

**Недашковський Юрій**  
доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін  
**Кучма Олександр**  
доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін  
Криворізький державний педагогічний університет

## **МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИКЛАДАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ПРИ ВИВЧЕННІ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

*Обговорюються деякі питання, які стосуються методичних принципів викладання розділу «Трансформатори», як частини курсу «Електротехніка».*

**Ключові слова:** *методичні, викладання, трансформатори.*

*Обсуждаются некоторые вопросы, касающиеся методических принципов преподавания раздела «Трансформаторы», как части курса «Электротехника».*

**Ключевые слова:** *методические, преподавания, трансформаторы.*

*Some questions are discussed, concerning methodical teaching of using in the partition «Transformers», as part of the course «Electrical engineers».*

**Key words:** *methodical, teaching, transformers.*

Метою роботи є покращення методики викладання теми курсу «Електротехніка» при вивченні трансформаторів для кращого засвоєння та ефективного поєднання теоретичних знань і практичних навичок. Трансформатор – один з найбільш поширених видів електротехнічного обладнання. Електроенергія, що генерується на електростанціях піддається багатократній трансформації; отже, загальна потужність трансформаторів у 7–8 разів перевищує встановлену потужність генераторів на електростанціях. Крім того, слід звернути увагу студентів, що незважаючи на високий к.к.д. трансформаторів (до 99%), теплові втрати енергії в них в абсолютному виразі можуть досягати дуже великої величини. Тому потужні трансформатори (понад 750 кВА) мають різного виду масляне охолодження (природне масляне, природне масляне і форсоване повітряне, водомасляне). Масло використовується не тільки для відведення тепла в навколишнє повітря, але і

для кращої ізоляції струмів провідних частин між собою і від бака.

Враховуючи, що програма вимагає від студентів при виконанні лабораторної роботи визначення струмів холостого ходу, короткого замикання і визначення к. к. д. трансформатора, слід дати уявлення про втрати у сталі ( $P_c$ ), втрати в міді ( $P_m$ ) і розкрити причини, які впливають на величину к.к.д. трансформатора. Втрати в сталі залежать від максимального значення магнітної індукції і в силу сталості магнітного потоку не залежать від навантаження. При холостому ході трансформатора, коли струм споживання нікчемно малий, втрати в міді малі і споживана потужність визначається лише потужністю втрат в сталі. При короткому замиканні і встановленні номінального струму у вторинній обмотці шляхом зниження напруги на первинній (напруга на первинній обмотці при короткому замиканні вторинної обмотки складає 5–12% від номінального значення) ми будемо мати нікчемно малу індукцію в сталі, а тому можна вважати, що споживана потужність визначається потужністю втрат тільки в міді обох обмоток трансформатора ( $P$ ). Після вивчення однофазного трансформатора вказуємо, що наявність двох електрично не пов'язаних обмоток не є необхідною умовою для перетворення напруги. Можна скористатися тільки однією обмоткою, частина витків якої одночасно належить до первинного та вторинного ланцюгів. Схема обмотки такого трансформатора, якій отримав назву автотрансформатора, винайденка видатним російським електротехніком М.О. Доливо-Добровольським. Його обмотка розташовується також на замкнутій серцевині. Спеціальні автотрансформатори (ЛАТР) дають можливість плавного регулювання напруги від нуля до максимуму. Неодмінно слід роз'яснити студентам, що автотрансформатори мають обмежену область застосування і зовсім не підходять для перетворення високої напруги в низьку, тому що один з проводів низьковольтної мережі відносно землі має потенціал, рівний потенціалу високовольтній мережі, що вимагає застосування посиленої ізоляції в низьковольтній мережі, а, крім того, це може стати причиною важких нещасних випадків. Тому автотрансформатори мають завжди дуже низький коефіцієнт трансформації. Крім відомих студентам прикладів застосування трансформаторів, вони також застосовуються і для розширення меж вимірювань приладів на змінному струмі, про що варто коротко їм повідомити. Тому для включення вольтметрів використовуються вимірювальні трансформатори напруги. Для включення амперметрів використовуються вимірювальні трансформатори струму. Для включення ватметрів застосовуються і трансформатори струму і трансформатори напруги. Студенти мають бути ознайомлені зі схемами включення вимірювальних трансформаторів.

Перш за все студент повинен чітко розуміти причини, що викликали необхідність створення трансформаторів, і умови, які дозволили вирішити проблему. При цьому важливо розкрити, характерну закономірність науково-технічного прогресу, відповідно до якої для успішного вирішення великої науково-технічної проблеми завжди існують об'єктивні соціально-економічні передумови. В останній чверті XIX століття у зв'язку з бурхливим розвитком промисловості все гостріше відчувалася необхідність в економічній передачі великої кількості електроенергії на далекі відстані. Дослідження показали, що найбільш ефективний шлях вирішення проблеми – підвищення напруги мереж електропередачі. Тому з усією гостротою було поставлено завдання створення високоекономічних трансформаторів. А можливість її рішення була зумовлена успіхами наукових досліджень в галузі електротехніки, величезним досвідом інженерних і конструкторських розробок різних електротехнічних пристроїв, досягненнями електроізоляційної техніки, металургійної промисловості та інших галузей промисловості.

На початку вивчення дисципліни «Електротехніка» викладач говорить про те, що для спрощення аналізу процесів в реальному електричному колі їх можна представити у вигляді математичної моделі, що складається з ідеальних елементів, які враховують процеси як незворотного перетворення енергії, так і обміну енергією між джерелом живлення і електричними і магнітними полями. Отже, ми абстрагуємося від реальних електротехнічних об'єктів, виділяючи в них основне, необхідне для розуміння. Точно так само при вивченні трансформатора спочатку слід розглядати ідеальний трансформатор, який відрізняється від реального відсутністю опору обмоток і полів розсіювання. Таке припущення значно спрощує аналіз найбільш характерних фізичних процесів реального трансформатора, зокрема принцип дії трансформатора. При розрахунках електричних кіл, в яких трансформатор є сполучною ланкою, зручно користуватися схемами заміщення. Але для цього магнітний зв'язок між первинною і вторинною обмотками трансформатора замінюють електричним, тоді аналіз всього ланцюга значно спроститься. Іншими словами, використовується можливість замінити реальний трансформатор абстрактним, приведеним. Схеми заміщення можуть бути різними, в тому числі і спрощеними, залежно від того, які фізичні процеси, що відбуваються в ньому, становлять інтерес.

Однак складність і короткочасність цих процесів не дозволяють повною мірою проаналізувати їх. Таким чином, знову виникає питання про допустимі спрощення, що дозволяють з'ясувати основний характер реальних явищ. При аналізі різних типів сучасних трансформаторів необхідно показати, що при їх розробці інженерам і вченим доводиться стикатися, здавалося б, із

суперечливими явищами і показниками, комплексно вирішувати складні науково-технічні питання, прагнучи підвищити техніко-економічні показники, зменшити габарити і об'єм масла, знизити втрати, підвищити надійність трансформаторів. При цьому потрібно вміло показати необхідність творчого підходу в практичній інженерній діяльності, зокрема, в оцінці суперечливості та взаємозв'язку різних позитивних і негативних факторів. Таким чином, міжпредметні зв'язки (електрофікація, креслення, економіка) служать надійною основою для широкої орієнтації у виробництві, стимулюють творчий початок і рішення проблем із застосуванням різних наук. На міжпредметній основі пошук рішення проблем відрізняється шириною охоплення різних сторін виробництва, його техніки, технології, безпеки, організації і економіки. В останні роки в нашій країні та закордоном широко використовують різноманітні навчальні і контролюючі комплекси, система яких, впроваджується в процес навчання та називається «індустріалізацією навчання». Вважаємо необхідним обережно відноситися до подібних нововведень, але деякі автори вважають, що в цій «індустріалізації» закладені великі перспективи. Насправді, можливість навчання студента за будь-яким складним алгоритмом при одночасному індивідуальному навчанні великої групи студентів (кількість яких залежить від складності навчаючих програм, швидких дій і пам'яті комп'ютера) безумовно може дати значний ефект. Цей ефект досягається при використанні комп'ютера в консультативно-інформаційних системах, дозволяючи здійснювати швидкий пошук інформації і видачу її в зручній для сприйняття формі.

Виключний вплив на розвиток трансформаторів зробило застосування нових матеріалів, зокрема трансформаторної (легованої) сталі. В останні роки в міру подальшого вдосконалення технології виробництва, використання новітніх магнітних і ізоляційних матеріалів, впровадження методів розрахунку і проектування на основі ЕОМ успішно розробляються і випускаються різноманітні конструкції трансформаторів, в тому числі унікальних типів. Застосування нових матеріалів, що мають кращі магнітні характеристики, вимагає зміни конструкції трансформатора. Це стосується, зокрема, до використання холоднокатаної сталі, що має велику магнітну проникність і індукцію насичення і менші магнітні втрати в порівнянні з гарячекатаною. В одній і тій самій конструкції завжди співіснують взаємовиключні, на перший погляд, суперечливі тенденції. Так, наприклад, перевагами конструкції броньового трансформатора є більш короткий магнітний ланцюг і простота обмоток з-за меншого числа витків. Проте є і ряд недоліків (у порівнянні зі стрижневим трансформатором): менша доступність обмотки для охолодження, великі витрати ізоляційних матеріалів при високих напругах, складність огляду і ремонту. При виготовленні спеціальних трансформаторів (наприклад, пічних), що розраховані на великі струми при низькій напрузі, броньова конструкція більш краща.

Вимоги, що пред'являються до конструкцій обмоток трансформаторів, також взаємно суперечливі: при зменшенні перерізу проводів зменшуються витрати міді, але зростають щільність струму і втрати, що знижує к.к.д. Можна допустити перевищення температури обмоток, але при цьому скорочуються їх надійність і термін служби. При розгляді конструкції трифазного трансформатора можна яскраво показати не аби-яку прозірливість і інженерну логіку у вирішенні виникаючих протиріч М.О. Доливо-Добровольським. Він вперше звернув увагу на те, що загальмований асинхронний двигун є багатофазний трансформатор. Вектори магнітних потоків в трифазній симетричній системі зміщені що до один одного на кут 120 градусів. Тому, щоб магнітна система трансформатора була симетричною, вона повинна мати просторову форму з трьома стрижнями, на яких розташовані обмотки. Перший такий трансформатор був радіального типу і нагадував асинхронний двигун з виступаючими (трьома) полюсами, у яких усунутий повітряний зазор, а обмотки ротора перенесені на стрижні. Однак складність технології виготовлення трансформаторів з просторовим магнітопроводом і значні відходи трансформаторної сталі при штампуванні окремих листів змусили Доливо-Добровольського спростити конструкцію і створити широко поширений трансформатор з паралельним розташуванням трьох стрижнів в одній площині. При цьому він скористався тим, що векторна сума потоків дорівнює нулю, і створив дуже просту технологічну конструкцію, яка витримала випробування часом.

На прикладі еволюції магнітопровода трансформатора можна наочно проілюструвати одну з характерних закономірностей розвитку техніки – повернення до старих ідей на основі досягнень науково-технічного прогресу. Так, підвищення технічного рівня трансформаторобудування, освоєння виробництва рулонної холоднокатаної сталі і використання для обмоток алюмінієвої фольги та стрічки дозволили створити ряд конструкцій потужних трифазних трансформаторів з просторовим магнітопроводом (по «системі» Доливо-Добровольського), що відрізняються високими техніко-економічними показниками. Такі трансформатори випускаються відомими зарубіжними фірмами (наприклад, швейцарської «Броун-Бовері»). В нашій країні широкого поширення набули трансформатори з просторовим магнітопроводом потужністю до 560 кВА, що випускаються для потреб сільського господарства, транспортного будівництва та ін.

Особливо важливе значення має висвітлення питань економіки та економічної ефективності при розгляді розвитку і вдосконалення конструкцій трансформаторів і при оцінці їх режимів роботи і експлуатаційних особливостей. Проектування будь-якого промислового об'єкта здійснюється

на основі всебічного аналізу технічних та економічних показників. До технічних показників відносять в першу чергу надійність та довговічність, ступінь автоматизації, зручність експлуатації і ремонту об'єкта, безпеку його обслуговування. Економічні показники визначають як початковими (капітальними) вкладеннями і щорічними (поточними) витратами, так і ефективністю використання обладнання, режимами його роботи, втратами енергії в трансформаторі.

Необхідно зазначити, що техніко-економічні характеристики трансформаторів мають найважливіше значення, тому і на лекціях, і при проведенні лабораторних занять слід звернути увагу студентів на особливості конструкції, вибору матеріалів та технології виготовлення магнітопровода і обмоток, а також і інших елементів (наприклад, систем охолодження) трансформатора. Студент повинен зрозуміти, чому важливо вибрати оптимальну амплітуду магнітної індукції в магнітопроводі трансформатора. При малій величині сталь не буде повністю використовуватися і трансформатор буде більш громіздким і важким, навпаки, при надмірно великій величині індукції будуть великі втрати в магнітопроводі, так як вони пропорційні квадрату індукції, і в міді обмоток (через збільшення струму холостого ходу). Тому не випадково величина індукції для трансформаторів береться від 1 до 1,7 тесла (чим потужніший трансформатор і інтенсивніше його охолодження, тим більше індукція).

Необхідно також підкреслити особливість режиму роботи трансформатора, яка полягає в тому, що його первинна обмотка практично не відключається від мережі, а навантаження трансформатора протягом доби і в залежності від пори року істотно змінюється. Тому при проектуванні трансформатора прагнуть знизити втрати холостого ходу і забезпечити максимум к.к.д. при середньому, а не номінальному навантаженні (коефіцієнт навантаження, як відомо, становить 0,5–0,7). Корисно підкреслити, що втрати холостого ходу навіть у трансформаторів невеликої потужності по абсолютним значенням досить великі. Так, наприклад, втрати холостого ходу трифазного трансформатора порівняно невеликої потужності (ТМ-5600/35) складають 18,5 кВт; такої потужності достатньо для електрозабезпечення десяти квартирної житлового будинку.

Техніко-економічні питання роботи трансформаторів повинні розглядатися і при висвітленні проблем економії та раціонального користування електроенергії, поліпшення коефіцієнта потужності установок. Трансформатори поряд з асинхронними двигунами є основними споживачами реактивної потужності, пов'язаної з утворенням змінного магнітного поля (до

20–25%). Завантаження реактивної потужністю ліній електропередачі та трансформаторів зменшує їхню пропускну здатність і викликає необхідність збільшення числа або номінальної потужності трансформаторів. Раціоналізація роботи трансформаторів, заміна малозавантажених трансформаторів або відключення їх в години малих навантажень – один з ефективних природних шляхів підвищення коефіцієнта потужності промислових підприємств. В час коли в країні величезна проблема у впровадженні енергосберегаючих технологій студенти повинні знати, що одна з найактуальніших науково-технічних проблем в області електромашинобудування – охолодження машин і трансформаторів. Підвищення одиничної потужності трансформатора обумовлено розвитком і вдосконаленням способів його охолодження. Як приклад вирішення суперечливих тенденцій можна коротко розглянути шляхи підвищення ефективності використання мінерального масла, що служить як для відводу тепла від нагрітих обмоток, так і в якості додаткової ізоляції. Необхідно ознайомити студентів і з основними напрямками наукових досліджень та конструкторських розробок, що будуть виконані з метою підвищення техніко-економічних показників трансформаторного устаткування, зниження втрат, підвищення електродинамічної стійкості обмоток, вдосконалення технології виробництва, впровадження прогресивних методів розкрою рулонної сталі, інтенсифікації систем охолодження і використання явища надпровідності. По перше велика увага приділяється вдосконаленню розрахункових методів проектно-дослідних робіт із застосуванням ЕОМ. Говорячи про майбутнє трансформаторобудування, викладач повинен переконливо показати студенту, що, які б унікальні конструкції не були створені сьогодні, вони є лише сходинкою на шляху створення ще більш потужних і сучасних трансформаторів. Кожен викладач технічної дисципліни повинен добре розуміти, що найважливіші принципи і закони матеріалістичної філософії опосередковано виступають і як методи аналізу технічних наук: вони відображаються у всіх видах науково-технічної діяльності – дослідної, проектно-конструкторської, виробничій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Уварова Л.И. Научный прогресс и разработка технических средств / Уварова Л.И. – М. : Наука, 1973. – 127 с.  
Недашковський Ю.В. Методологія навчання студентів основам техніки автоматизації / Ю.В. Недашковський, О.І. Кучма / Збірник наукових праць. Педагогічні науки. Випуск 46. – Херсон : Видавництво ХДУ, 2007 – С. 310–313.