = 5$ значений разрядных напряжений U_i . Из этих значений определяют $\overline{U_{cp}}$ и оценочное значение стандартного отклонения z по формулам [1]:

$$\overline{U_{cp}} = \frac{1}{N} \sum_1^N U_i; \quad (1)$$

$$z = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N (U_i - \overline{U_{cp}})^2}. \quad (2)$$

По полученным значениям $\overline{U_{cp}}$ и z определяют среднее разрядное напряжение U_{cp} и абсолютное значение стандартного отклонения σ_a по выражениям:

$$\overline{U_{cp}} - \frac{z \cdot t_p}{\sqrt{N}} \leq U_{cp} \leq \overline{U_{cp}} + \frac{z \cdot t_p}{\sqrt{N}}; \quad (3)$$

$$z \sqrt{\frac{N-1}{x_{p/2}^2}} \leq \sigma_a \leq z \sqrt{\frac{N-1}{x_{(1-p/2)}^2}}, \quad (4)$$

где t_p , $x_{p/2}^2$, $x_{(1-p/2)}^2$ - функции числа разрядов N и доверительной вероятности; при доверительной вероятности 95% и $N = 5$ из [1] следует:

$$\frac{t_p}{\sqrt{N}} = 1,24; \quad \sqrt{\frac{N-1}{x_{p/2}^2}} = 0,60; \quad \sqrt{\frac{N-1}{x_{(1-p/2)}^2}} = 2,87.$$

По полученным значениям $\overline{U_{cp}}$ и σ_a определяют U_{cp}' и σ_a' :

$$U_{cp}' = \overline{U_{cp}} - \Delta \overline{U}; \quad (5)$$

$$\sigma_a' = z \sqrt{\frac{N-1}{x_{(1-p/2)}^2}}, \quad (6)$$

где $\Delta \overline{U} = \Delta \overline{U}(z)$ [1].

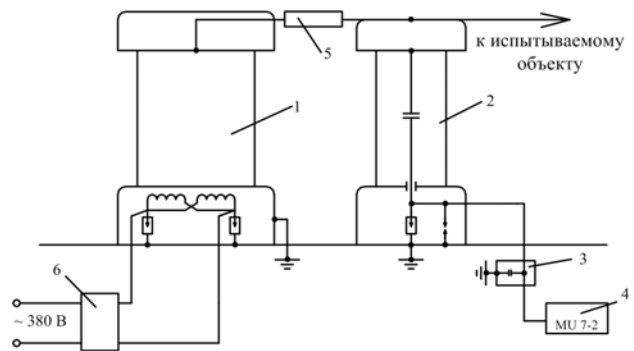


Рис. 3. Схема для испытаний приложенным напряжением частоты 50 Гц:

1 - трансформатор фирмы TUR на напряжение 350 кВ; 2 - конденсатор MCF 75/350 P; 3 - низковольтное плечо емкостного делителя напряжения; 4 - измерительный блок MU 7-2; 5 - токоограничительное сопротивление; 6 - регулятор напряжения

Затем полученные значения U_{cp}' и $\sigma_a' = \sigma_a / U_{cp}$ подставляют в формулу для определения выдерживаемого напряжения $U_{в.о}$ объекта:

$$U_{в.о} = U_{cp}' (1 - n\sigma'), \quad (7)$$

где n - коэффициент, определяемый заданной (нормированной) вероятностью выдерживания, которая при нормированной вероятности выдерживания 90% [1] составляет $n = 1,3$; σ' - наибольшее значение в относительных единицах стандартного отклонения в доверительном интервале.

Результаты испытаний электрической прочности высоковольтного ввода определенные по данной методике для различных геометрических размеров его элементов сопоставляются с данными оптимизации конструкции, полученными на основании расчетов картины поля.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ГОСТ 1516.2 - 97 "Электрооборудование и электроустановка переменного тока на напряжение 3 кВ и выше".

Поступила 20.10.2006

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ВЕЛИЧИНЫ ОЖИДАЕМОГО ПРИРОСТА НАГРУЗКИ В ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 110 кВ, ВЫЗЫВАЕМОГО РОСТОМ ЭНЕРГОВООРУЖЕННОСТИ БЫТА

Вороновский Г.К., д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Украины, Сергеев С.А., к.т.н., с.н.с.

ОАО "Харьковская ТЭЦ-5"

Украина, 62371, Харьковская обл., Дергачевский р-н, ул. Горького, 1

тел. (057)372-10-29, факс (057)731-42-98, e-mail: mbox@tec5.kharkiv.com

Старков К.А., к.т.н.

АК "Харьковоблэнерго"

Украина, 61037, Харьков, ул. Плехановская, 149

тел. (057)740-12-68, факс (057)740-14-44, e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua

Абашкина О.С.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057)707-61-76, факс (057)707-65-45, e-mail: olga@online.kharkiv.com

Выполнена оценка капитальных вложений (в условных единицах) на развитие городской электрической распределительной сети 110 кВ, предназначенных для увеличения ее пропускной способности. На примере крупного жилого массива определены этапы модернизации элементов системы электроснабжения, ограничивающих ожидаемый рост электрической нагрузки в бытовом секторе. Получена оценка предельно допустимой величины прироста нагрузки, допускающей эксплуатацию системы энергоснабжения без коренной реконструкции сети.

Виконано оцінку капітальних вкладень (в умовних одиницях) на розвиток міської електричної розподільної мережі 110 кВ з метою збільшення її пропускної здатності. На прикладі великого житлового масиву визначені етапи модернізації елементів системи електропостачання, що обмежуватимуть ріст електричного навантаження в побутовому секторі. Отримано оцінку гранично припустимої величини приросту навантаження, що допускає експлуатацію системи енергопостачання без корінної реконструкції мережі.

В связи со стремительным ростом цен на природный газ все большую актуальность для Украины, ставшей на путь построения основ рыночной экономики, приобретает задача создания благоприятных условий для рыночного реформирования коммунальной энергетики. Одной из главных предпосылок организации конкурентных отношений в этой сфере является создание для потребителей возможности выбора наиболее экономичного способа теплоснабжения, предполагающего рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в процессе удовлетворения потребности в тепле.

Сегодня все больше специалистов соглашаются с неизбежностью замещения части тепловой энергии, вырабатываемой котельными и ТЭЦ, тепловой энергией, получаемой путем конвертирования электрической энергии, вырабатываемой на АЭС, в тепло. Очевидно, что теоретически существует несколько возможностей для осуществления этих намерений, отличающихся друг от друга, во-первых, конкретикой предлагаемых решений и, во-вторых, пропорциями потребления электрической и тепловой энергии в бытовом секторе, которые установятся в результате их реализации.

Так, первый вариант развития ситуации предполагает пересмотр нормативно-методической базы регулирования отпуска тепла от районных котельных и ТЭЦ с целью предупреждения перетоков и стабилизации качества теплоснабжения на компромиссном уровне [1]. В этом случае осуществляют снижение отпуска тепла от источников системы централизован-

ного теплоснабжения (СЦТ), контролируемое по величине избыточного потребления электроэнергии и природного варочного газа в быту [2]. Компенсация ухудшившегося микроклимата обеспечивается в этом случае за счет использования бытовыми потребителями принадлежащих им электронагревательных приборов (ЭНП). При этом, естественно, имеет место рост нагрузки в сетях, и проблема реконструкции низковольтных сетей 0,4 кВ, изначально не рассчитанных на массовое использование, пусть даже только комфортного, электроотопления приобретает особенную остроту.

Второй вариант отличается от первого тем, что внедрение ЭНП осуществляется не стихийно, на уровне отдельных квартир, наиболее пострадавших от изменения режимов функционирования СЦТ, а организовано, путем поэтапного перевода на электротеплоснабжение (ЭТС) многоэтажных жилых домов или, как минимум, их отдельных подъездов. Тут возможны несколько вариантов – начиная от электроаккумуляционного отопления [3], получившего одобрение со стороны государства в форме утвержденных строительных норм [4, 5], и заканчивая групповыми электрокотельными [6].

Наконец, в третьем варианте зона внедрения ЭТС ограничивается теплораспределительными станциями (ТРС) СЦТ. Здесь устанавливаются мощные устройства электронагрева, которые могут использоваться как для дополнительного нагрева теплоносителя перед его подачей в квартальные сети, так и для приготовления

горячей воды в баках-аккумуляторах. По-видимому, в этом случае электрическая распределительная сеть (ЭРС) 0,4 кВ страдает меньше всего, потому что рост нагрузки происходит в сетях 10 кВ, питающих сами ТРС.

К сожалению, ни один из указанных вариантов не может претендовать на то, чтобы стать сколько-нибудь серьезной альтернативой СЦТ. Любой из них, в лучшем случае, может рассматриваться только как некое дополнение к СЦТ, способное выполнять целый ряд полезных функций – таких как (а) улучшение микроклиматического комфорта в жилых помещениях, (б) сокращение совокупных затрат потребителей на энергоснабжение, (в) оказание системных услуг Объединенной энергосистеме Украины за счет участия в регулировании ее нагрузки на протяжении суток [7].

Для того, чтобы иметь возможность оценить выраженность составляющих полезного эффекта от выполнения разными системами ЭТС этих функций, необходимо знать – хотя бы ориентировочно – масштабы будущего роста электрической нагрузки в быту в связи с использованием электроотопления, на которые можно рассчитывать, не подвергая ЭРС необходимости коренной реконструкции. Последняя сопряжена со значительными финансовыми затратами, и поэтому представляется целесообразным ограничить предельный рост бытовой нагрузки такой величиной прироста, который сделает коренную реконструкцию сети 110 кВ неизбежной. В этом и состояла главная цель расчетов, результаты которых представлены в настоящей статье.

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача определения "узких мест" в системе электроснабжения бытовых потребителей заключается в определении элементов (от линии электропередач напряжением 110 кВ и до внутриквартирной проводки включительно), работающих с наименьшим запасом по пропускной способности при определенном уровне нагрузок (рис. 1).

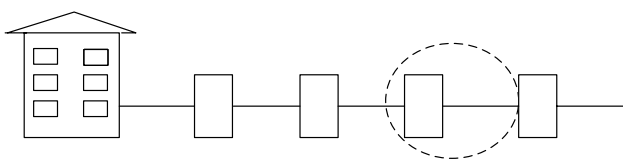


Рис. 1. Элементы схемы электроснабжения жилмассива

Понятно, что при сегодняшнем уровне нагрузок самым узким местом системы электроснабжения является внутриквартирная электропроводка, способная пропускать мощность около 1 кВт. Не рассчитаны на существенный рост нагрузки и абонентские вводы – как в квартире, так и в жилое здание. Кабели, соединяющие здания с трансформаторными подстанциями (ТП), уже имеют некий запас по пропускной способности, а что касается ТП, то многие из них десятилетиями остаются недогруженными.

Одним словом, по мере роста рабочего напряжения запас по пропускной способности элементов системы электроснабжения возрастает.

Тем не менее, наша идея состоит в том, чтобы исследовать на конкретном примере, при каких нагрузках будет исчерпан запас по пропускной способности сети 110 кВ. Причина нашего интереса состоит в том, что именно эта сеть является системообразующей для формирующейся сегодня системы ЭТС, и, следовательно, электрическая мощность, которую система ЭТС районного масштаба сможет конвертировать в тепло, целиком и полностью определяется способностью сети 110 кВ пропустить ее через себя. Если нам удастся, хотя бы ориентировочно, оценить предел пропускной способности районной сети после реализации всех относительно малозатратных мероприятий по ее модернизации, мы сможем более-менее объективно сопоставить различные варианты развития системы ЭТС в этом районе. Понятно, что мощность, потребляемая системой ЭТС, пусть опосредованно и косвенно, но, все-таки, влияет на потенциал экономии природного газа, существующий в СЦТ. И зная ее, мы, в конечном итоге, сможем взвешенно сопоставить все аргументы "за" и "против", выдвигаемые в споре о том, по какому пути должно пойти будущее развитие коммунальной энергетики в Украине.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбран относительно обособленный микрорайон Алексеевского жилого массива г. Харькова. Питание данного массива осуществляется от подстанции (ПС) 110/10 кВ "Алексеевка". Первым шагом расчетов является определение "узких мест" высоковольтной части системы электроснабжения, в данном случае – воздушной линией 110 кВ и самой ПС "Алексеевка".

На рис. 2 представлена схема сети 110 кВ с указанием расстояний между подстанциями, марок высоковольтных проводов и их сечений. Система состоит из пяти проходных и одной тупиковой ПС, которые включены между двумя центрами питания – ПС 330/110 кВ "Залютино" и "Лосево".

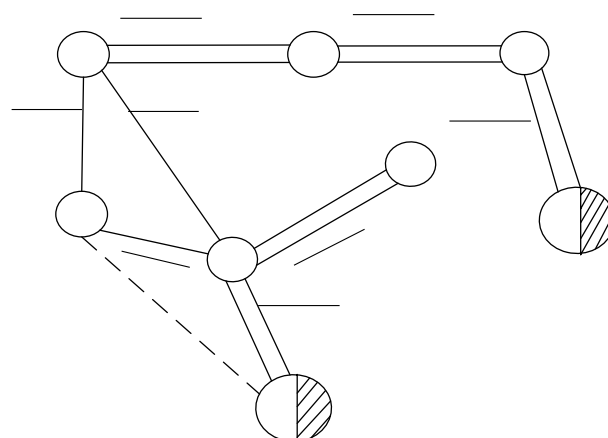


Рис. 2. Схема сети 110 кВ

В табл. 1 представлены активные и реактивные нагрузки каждой ПС в период зимнего максимума 2006–2007 гг., а также количество и тип установленных на них трансформаторов.

Нагрузка зимнего максимума 2006-2007 гг

№ подстанции	Название подстанции	Активная нагрузка, P , МВт	Реактивная нагрузка, Q , МВАр	Количество трансформаторов, шт.	Тип трансформаторов
1	Московская	29,5	11,8	2	ТРДН-40
2	Жуковского	16,2	6,5	2	ТРДН-40
3	ХФТИ	3,78	2,15	3	ТРДН-25
4	Алексеевка	24,3	9,7	2	ТРДН-25
5	Ивановка	37	19	4	ТРДН-40
6	Павловская	1,14	0,45	2	ТДН-10

При моделировании роста нагрузки бытовых потребителей, проживающих на территории выбранного массива, с помощью специально разработанной программы [8] была определена зависимость капитальных вложений в реконструкцию сети 110 кВ (замена, добавление оборудования) от уровня электропотребления при пропорциональном росте реактивной и активной составляющей, а также при росте только активной составляющей нагрузки (рис. 3). При этом предполагалось, что на ПС, соседних с ПС "Алексеевка", нагрузка не увеличивается.

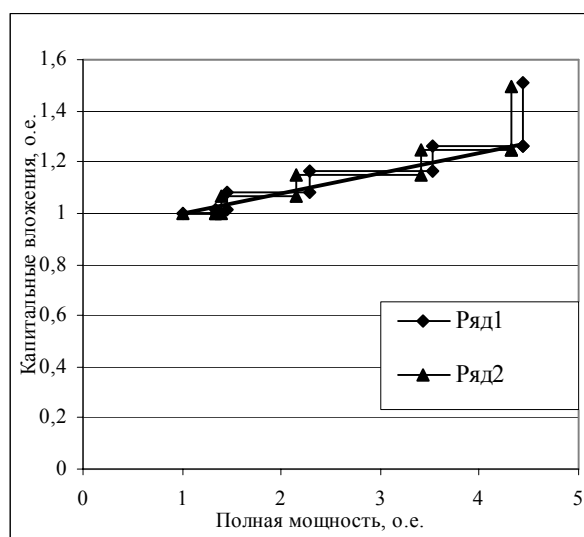


Рис. 3. Зависимость капитальных вложений в сеть 110 кВ от уровня электропотребления при пропорциональном росте реактивной и активной составляющей (ряд 1) и при росте только активной нагрузки (ряд 2)

Первый (наименьший) скачок затрат соответствует установке на ПС "Алексеевка" компенсирующих устройств, в качестве которых можно использовать батареи конденсаторов типа КСКГ и КС-2 на стороне низшего напряжения понижающих трансформаторов. Поскольку при разнице в цене 25 %, конденсаторные батареи типа КСКГ генерируют реактивную мощность, превосходящую мощность КС-2 в два раза, из этих двух типов батарей целесообразным представляется выбор КСКГ.

Второй и последующие скачки соответствуют последовательной замене трансформаторов на этой же ПС на более мощные (25 МВ·А → 40 МВ·А → 63 МВ·А → 80 МВ·А и т.д.). Трансформаторы остальных ПС при этом замены не требуют. Последний

скачок соответствует реконструкции всей сети 110 кВ с подключением дополнительной ЛЭП от центра питания (ПС "Залютино") к ПС "Алексеевка" и преобразованием этой подстанции из проходной в узловую.

Причем, как видно из графика, при 4-х-кратном росте бытовой нагрузки сама ЛЭП 110 кВ еще не нуждается в реконструкции, так как ток в ней продолжает оставаться ниже допустимых пределов (при условии, что рост нагрузки ограничивается только вкладом от роста нагрузки ПС "Алексеевка" и не затрагивает остальные ПС).

На рис. 4 представлены кривые предельной мощности трансформаторов, при которых необходима их замена. Эта критическая мощность зависит от соотношения активной и реактивной мощностей.

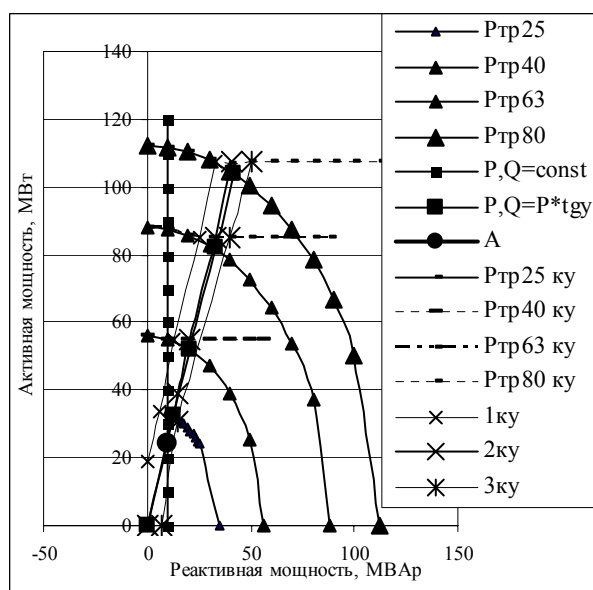


Рис. 4. Кривые предельной мощности трансформаторов в зависимости от соотношения их активной и реактивной мощностей

На данном графике выделен сегмент наиболее вероятного развития соотношения между активной и реактивной мощностями, ограниченный прямыми, соответствующими пропорциональному росту активной и реактивной составляющей мощности ($Q=P \cdot \operatorname{tg} \varphi$) и росту лишь активной составляющей ($Q=\operatorname{const}$).

При установке компенсирующих устройств изменение полной мощности определяется лишь изменением активной составляющей, чему соответствуют прямые Ртр25, Ртр40, Ртр63, Ртр80. Прямыми 1ку,

2ку, 3ку отмечены пределы регулирования реактивной мощности соответствующим количеством компенсирующих устройств.

Точка А соответствует сегодняшнему соотношению активной и реактивной мощности.

При построении линии тренда для графика, характеризующего рост только активной нагрузки (ряд 2), был определен линейный коэффициент роста капитальных вложений в сеть 110 кВ в зависимости от увеличения нагрузки на шинах исследуемой подстанции. Он составил 0,0803 о.е. Уравнение линии тренда имеет следующий вид:

$$K = 0,0803 \cdot S + 0,9164,$$

где K – капитальные вложения, о.е.; S – полная мощность, о.е.

Таким образом, при увеличении нагрузки на исследуемой подстанции в 4 раза по сравнению с сегодняшней, объем необходимых капитальных вложений составит около 30 % от стоимости имеющихся основных фондов.

Из графика также видно, что до осуществления капитальных вложений в сеть 110 кВ, связанных с первой заменой трансформаторов, запас всей высоковольтной части системы электроснабжения по мощности составляет 38 %. После первой замены трансформаторов, для осуществления которой необходимо всего 0,066 о.е. финансирования, следующие вложения потребуются при увеличении нагрузки в 1,6 раза. Коренная реконструкция всей сети 110 кВ потребует при увеличении нагрузки в быту более, чем в 4 раза.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возникает вопрос: 4-х-кратный рост нагрузки в быту – много это или мало? И какое время остается у нас в резерве для выбора лучшего варианта формирования системы ЭТС и поиска финансовых средств для его реализации?

Ответ на него не может быть однозначным. Если говорить конкретно об Алексеевском жилмассиве города Харькова, то здесь нужно принимать во внимание практическое отсутствие у его жителей газовых кухонных плит. Подавляющая часть домов (9 и 16 этажей) оборудована электроплитами, и это говорит о том, что вся внутридомовая электропроводка выполнена более мощной. Если в квартире и появляется какой-нибудь мощный ЭНП, он не перегружает абонентский ввод. Указанное обстоятельство делает Алексеевку весьма привлекательным кандидатом на роль экспериментального жилмассива, на котором можно было бы отработать алгоритмы функционирования системы ЭТС и ее координации с традиционной СЦТ.

Совсем иная картина имеет место в районах с высокой степенью газификации. Здесь появление ЭНП влечет быстрый рост бытовой нагрузки. И этому есть яркие примеры – другие жилые массивы Харькова, Павлово Поле, Салтовка [9]. При снижении качества теплоснабжения бытовых потребителей электрическая нагрузка в быту увеличивается в этих районах уже сейчас в 2,5-3 раза, провоцируя рост сверхнормативных потерь в низковольтных сетях. Теплые, мяг-

кие зимы последних лет не давали повода нагрузке расти дальше, но то, что обозначенный рубеж может быть легко превзойден уже в ближайшие годы, не вызывает никаких сомнений.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследования режимов работы сети 110 кВ определен граничный уровень нагрузки, при котором необходима ее коренная реконструкция. В ходе расчетного исследования установлено, что "узким" местом высоковольтной части системы электроснабжения Алексеевского жилого массива являются понижающие трансформаторы ПС 110/10 кВ "Алексеевка", первая замена которых потребует уже при увеличении нагрузки на 38 %. ВЛ 110 кВ, по которой происходит питание исследуемой подстанции, работает с наибольшим запасом по пропускной способности и не потребует реконструкции при увеличении нагрузки в бытовом секторе в 4-4,3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вороновский Г.К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. – Х.: Изд-во "Харьков", 2002. – 240 с.
- [2] Патент Украины на изобретение UA 25665 C2, МКИ⁷ F24D 3/00 от 16.04.1997. Способ центрального регулирования отпуска тепла от ТЭЦ жилым массивам / Г.К. Вороновский, С.А. Сергеев, Г.Г. Сергеевкова // Промислова власність. – 2001. – № 8 (опубликовано 17.09. 2001).
- [3] Пырков В.В. Электрическая кабельная система отопления. Энергетическое сопоставление. – К.: ООО "МедиаМакс", 2004. – 88 с.
- [4] ДБН В. 2.5-23-2003 "Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення".
- [5] ДБН В. 2.5-24-2003 "Електрична кабельна система опалення".
- [6] Олефиренко О.М., Вихров Д.Ю. Оценка эффективности инновационных энергосберегающих технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве // В кн.: Малая энергетика в системе обеспечения экономической безопасности государства / Под общ.ред. Г.К. Вороновского, И.В. Недина. – К.: Знання України, 2006. – С. 211-220.
- [7] Розинський Д.І., Громадський Ю.С., Тимченко М.П. Електротеплоакумуляційний обігрів як новий тип споживача-регулятора // Промелектро. – 2006, №2. – сс.14-18.
- [8] Проектирование систем электроснабжения. Учебное пособие / О.Г. Гриб, А.Л. Ерохин, Г.А. Сендерович, К.А. Старков. – Киев, 2002. – 184 с.
- [9] Анализ тенденций изменения структуры электропотребления в быту / Г.К. Вороновский, А.Ю. Козлоков., К.В. Махотило, С.А. Сергеев // Електротехніка та електромеханіка, 2004. – №1. – С. 66-69.

Поступила 15.01.2007

ПЕТРУШИН ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ

(К 60-летию со дня рождения)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин Одесского национального политехнического университета Виктор Сергеевич Петрушин родился 14 мая 1947 г. в селе Шабо Белгород-Днестровского района Одесской области. В 1968 году окончил Одесский политехнический институт по специальности "Электрические машины" с присвоением квалификации инженер-электромеханик.

По окончании института работал инженером Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-технологического института электроугольных изделий, ассистентом, старшим преподавателем и доцентом Одесского инженерно-строительного института.

С 1987 года Виктор Сергеевич работал в должности доцента на кафедре электрических машин Одесского политехнического института. На протяжении пяти лет, с 1993 по 1998 годы, он исполнял обязанности декана факультета автоматизации и электрификации промышленности.

В 2002 году Петрушин В.С. в НТУ "Харьковский политехнический институт" успешно защитил докторскую диссертацию на тему "Проектный синтез высокоэффективных регулируемых асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт". После защиты Виктор Сергеевич работал в должности профессора кафедры электрических машин, а в 2003 году возглавил эту кафедру.

За период работы на кафедре подготовил и преподает курсы – "Электрические машины", "Тепловые и вентиляционные расчеты в электрических машинах", "Электрические машины в регулируемом приводе", "Основы электрической тяги".

Виктор Сергеевич много внимания уделяет работе со студентами и аспирантами, с большим энтузиазмом занимается модернизацией лабораторной базы кафедры и ее благоустройством, созданием новых оригинальных стендов по специальным курсам, внедрением современных компьютерных технологий в учебный процесс.

Основные направления научной деятельности В.С. Петрушина связаны с моделированием электромагнитных, электромеханических, тепловых, виброакустических процессов в асинхронных двигателях; проектированием регулируемых асинхронных двигателей, адаптированных к специфическим условиям работы в составе регулируемых электроприводов; разработкой энергосберегающих асинхронных двигателей.

Он является автором более 100 научных работ и 3 учебных пособий, последнее из которых, "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе", пользуется заслуженным вниманием электромехаников Украины и стран бывшего СССР.



В настоящее время является членом специализированного совета по защите кандидатских диссертаций при Одесском национальном политехническом университете, входит в состав экспертного совета ВАК Украины по электротехнике и энергетике, а также ряда оргкомитетов международных конференций и симпозиумов по актуальным проблемам электромеханики. Петрушин В.С. – член редколлегии межведомственного научно-технического сборника "Электромашиностроение и электрооборудование".

Виктор Сергеевич не только хороший руководитель и известный ученый, но и добродетельный и коммуникабельный человек, рядом с ко-

торым его коллеги и друзья чувствуют себя вполне комфортно. Он всегда готов поддержать любые кафедральные мероприятия, а во многих случаях не прочь быть их инициатором.

Возраст для Виктора Сергеевича – не помеха и в спортивных соревнованиях, в особенности в игре в волейбол.

Как разносторонний человек, Виктор Сергеевич с удовольствием занимается выращиванием винограда, продукт из которого славен и любим не только в Одессе, но и далеко за ее пределами.

Друзья, товарищи и коллеги по работе желают Виктору Сергеевичу доброго здоровья, счастья и новых успехов в его плодотворной деятельности.

Редакционная коллегия журнала "Электротехника и электромеханика" присоединяется к этим пожеланиям.

Список авторів

А	Л
Абашкина Ольга Сергеевна 68	Ламанов С.Л. 34
	Ларченко Борис Борисович 45
Б	Levin Michael 45
Байша Олексій Іванович 5	Лимонов Леонид Григорьевич 40
Баранов Михаил Иванович 57	М
Бойко Николай Иванович 64	Маренич Оксана Леонідівна 13
Борцов Александр Васильевич 64	Маслючко Игорь Николаевич 66
Бранспиз Юрий Адольфович 7	Н
Братківська Катерина Олександрівна 5	Набокова Ольга Володимирівна 5
Бржезицкий Владимир Александрович 66	Носенко Марина Александровна 57
В	О
Волков Игорь Владимирович 45	Овчаров Андрей Александрович 22
Вороновский Геннадий Кириллович 68	Осинская Валентина Ивановна 15
Г	П
Гречко Микола Володимирович 9	Пентегов Игорь Владимирович 45
Д	Плешков Петр Григорьевич 50
Дубинець Леонід Вікторович 13	Плешков Сергей Петрович 50
Дяченко Володимир Валентинович 9	Поляченко Елена Юрьевна 7
Е	Р
Евдошенко Леонид Свиридович 64	Рымар Сергей Владимирович 45
Ж	С
Жорняк Людмила Борисовна 15	Сергеев Сергей Александрович 68
З	Солдатенко Валентин Петрович 50
Заблудский Николай Николаевич 22	Старков Константин Александрович 68
Зароченцев Александр Иванович 64	Т
Зорічев Андрій Володимирович 13	Тетерко Александр Анатолійович 53
И	Троценко Евгений Александрович 66
Иванов Владимир Михайлович 64	У
К	Устименко Дмитро Володимирович 13
Карзова Оксана Олександрівна 13	Ф
Клементьев Александр Валентинович 25	Філатов Максим Анатольевич 22
Клименко Борис Владимирович 28	Х
Козлов Володимир Володимирович 5	Хоминич Виктор Иванович 66
Комісаренко Александр Иванович 34	Ш
Котыш Андрей Иванович 50	Шпатенко Виктор Сергеевич 36
Кузьмин Виктор Владимирович 36	

Abstracts

Electrical Mashines and Apparatus

Baisha A.I., Kozlov V.V., Bratkovskaya K.A., Nabokova O.V.

Calculation of oil speed in prismatic channels of power oil transformers with cylindrical windings.

The article presents calculations of oil flow velocity in power oil transformers. Results for rectangular and prismatic channels are obtained. They may be used for increasing accuracy of determination of temperature distribution in the windings and for calculating the maximum temperature.

Key words – power oil transformers, oil speed, maximum temperature.

Branspiz Yu.A., Polyachenko E.Yu.

Application of a conformal mapping method to bipolar electromagnet rational geometry determination.

The paper presents results of optimum geometrical dimensions determination for U-type electromagnetic systems in terms of maximum product of intensity over the central pole and its gradient and in terms of maximum intensity gradient.

Key words – U-type electromagnetic systems, optimum geometrical dimensions, conformal mapping method.

Grechko M.V., Dyachenko V.V.

Ways of improvement of specific indexes of valve inductor generators.

Analysis of the basic directions of improvement of specific indexes of valve inductor generators is performed.

Key words – valve inductor generator, specific indexes improvement, basic directions.

Dubinets L.V., Zorichev A.V., Karzova O.O., Marenich O.L., Ustimenko D.V.

Requirement for response speed of electric circuit protection apparatus in railroad rolling stock.

The article considers a problem of response speed of short-circuit current protection apparatus in rolling stock electric circuits. Recommendations on desired figures of protection apparatus actuation time are given.

Key words – short-circuit current protection, rolling stock electric circuits, protection apparatus actuation time.

Zhornyak L.B., Osinskaya V.I.

Research into simulation methods for an on-load tap-changing transformer voltage regulation system to increase power supply quality.

Problems of the mains voltage quality increase for electric power consumers are investigated. Investigation of a power transformer voltage regulation system with an on-load regulator of PHOA – 110/800 type is made in Matlab (Simulink 4).

Key words – on-load tap-changing transformer, mains voltage quality, voltage regulation system, simulation.

Zablodskiy N.N., Ovcharov A.A., Filatov M.A.

5 **Experimental estimation of power processes in the massive rotor of an auger electrothermomechanical energy converter.**

Results of theoretical research on power processes in the massive rotor of an auger electrothermomechanical energy converter are given. Dependences of eddy current intensity distribution on the converter massive rotor surface are obtained, behavior of thermal field distribution is revealed.

Key words – auger electrothermomechanical energy converter, massive rotor, power processes, calculation.

7 Klement'ev A.V.

Research on currents of asymmetrical short circuits in combined contactless synchronous generators.

Calculation peculiarities for currents of asymmetrical short circuits in contactless synchronous generators with combination over magnetic circuit and inductor windings are studied.

Key words – contactless synchronous generator; combination over magnetic circuit and inductor windings, asymmetrical short circuits.

Klimenko B.V.

9 **International Electrical Vocabulary – Ukrainian prospects.**

Publication of selected translation from section 441 - *Switchgear, controlgear and fuses* – of International Electrical Dictionary (IED) into Ukrainian continues. This time we introduce the Ukrainian for sections 441-15 – *Parts of switching devices* – and 441-16 – *Operation*.

Key words – International Electrical Dictionary, section 441-15 – *Parts of switching devices*, section 441-16 – *Operation*, terms and definitions, translation into Ukrainian.

13

Komisarenko O.I., Lamanov S.L.

Influence of current fall curve shape on energy release at load shedding.

It is shown that in a real parameters range of a switched-off electrical circuit, for essential energy release reduction in loading it is necessary to improve the shape of $i(t)$ curve and to increase switching surge voltage coefficient up to maximum permissible level, other conditions equal. The analysis is performed in relative units.

Key words – switched-off electrical circuit, energy release reduction, current fall curve shape.

15

Kuz'min V.V., Shpatenko V.S.

On a problem of calculation of power action of magnetic core on windings in electric machines.

A comparative analysis of results of unconventional theoretical approaches application to solving a problem of calculation of magnetic core action on windings in electric machines is performed under condition of magnetic field induction being equal to zero in the zone of the winding location ("paradoxes of transformer and generator").

22

25

28

34

36

Key words – magnetic core action, electric machine winding, unconventional theoretical approaches, comparative analysis.

Limonov L.G.

Peculiarities of an asynchronous electric motor application to a winder drive.

The article is devoted to analysis of application of an asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor to electric drive of a rolling mill strip winder or a rolled metal processing line, with utilization of different motor speed frequency control systems.

Key words – asynchronous motor, strip winder, frequency control, application peculiarities.

Pentegov I.V., Rymar S.V., Volkov I.V., Larchenko B.B., Levin M.

New three-phase autotransformer phase-shifting devices for higher current harmonics suppression.

New phase-shifting autotransformer devices of higher current harmonics suppression which can be used in three-phase electrical networks without the neutral at work with 12-pulse rectifier circuits and with evenly-distributed nonlinear loads are developed. The new design of the devices improves weight-and-dimension parameters and technical and economical characteristics due to locating windings only on the edge rods of the magnetic

circuit, the central rod free.

Key words – power quality, current harmonics, autotransformers, “hexagon” circuitry, “rhomb” circuitry, “flags” circuitry, 12-pulse rectifiers.

Pleshkov P.G., Pleshkov S.P., Kotysh A.I., Soldatenko V.P.

Power supply of agricultural consumers on the basis of a complex electrical power system with utilization of renewable energy sources.

The article considers and analyzes efficiency of utilization of the most promising renewable energy sources for power supply of agricultural consumers in the context of the new Energy Policy of Ukraine.

Key words – renewable energy sources, power supply system, tariff system.

Teterko O.A.

Results of operational tests of recovered electric contacts of ekg-8 contactors in alternating current electric locomotives.

In the work, results of operational tests of electric contacts of AC locomotive contactors EKG-8 are presented, the contacts recovered through brazing with different materials. Results of measurement of transitional resistance of the main and break contacts after exploitation are given.

Key words – electric contacts, contact materials, main and break contacts, contact brazing.

High Electrical and Magnetic Field Engineering

Baranov M.I., Nosenko M.A.

A 2D electrothermal problem for the metallic skin of an aircraft under lightning action.

In terms of a 2D temperature field approximation, results of improved analytical calculation of temperature overshoot in the high-current spark channel lock-in zone of a lightning on a flat surface of aircraft metallic skin are presented. It is shown that, due to electrothermal action, the 2/50 μ s-form pulse component of the lightning full current of 200 kA amplitude and 500 μ s duration only causes local near-surface destruction of the aluminum wall of the skin, while the constant component of the lightning full current of 200 A amplitude and 1 s duration may result in the skin fusion to significant depth.

Key words – lightning, lightning channel, pulse and constant components of lightning current, temperature, metallic skin, aircraft.

Boyko M.I., Bortsov A.V., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M.

Utilization of pulsed corona discharge with enlarged ionization zone for toxic gaseous waste conversion.

57

A plant for conversion of toxic gaseous waste by means of pulse corona discharge with enlarged ionization zone of working voltage up to 70 kV, pulse repetition frequency up to 2500 pulses per second, and low power inputs is presented. The plant is designed to work in industrial facilities where conversion of gaseous waste is required. Pulse corona discharge allows avoiding undesirable heating of the gas being converted.

Key words – pulsed corona discharge with enlarged zone of ionization (PCDEZI), toxic gaseous waste, plant for conversion of toxic gases.

Brzhezitsky V.A., Masluchenko I.N., Trotsenko E.A., Hominich V.I.

Experimental research on electric strength of a high-voltage bushing with combined insulation.

Features of a high-voltage toroidal-type transformer bushing with combined insulation are considered. Experimental equipment and measurement procedure are described.

Key words – high-voltage toroidal-type transformer, bushing, combined insulation.

Electric stations

Voronovskiy G.K., Sergeev S.A., Starkov K.A., Abashkina O.S.

Estimation of marginal increment of electrical load in distributing network 110 kV caused by domestic load growth.

Necessary investments for distributing network 110 kV development are estimated. A sequence of

68

stages aimed at reconstruction of the network components that allow to increase their transmitting capability is proposed. A marginal increment of electrical load that permits functioning of the network without reconstruction is evaluated.

Key words – domestic electrical load, distributing network reconstruction.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ І ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В НАУКОВО-ПРАКТИЧНОМУ ЖУРНАЛІ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

Шумилов Ю.А., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПІ", кафедра "Електромеханіка"
тел. (044) 241-76-38

Клименко Б.В., д.т.н., проф.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"
тел. (057) 707-62-81, факс (057) 707-66-01, E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

Текст анотацій українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).

Текст анотацій на російській мові, до 5 рядків.

ВСТУП

У журналі публікуються результати досліджень і огляди у області електричних машин і апаратів, сильних магнітних полів і теоретичної електротехніки, що не публікувалися раніше, методичні матеріали по напрямках підготовки "Електротехніка" і "Електромеханіка", а також інформаційні матеріали за профілем журналу.

Пакет документів, що направляється в редакцію повинен містити:

1) у друкованому варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал (1 екз.) виконаний на аркушах паперу формату А4 густиною 80 - 90 г/м², віддрукований на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi;

— акт експертизи з печаткою (для громадян України). Офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн);

— рецензія (підписується доктором наук і засвідчується печаткою);

— копія документа про оплату за публікацію.

2) в електронному варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал, виконаний у відповідності до даних вимог (без колонтитулів і нумерації сторінок);

— анотація англійською мовою (автори, назва статті, анотація, ключові слова);

— відомості про авторів (прізвище, ім'я, по-батькові повністю, дата народження, місце роботи, посада, основні напрями наукової діяльності).

Анотація і відомості про авторів виконуються у вигляді окремого документа Microsoft Word і з довільним форматуванням.

Оригінал статті або інформаційних матеріалів готується тільки з використанням редактора Microsoft Word однією з трьох мов: українською, російською або англійською.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТІ

Всі розділи документа повинні містити поля: зліва, справа, зверху – по 20 мм, знизу – 25 мм. Заповнення останньої сторінки повинне бути не менше 80%.

Заголовок статті містить:

— код УДК;

— назва статті (Times New Roman 12pt, жирний, розміщення по центру, заголовні букви, не допускаються перенесення);

— список авторів, вчений ступінь (при необхідності звання і посада), назва організації, поштова адреса, контактні телефони (факс, E-mail). Для авторів різних організацій список приводиться по даній вище формі; — анотації статті українською (обов'язково тільки для громадян України) і російською мовою, обсягом до 5 рядків кожна, оформляються шрифтом Times New Roman 9 pt, жирний, курсив.

Між елементами заголовку статті робиться інтервал в один рядок 10 pt.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Текст розміщується у двох колонках, відстань між якими 5 мм. Абзацні відступи (червоний рядок) – 7,5 мм. Текст набирається шрифтом Times New Roman 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Допускається розділення тексту на розділи. Назва розділу оформляється заголовними буквами і центрується, нумерація – не обов'язкова (розділи ВСТУП, ВИСНОВОК і ЛІТЕРАТУРА, якщо такі є, не нумеруються). Перед назвою розділу вставляється один порожній рядок.

Рисунки і широкі таблиці допускається розміщувати в одну колонку. Назва виконується шрифтом розміром 9 pt. Допускається використання рисунків і таблиць без назви: Рис. 1, Табл. 1.

Таблиця 1

Розміри полів тексту статті

Поле зліва	20 мм
Поле справа	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Рисунки розташовуються у окремих абзацах, з вирівнюванням по центру і оформляються як окремі об'єкти, виконуються в редакторі рисунків Microsoft Word або вставляються в текст статті у форматі *bmp* або *jpg*.

Розташування рисунка поверх тексту і застосування альбомної орієнтації не допускається.

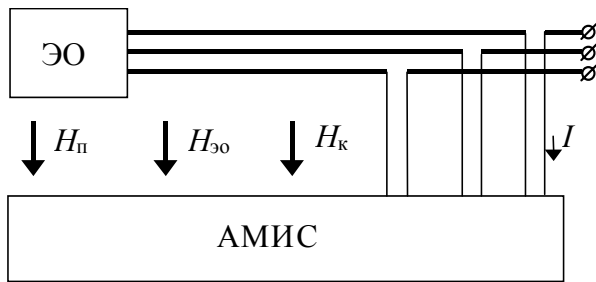


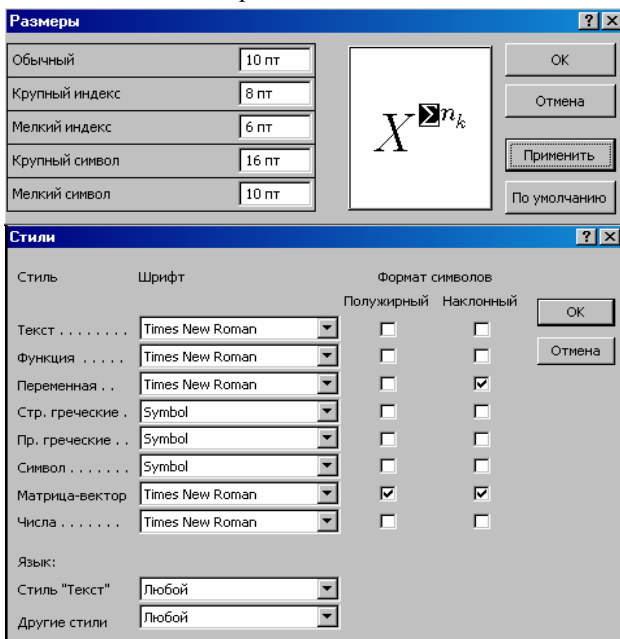
Рис.1. Функціональна схема пристрою

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів тільки в редакторі формул Microsoft Equation, розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер притиснутий до правої сторони колонки. За формулою має слідувати розділовий знак, а якщо формула містить пояснення, то вони повинні починатися з нового абзацу із слова "де" без відступу

$$N = \frac{\tau_{u \max}}{T_{k \text{ внутр}}}, \quad (1)$$

де $\tau_{u \max}$ - ..., $T_{k \text{ внутр}}$ - ...

Настройки редактора формул для меню "Розмір" і "Стиль" символів представлені нижче:



Кириличні символи у формулах повинні бути виконані в стилі "Текст".

Щоб уникнути різного роду накладень символів у формулах не рекомендується застосовувати символ ділення /, букву ℓ , а також змінювати розмір об'єкту формули. Крім того, необхідно використовувати символ множення у вигляді крапки.

Великі вирази і рівняння необхідно записувати в декілька рядків

$$Y = \varphi_0(S_n) + \gamma_0 \cdot \int_{S=0}^{S_n} \varphi_0 \cdot \sin(S_n - S) \cdot dS + \gamma_0^2 \cdot \int_{S=0}^{S_n} P_0(S) \cdot \cos(S_n - S) \cdot dS. \quad (2)$$

Символи у формулах і в тексті статті повинні мати однакові зображення.

Перелік літератури розміщується в кінці тексту. Розмір шрифту - 9пт. Після відступу одного порожнього рядку (10пт) від основного тексту по центру колонки розташовують слово ЛІТЕРАТУРА. Нумерація джерел – у порядку посилань по тексту або в алфавітному порядку, номер поміщається у квадратних дужках з виступом.

ВИСНОВОК

Якщо Ви робите посилання на формули, рисунки, таблиці або літературу, необхідно використовувати наступні позначення: (1), (1) і (2), (1) – (4); рис. 1, рис. 1,а, рис. 1 і 2; табл. 1, табл. 1 і 2; [1], [1 – 3, 5].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] P.V. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, Apr. 1997, pp. 370-377.
- [2] Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 272 с.
- [3] Лавров В.Я. Численно-аналитический метод расчета помехонесущих магнитных полей // *Техн. электродинамика.* – 1983. - № 61. - С. 18-21.
- [4] Пат. 14813 А Україна. МКИ G 01 R 33/24. Спосіб визначення залишкової та індукованої складових компонента магнітної індукції статичного зовнішнього магнітного поля ферромагнітного виробу / А.В. Єрисов, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов та ін.— №95125251; Заявлено 12.12.95; Опубл. 30.06.97. Бюл. №3. — 6 с.
- [5] Минкевич А.В. Физическое пространство — время и релятивистская космология // *Тез. докл. 10-й Росссийск. Гравитац. конф. "Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации"* (г. Владимир, 20-27 июня 1999 г.). — М.: РГО, 1999. — с. 84.

В кінці статті, через інтервал в 1-2 рядки розміром 10пт, мовою оригіналу вказують дату надходження статті в редакцію журналу (розмір 9пт, курсив, розташування по правому краю). Наприклад:

Поступила 02.07.2007

або

Надійшла 02.07.2007

Матеріали приймаються за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна

Електронні варіанти матеріалів по E-mail: kbv@kpi.kharkov.ua eie@kpi.kharkov.ua

Довідки за телефонами: (057) 707-62-81 Клименко Борис Володимирович, Злуніцина Наталя Ростиславівна

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Електротехніка і Електромеханіка
Электротехника и Электромеханика
Electrical engineering & Electromechanics
2007'4

ISBN 966-593-254-3



Технічне редагування:

Смельянов Вадим Леонідович

т. (057)707-69-76

E-mail: evl@kpi.kharkov.ua

Секретар редакції:

Злуніцина Наталя Ростиславівна

т. (057)707-62-81

E-mail: seb@kpi.kharkov.ua

Підписано до друку 03.07.2007 р.

Формат 60 × 90 1/8. Папір Prima Copy

Друк - офсетний. Ум. друк. арк. 9,8.

Наклад 300 прим. 1-й завод - 107. Зам. № 663. Ціна договірна.

НТУ "ХПІ". 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

КП Друкарня №13. 61002, Харків, вул. Артема, 44
