

УДК 621.313.333

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.170.2017.111280>

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЇВ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Канд. техн. наук І. В. Хоменко, старш. викл. О. М. Федосєнко, асп. І. В. Стасюк
(НТУ «Харківський політехнічний інститут»)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ РПН СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук И. В. Хоменко, старш. препод. Е. Н. Федосеенко, асп. И. В. Стасюк
(НТУ «Харьковский политехнический институт»)

IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER TRANSFORMERS OLTC DEVICES

Cand. of Techn. Sciences I. V. Khomenko, Senior Lecturer O. M. Fedoseenko,
graduate student I. V. Stasiuk

Встановлено, що одним із способів підвищення надійності роботи силового трансформатора є підвищення надійності роботи його пристрою регулювання під навантаженням (РПН). Наведено статистику відмов його окремих елементів, показано, що особливо ненадійними елементами пристрою РПН є привод і контактор. Для підвищення надійності розглядається можливість його розроблення на базі двигуна з ротором, що котиться (ДРК). Проведено критичний аналіз сучасних пристроїв РПН і пропонуваного технічного рішення. На основі загальної теорії електромагнітного поля розроблено методику і алгоритм розрахунку нових типорозмірів ДРК для пристроїв РПН силових трансформаторів. Проведено аналіз експлуатаційної надійності пристроїв РПН на основі статистичних матеріалів, розраховані основні показники надійності його елементів. Показано перспективу розвитку нового пристрою РПН.

Ключові слова: силовий трансформатор, пристрій РПН, двигун з ротором, що котиться, експлуатаційна надійність.

Установлено, что одним из способов повышения надежности работы силового трансформатора является повышение надежности работы его устройства регулирования под нагрузкой (РПН). Приведена статистика отказов его отдельных элементов, показано, что наиболее ненадежными элементами устройства РПН являются привод и контактор. Для повышения надежности рассматривается возможность его разработки на базе двигателя с катящимся ротором (ДРК). Проведен критический анализ современных

устройств РПН и предлагаемого технического решения. На основе общей теории электромагнитного поля разработана методика и алгоритм расчета новых типоразмеров ДКР для устройств РПН силовых трансформаторов. Проведен анализ эксплуатационной надежности устройств РПН на основе статистических материалов, рассчитаны основные показатели надежности его элементов. Представлена перспектива развития нового устройства РПН.

Ключевые слова: силовой трансформатор, устройство РПН, двигатель с катящимся ротором, эксплуатационная надежность.

It is established that one of the effective ways to improve the reliability of the power transformer as a whole is to increase the reliability of its on-load tap-changer (OLTC). As a result of the analysis of statistical material obtained under real operating conditions (the number of transformers is 1000 pieces, the observation period is 4 years), the failure statistics of its individual elements are given. It is shown that the most not reliable elements of the OLTC are the drive and the contactor. To improve the reliability of the OLTC, the possibility of its development on the basis of an engine with a rolling rotor is considered. A critical analysis of modern OLTC and the proposed technical solution is carried out. The technical and economic feasibility of developing and implementing a new device has been established. On the basis of the general theory of the electromagnetic field, a technique and an algorithm for calculating new sizes of an engine with a rolling rotor for OLTC of power transformers has been developed. The analysis of operational reliability of OLTC based on statistical materials is carried out; the main reliability indices of its elements are calculated. It is established that the introduction of a new technical solution will increase the reliability of the OLTC by 25% and the power transformer by 2-4%. The perspective of the development of a new OLTC device is presented.

Keywords: power transformer, on-load tap-changer, motor with rolling rotor, operational reliability.

Вступ. Трансформаторне обладнання є одним з найважливіших елементів електричної мережі. З точки зору ефективного управління режимом мережі, найбільший інтерес для фахівців становить система регулювання напругою трансформатора [1]. Це обумовлено тим, що рівні напруги у вузлових точках електричної мережі спільно з компенсацією потоків реактивної потужності в основному визначають втрати потужності і втрати напруги в цих мережах. Тому надійна експлуатація пристроїв регулювання напруги є важливою науково-технічною задачею, над якою працює значна кількість фахівців як у нас у країні, так і за кордоном [2].

Досвід експлуатації і основні дефекти пристроїв РПН. Пристрій регулювання напруги силових трансформаторів під навантаженням (РПН) за своїм виконанням є складним і часто недостатньо

надійним вузлом силового трансформатора [3]. В той же час РПН може призвести до серйозного пошкодження трансформатора в цілому, а в крайньому випадку – до пожежі і вибуху. Відомо, що до 40 % катастрофічних аварій трансформаторів пов'язані з пошкодженнями РПН [4].

Сучасні пристрої РПН мають такі основні складові частини: контактор, пристрій, що обирає (вибирач), приводний механізм, струмообмежувальний опір [4]. Ефективність роботи перемикача числа витків під навантаженням у значній мірі визначається роботою його контактора і привода.

З кінця XX століття застосовуються перемикачі числа витків з вакуумними вимикачами. Вакуумні вимикачі характеризуються низькою ерозією контактів, що дає змогу перемикачам числа витків виконувати більшу кількість операцій між

обов'язковими профілактичними роботами. Однак конструкція в цілому стає більш складною.

Також на ринку виникали експериментальні перемикачі числа витків, в яких функція перемикання виконується силовими напівпровідниковими елементами. Ці моделі також спрямовані на те, щоб скоротити простої на проведення технічного обслуговування.

Залежно від пропонованих вимог до регулювання напруги і особливостей конструкції трансформаторів у даний час застосовують різні схеми регулювання і різні типи пристроїв РПН, що відрізняються між собою технічними характеристиками і конструктивним виконанням.

Регулювання напруги силових трансформаторів, як правило, має здійснюватися в автоматичному режимі і досить надійно. Однак не завжди в енергосистемах пристрій РПН використовується в автоматичному режимі. Головна причина цього – недостатня надійність пристроїв РПН. Найбільш ненадійними елементами сучасних пристроїв РПН, як показав аналіз пошкоджень, є пошкодження приводів. Цей вид пошкоджень найбільш часто трапляється в експлуатації.

Причинами відмов приводів є залипання контактів пускачів, пошкодження кулачкових елементів, відмова кінцевих вимикачів, виткові замикання електродвигунів привода через зволоження, відсутність або недостатній обігрів, що не забезпечує нормальну роботу елементів пристроїв привода. Зокрема, пошкоджуються контролери типу 57212/4000 приводів М32 виробництва Болгарії. У контролерах виходить з ладу ролик через механічний зніс. У приводах М32, М34 пошкоджуються також кінцеві і захисні вимикачі. Ущільнення кришки приводів, виготовлене з недостатньо якісного гумового шнура, прокладка такого шнура в каналі корпусу не може забезпечити потрібну герметичність. З цієї причини апаратура і різні сполучні колодки

привода схильні до окислення і покриття іржею і пилом. Через недосконалість автоматики привода його обігрів недостатньо надійний. У пристроях РПН є течі. Найбільш часто виникають течі масла з-під скла покажчика положення, у вузлі черв'ячної передачі на несучому фланці регуляторів через порушення сальникових ущільнень [5].

Відзначено підгоряння контактів вибирача. Цей недолік у ряді випадків в енергосистемах усувається посрібленням контактів. Підгоряння сприяють недостатні натискання контактів і чистота обробки поверхні контактів вибирача.

Недостатня міцність кріплення болтів контактора і їх конструктивне виконання значно ускладнюють ревзію, коли доводиться виймати увесь перемикальний пристрій з бака трансформатора.

Через неможливість зливу масла з контактора через засмічення сифона для повного видалення масла доводиться застосовувати продування повітрям.

Зазначено випадки, коли при транспортуванні пристроїв РПН типу РС у північні райони після прибуття трансформатора в пристроях виявляється шар льоду товщиною 23 см. Тому при тривалому транспортуванні трансформаторів з такими пристроями необхідно вживати заходи щодо запобігання зволоженню.

Привод типу ГЩП4у має недоліки: кулачкові елементи приводів недостатньо надійні, пошкоджується пластмасовий корпус, відзначено зсув контактної важеля. Через порушення ущільнення вертикального вала можливе проникнення вологи в шафи привода. Поширеним недоліком приводів ПДП4у, як усіх приводів, є залипання контактів або збільшення часу повернення пускачів під час перемикання через забруднення робочих поверхонь сердечника пилом і мастилом. Залипання контактів пускачів викликає неприпустиме переміщення рухомих елементів пристрою в одне з крайніх положень [6].

Це призводить до небажаних наслідків:

1) різкого підвищення або зниження напруги на шинах підстанції в разі трифазного пристрою РПН;

2) несиметрії напруг між фазами при однофазних пристроях РПН, що викликає спрацьовування земляних захистів і відключення трансформатора;

3) виходу привода за крайні положення при відмові кінцевих вимикачів із пошкодженням перемикального пристрою та виводу трансформатора з роботи.

Зменшення наслідків від замикання контактів магнітних пускачів шляхом ускладнення схем управління привода не полегшує і не спрощує експлуатацію. Як і будь-яке ускладнення, це призводить до більшої ймовірності пошкоджень [7].

Ревізія пускачів пов'язана з демонтажем і повним розбиранням пускачів.

Реакторні пристрої РПН, що були на трансформаторах ранніх випусків, мають конструктивні недоліки, досить відомі в експлуатації, зокрема великі люфти в кінематиці привода, які утворюються в результаті зносу бакелітових валів між фазами перемикального пристрою в місцях з'єднання з металевими валами (при певному напруженні відбувається "розбивання" отворів шпильками). Поява недопустимих люфтів призводить до викривлення кругової діаграми, і, як наслідок, виникає неузгодженість у роботі перемикального пристрою, що врешті-решт призводить до пошкодження окремих елементів пристрою РПН. Періодична заміна бакелітових валів усуває люфт; вона є складною, але вимушеною роботою з підтримки перемикального пристрою в працездатному стані.

В експлуатації на реакторних перемикальних пристроях через недосконалість способу захисту масла гетинаксова перехідна плита і масло контактора схильні до зволоження. При порушенні ущільнень у маслі кріплення

контактів контактора в згаданій перехідній плиті, а також через порушення сальника вала перемикального пристрою можливе перетікання масла з бака трансформатора в кожух контактора і далі через фільтр, що сушить повітря контактора, назовні. Таке перетікання масла (спуск масла з бака трансформатора) при недостатньому контролі за станом трансформатора може привести до виводу трансформатора з ладу.

У реакторних пристроях РПН ослаблення пресування стержнів магнітної системи реактора призводить до появи підвищеної вібрації всіх елементів конструкції, що мають зв'язок з реактором. Так, вібрація струмоведучих елементів (відводів) призводить до обриву відводів, викликає ослаблення кріплення реактора з подальшим збільшенням вібрації. Приведення реактора в нормальний стан пов'язане з виконанням значного обсягу ремонтних робіт, пов'язаних з розкриттям активної частини трансформатора. Через недостатню електричну зносостійкість контактів необхідна частіша їх заміна.

Автоматичні регулятори типів БАУРПН1, 2, АРНТ67 і АРТ1Н (включаючи БАР і блок датчика струму) використовуються слабо і тому малоефективні. Блок БАР працює досить надійно в експлуатації, але в умовах температурних перепадів навколишнього повітря в зимовий час (наприклад, при його встановленні в КРУН) зазначено пошкодження друкованих плат (мікропориви доріжок). Тому при низьких температурах (нижче 40 °С) БАР може втратити працездатність. Зазначено також, що при подальшому підвищенні температури працездатність пристрою БАР може відновитися. Оптимальне число перемикачів пристроїв регулювання РПН досягається за рахунок обґрунтованих розрахунків уставок БАР за напругою, вибором зони нечутливості і витримки часу регулятора [5].

Схильні до пошкоджень також сучасні швидкодіючі прилади РПН.

Через наявність рухомих частин трансформатори з РПН вимагають у 3-5 разів більших трудовитрат у порівнянні з нерегульованими під навантаженням. Цей фактор, а також знижена, в середньому, надійність трансформаторів з РПН мають ураховуватися при вирішенні питання про заміну або ремонт РПН.

Практика експлуатації показала, що більше 50 % витрат на ремонт трансформаторів було пов'язано з пристроями РПН. Введення з 1993 р. системи безперервного контролю РПН дав змогу збільшити число перемикачів до ремонту з 10000 до 30000 для РПН старих конструкцій і з 40000 до 60000 для нових конструкцій (з вакуумними перемикачами і резисторами) [4, 5].

Працездатність РПН у значній мірі визначає надійність трансформатора в цілому. Наявність дуги при перемиканні і складна механічна частина РПН і сьогодні є основними причинами виходу пристроїв з ладу.

Одним з перспективних способів підвищення надійності роботи пристроїв РПН є використання в їх конструктивному виконанні двигуна з ротором, що котиться (ДРК).

Основні теоретичні положення розроблення двигунів з ротором, що котиться. Двигун з ротором, що котиться, – це електромеханічний перетворювач, обертальна частина якого – ротор має механічний контакт з нерухомою частиною – статором. Під дією модульованого обертового (рухомого) магнітного поля і сили тертя ротор здійснює ексцентричний або процесійний рух відносно центру маси нерухомої частини статора.

Електромагнітні процеси, які протікають у ДРК, описуються такими рівняннями [8]:

1. Рівняння Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}, \quad (1)$$

де \vec{H} – вектор напруженості магнітного поля; $\vec{\delta}$ – вектор щільності струму провідності.

2. Рівняння електричного кола обмотки статора:

$$u = i \cdot r + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2)$$

де u – миттєве значення напруги, що прикладена до обмотки статора; i – миттєве значення струму; Ψ – миттєве значення потокозчеплення обмотки статора; r – активний опір обмотки статора.

3. Рівняння безперервності магнітного поля двигуна:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (3)$$

де \vec{B} – вектор магнітної індукції.

4. Зв'язок між напруженістю магнітного поля, індукції і намагніченістю описується рівнянням:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (4)$$

де μ – магнітна постійна у середовищі магнітної системи.

У результаті даних рівнянь описується характер поширення магнітної індукції у повітряному зазорі машини, а так само у її магнітопроводі. Після чого визначаються механічні складові двигуна, а саме сила одностороннього магнітного тяжіння і момент:

$$P = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S_Z, \quad (5)$$

де μ_0 – магнітна постійна середовища протікання магнітних процесів; S_Z – площа магнітопроводу, через яку замикається основний магнітний потік,

$$M = P \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

де D_r – діаметр ротора досліджуваного ДРК; θ – кут навантаження ДРК.

Механічні процеси, що протікають у ДРК, дуже впливають на характер розподілу магнітного поля в повітряному зазорі машини, внаслідок його нерівномірності і постійного механічного контакту між статором і ротором. Ці механічні процеси викликають втрати моменту, які виражаються у вигляді втрат на тертя в точці контакту і механізму передачі неспіввісного обертання, облік і вплив на основний момент двигуна яких виражається в моменті опору [8]. Дана математична модель ДРК дає змогу якісно проаналізувати роботу двигуна і визначити його вихідні параметри [9].

Щодо застосування ДРК у пристроях РПН, то реалізація такого застосування є актуальним завданням, оскільки, наприклад, пара АД і низькообертовий редуктор у цих пристроях може бути замінено одним більш надійним електромеханічним перетворювачем енергії – ДРК, з урахуванням своїх конструктивно-технологічних переваг. Проведемо порівняльний аналіз використання ДРК у пристроях РПН силових трансформаторів.

Критичний аналіз сучасних пристроїв РПН і пристрій регулювання напруги з використанням ДРК. Розглянемо конструкцію пристрою РПН з приводом типу РС-3. У ньому асинхронний двигун (АД) за допомогою черв'ячної передачі приводить у рух головний вал. Живлення двигуна здійснюється трифазним змінним струмом через автоматичний вимикач. Циклічність роботи привода забезпечується багаторазовим колійним вимикачем. Внаслідок інерції мас, що обертаються, і нескладних комутацій забезпечується кожна операція перемикачів. Запуск привода здійснюється за допомогою керуючого імпульсу. Автоматичне управління здійснюється за допомогою постійного імпульсу. Привод налагоджується до введення трансформатора до експлуатації. Місця проходження вала через отвір у баку трансформатора ущільнюються сальниками,

швидкий вихід яких з ладу обумовлюється нерівностями на поверхнях вала. У місцях проходження вала його поверхню необхідно шліфувати з метою запобігання течі масла редуктора. Після монтажу привода на трансформатор знімають кругову діаграму РПН і виконують інші налагоджувальні роботи відповідно до заводської інструкції [5, 7].

Як показує досвід експлуатації, недоліками такої конструкції є:

- 1) наявність громіздкого електричного привода (АД + редуктор);
- 2) нетехнологічність експлуатації редуктора (наявність мастильних матеріалів);
- 3) додатковий підігрів пристрою РПН;
- 4) наявність режиму вибігу АД.

Достатньо технологічним є пристрій німецької фірми типу MR OILTAP® MSE 340 з моторним приводом TARMOTION® ED. Моторний привод модульного виконання призначений для узгодження робочого положення пристрою РПН. Перемикач на ступінь виконується завдяки включенню моторного привода одиночним керуючим імпульсом. Процес перемикачів завершується примусово, незалежно від того, чи були представлені інші керуючі імпульси. Наступне перемикачів можливе тільки після зупинки привода. Нагрівач для видалення конденсату виконаний у вигляді поверхневого електрорадіатора. Цей засіб обігріву забезпечує високоякісний антиконденсатний обігрів для всіх кліматичних зон і робить непотрібним застосування термостата, а також гідростата.

Редуктори, що використовуються: силові, керуючі й редуктори індикації. Силові редуктори мають пасову передачу. Керуючий редуктор – це пристрій покрокового перемикачів з кулачковими вимикачами. Шафа моторного привода має кріпитися до бака трансформатора без перекосу. Моторний привод має розташовуватися вертикально, і його вал має перебувати на одній осі (лінії) з

вертикальним валом кутового редуктора. В іншому випадку це може призвести до пошкодження моторного привода, пристрою РПН і в цілому трансформатора. У разі сильної вібрації рекомендується використовувати віброгасники. В процесі монтажу і експлуатації потрібне правильне з'єднання моторного привода з пристроєм РПН таким чином, щоб контактор переключався до зупинки моторного привода і забезпечувалася однаковість положень привода і РПН на кожному ступені. При простій протягом восьми тижнів або при перерві в роботі більше двох тижнів необхідно включати обігрів.

Безумовними перевагами моторного привода фірми MR є:

- безшумний силовий редуктор з необслуговуваною пасовою передачею;
- використання антиконденсату обігрівача поверхневого типу;
- досить висока надійність і технологічність моторного приладу.

До недоліків такого привода можна віднести:

- наявність громіздкого електричного привода (АД + редуктор);
- режим вибігу АД;
- жорсткі вимоги до монтажу моторного привода, невисока технологічність у разі сильної вібрації;
- можливість порушення працездатності внаслідок потрапляння на пас мастильних матеріалів [7].

В основу досліджень поставлено завдання підвищити надійність, ефективність і технологічність роботи моторного привода і в цілому пристрою РПН і трансформатора. Це можна досягти шляхом заміни класичної електромеханічної системи швидкохідного АД + система редукторів на високомоментний низькообертовий електродвигун (двигун із ротором, що котиться). Механічний редуктор, як відомо, служить для зниження обертів і підвищення крутного моменту. Одночасно з цим редуктор є вагомим елементом ненадійності і зниження

точності процесу регулювання. Принцип дії цих двигунів побудований на вільній обкатці ротора по поверхні статора. Ця обкатка виникає за рахунок створення нерівномірного або пульсуючого магнітного поля в електродвигуні, що створює силу одностороннього магнітного тяжіння, в результаті чого ротор притягується до статора [10]. Результируючий вектор магнітного поля рівномірно переміщається уздовж поверхні статора, захоплюючи за собою ротор, який при цьому обкатується по статору. При цьому виникає складне обертання слідування, у якому частота обертання вала прямо пропорційна різниці діаметрів статора і ротора. Завдяки такій електромагнітній редукції на валу двигуна досягаються підвищені обертальні моменти. Ексцентричне щодо осі статора обертання ротора компенсується гнучкими передачами або стандартними механічними перетворювачами типу Кардана, Сешерона, Альстома. У загальному випадку для забезпечення роботи двигуна необхідне почергове протікання струму в його обмотках, з'єднаних у зірку. При живленні двигуна з шістьма обмотками від трифазної мережі змінного струму включення кожної обмотки в мережу здійснюється через напівпровідниковий діод.

Високомоментний низькообертовий електродвигун має високу швидкодію (0.01 - 0.05 с), значний номінальний момент (1 - 100 Нм) при низькій частоті обертання і невеликі кратності пускового струму і струму короткого замикання (1.1 - 1.3 I_n). Напряга живлення (однофазного, трифазного) – 12, 220, 380 В. Номінальний струм дорівнює 0.1-5 А. Такий двигун може працювати у кроковому режимі без додаткових перетворювачів, має високу швидкодію і безінерційність. Собівартість такого двигуна – нарівні собівартості асинхронного двигуна аналогічної потужності. Конструктивна схема моторного привода на базі двигуна з ротором, що котиться, зображена на рис. 1 [11].

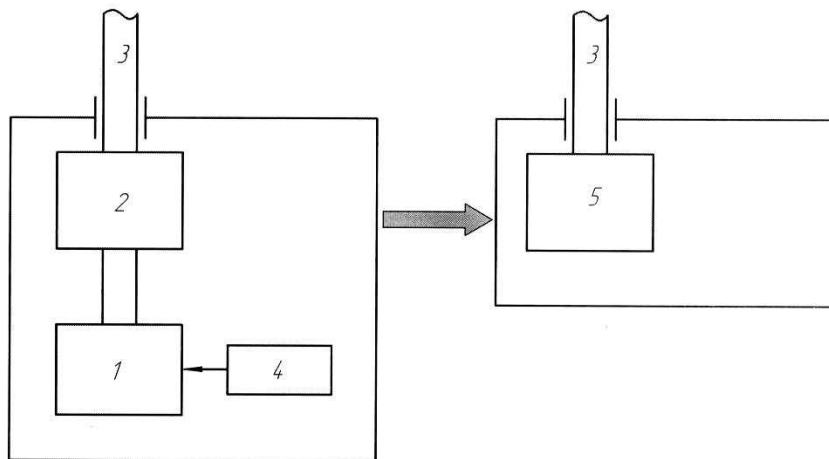


Рис. 1. Нове технічне рішення:

1 – асинхронний двигун; 2 – механічний силовий редуктор; 3 – головний вал;
4 – схема гальмування; 5 – високомоментний низькообертовий двигун (ДРК)

Розглянемо питання підвищення надійності пристроїв РПН на базі ДРК.

Аналіз експлуатаційної надійності групи трансформаторів за статистичними даними про пошкодження в пристроях РПН. Математичне моделювання експлуатаційних процесів силового обладнання в поєднанні з його властивостями надійності є одним з основних етапів при вирішенні задач надійності електроенергетичних систем.

Трансформатор, у тому числі і автотрансформатор, з точки зору теорії надійності, є відновлюваним об'єктом, який може перебувати в працездатному стані, відмовляти і переходити в неробочий аварійний стан, відновлюватися і знову переходити у працездатний стан. Крім цього, він оперативно відключається для профілактичних ремонтів або виведення в резерв. Під відмовою тут розуміється будь-яке пошкодження у трансформаторі, що призводить до необхідності його відключення. Таким чином, трансформатор може моделюватися елементом, що має три стани: працездатний, непрацездатний і планового ремонту [12]. Основними параметрами такого елемента є:

- частота відмов ω , відмов/р.;

- середня тривалість аварійного ремонту $t_{в, р./відмов}$;

- середня тривалість планового ремонту $t_{п, р./вим.}$;

- частота планових відключень $\omega_{п, вим./р.}$.

У ряді випадків можлива деталізація планових ремонтів на капітальні та поточні.

Як правило, цей мінімум показників достатній для визначення інших показників і вирішення всіх практичних завдань.

Можна зазначити, що для всіх трифазних трансформаторів відмови призводять до повного відключення об'єкта. Для трансформаторів, що складаються з групи однофазних, якщо допустимий неповнофазний режим, відмова може бути частковою [12].

На підставі вищесказаного можна проаналізувати надійність силових трансформаторів з урахуванням розподілення їх пошкоджень по вузлах і класах напруги за період січень 1997 р. – листопад 2000 р. [13].

Для силових трансформаторів напругою 110 кВ число пошкоджень у пристроях РПН за розглянутий період склало 61 пошкодження, або 18 % від усіх пошкоджень. Загальна кількість пошкод-

жень силових трансформаторів напругою 110 кВ за 4 роки склала 338 пошкоджень.

Як відомо, пристрій РПН складається з трьох основних елементів: привод, вибирач і контактор. Число відмов трансформатора через ненадійність РПН розподіляється між елементами пристрою в такому співвідношенні: привод – 50 %, вибирач – 25 %, контактор – 25 %.

Нижче розглядається експлуатація трансформаторного обладнання, починаючи з моменту після закінчення періоду припрацювання, на якому ймовірність технологічних відмов має підвищені значення. Період припрацювання в рамках даної роботи не розглядається, він вимагає специфічного підходу у зв'язку з гарантійними зобов'язаннями заводу-виготівника.

Якщо обмежитися розглядом роботи об'єкта до граничного стану, то допустимо вважати інтенсивність відмов $\lambda = const$, а відповідно частота відмов:

$$\omega(t_1, t_2) = \tilde{\omega}(t) = \lambda, \quad (7)$$

Визначимо показники надійності для кожного елемента пристрою РПН.

Частота відмов привода пристрою РПН $\omega^*(t)$, статистично може бути знайдена як:

$$\omega^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (8)$$

де $N(t)$ і $N(t + \Delta t)$ – кількість об'єктів, що залишилися в роботі на відповідні моменти часу; Δt – малий інтервал часу.

Визначимо частоту відмов трансформаторного обладнання 110 кВ через пошкодження привода РПН за даними на період з 1997 по 2000 р.

Всього відмов – 31, чисельність трансформаторів класу 110 кВ складає приблизно 1000 штук, тривалість спостереження – чотири роки:

$$\omega^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} = \frac{1000 - 969}{1000 \cdot 4} = 0,00775 \quad \text{відмов/р.}$$

Імовірність того, що час роботи привода пристрою РПН до відмови t_0 буде не менше заданого часу t , або ймовірність безвідмовної роботи за час t знайдемо із співвідношення між $P_0(t)$ та $\lambda(t)$:

$$P_0(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (9)$$

Часто для освоєного і працюючого обладнання інтенсивність відмов λ можна вважати постійною $\lambda = const$.

Потік відмов одного відновлюваного об'єкта завжди є ординарним, тому що друга відмова може відбутися тільки після відновлення. Крім того, для енергетичних об'єктів характерна стаціонарність потоку і відсутність наслідків. Для таких найпростіших потоків $\omega \sim (t) = \lambda$, а ймовірність безвідмовної роботи

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}. \quad (10)$$

Величина $Q(t)$, яка доповнює $P_0(t)$ до одиниці, являє собою ймовірність того, що за час t об'єкт відмовить:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (11)$$

Імовірність безвідмовної роботи привода пристрою РПН за час $t = 1$ рік:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,00775 \cdot 1} = 0,99228.$$

Імовірність того, що за час t привод пристрою РПН відмовить:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,00775t} = 0,00772.$$

Визначимо показники надійності інших елементів пристрою РПН аналогічно до ймовірнісних характеристик привода. Отримані показники зведені у табл. 1.

Для розрахунку надійності трансформатора через пошкодження пристрою РПН як складної системи, можна виділити два етапи. На першому вирішимо завдання відображення функціонально-

структурних зв'язків елементів з метою виявлення безлічі можливих станів системи. На другому – вирішимо завдання визначення імовірнісних показників станів системи.

Таблиця 1

Показники надійності елементів пристрою РПН

Елемент пристрою РПН	Частота відмов $\omega(t)$, відмов/р.	Імовірність безвідмовної роботи за час $t = 1$ р. $P_0(t)$	Імовірність відмови за час $t = 1$ р. $Q(t)$
Привод	0,00775	0,99228	0,00772
Вибирач	0,00375	0,996257	0,003743
Контактор	0,00375	0,996257	0,003743

З позиції надійності функціонально-структурні зв'язки елементів РПН можна зобразити в нижченаведеному вигляді.

Оскільки при відмові будь-якого з елементів пристрою відбувається відмова РПН, то з точки зору надійності можна вважати з'єднання зазначених елементів послідовним (рис. 2).

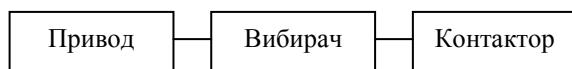


Рис. 2. Функціонально-структурні зв'язки елементів РПН

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи пристрою РПН як системи, що складається з послідовно з'єднаних елементів. Події відмов окремих елементів розглядаються як незалежні:

$$P_{0РПН}(t) = P_{0ПР}(t) \cdot P_{0ВИБ}(t) \cdot P_{0К}(t),$$

$$P_{0РПН}(t) = 0,99228 \cdot 0,996257 \cdot 0,996257 = 0,984866.$$

Частоту відмов пристрою РПН знайдемо із співвідношення (7) і (10):

$$\omega_{РПН}(t) = 0,01525 \text{ відмов/рік.}$$

Для ілюстрації цього показника знайдемо число відмов трансформаторів через пошкодження в пристрої РПН для початкових умов завдання, тобто при загальній кількості трансформаторів, рівній 1000, і часі їх роботи чотири роки. Для заданих умов число відмов трансформаторів напругою 110 кВ через РПН складатиме 61 відмову за чотири роки.

Розглянемо вплив підвищення надійності одного з елементів пристрою РПН на показники надійності трансформаторного обладнання в цілому. При підвищенні надійності роботи привода пристрою РПН у два рази, тобто при зниженні частоти відмов трансформатора через пошкодження у приводі на 50 %, частота відмов привода складатиме $\omega_{ПР}(t) = 0,03875$ відмов/р. На підставі виразів (10) і (11) (табл. 2) визначимо показники надійності привода і інших елементів пристрою РПН.

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи пристрою РПН як системи, що складається з послідовно з'єднаних елементів, з урахуванням підвищення надійності роботи привода:

$$P_{0РПН}(t) = P_{0ПР}(t) \cdot P_{0ВИБ}(t) \cdot P_{0К}(t),$$

$$P_{0РПН}(t) = 0,996132 \cdot 0,996257 \cdot 0,996257 = 0,988689$$

Таблиця 2

Показники надійності елементів пристрою РПН з урахуванням підвищення надійності роботи привода

Елемент пристрою РПН	Частота відмов $\omega(t)$, відмов/р.	Імовірність безвідмовної роботи за час $t = 1$ р. $P_0(t)$	Імовірність відмови за час $t = 1$ р. $Q(t)$
Привод	0,003875	0,996132	0,003868
Вибирач	0,00375	0,996257	0,003743
Контактор	0,00375	0,996257	0,003743

Частоту відмов пристрою РПН знайдемо із співвідношень (7) і (10):

$$\omega_{\text{РПН}}(t) = 0,011375 \text{ відмов/р.}$$

Для повного уявлення про підвищення надійності роботи трансформатора за рахунок удосконалення привода РПН

знайдемо число відмов трансформаторів через пошкодження в пристрої РПН при загальній кількості трансформаторів 1000 од. і часі їх роботи чотири роки. Для заданих умов число відмов трансформаторів напругою 110 кВ через РПН складе 45,5 відмови за чотири роки (табл. 3).

Таблиця 3

Вплив підвищення надійності одного з елементів пристрою РПН на показники надійності трансформаторного обладнання

Показники надійності	без урахування підвищення надійності роботи привода	з урахуванням підвищення надійності роботи привода
Частота відмов $\omega(t)$, відмов/р.	0,01525	0,0113
Імовірність безвідмовної роботи за час $t = 1$ р. $P_0(t)$	0,9849	0,9887
Число відмов через РПН за 4 роки	61	45,5

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Аналіз теоретичних і практичних досліджень може бути використаний для розроблення загальної концепції побудови РПН нового типу на базі ДРК. Ця концепція складається з декількох етапів і виражається в

наближенні цих технічних рішень, у поєднанні їх технологічних характеристик і можливостей. Позитивні ефекти, що виражаються в підвищенні надійності, простоти і технологічності пристроїв РПН, отримуються за рахунок використання технологічних властивостей ДРК.

Список використаних джерел

1. European Smart Grids Technology Platform // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040. – 2006. – 44 p.
2. Chakraborty A. Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids / Aranya Chakraborty, Maria D. Ilic – Springer, N.Y., 2012 – 363 p.

3. ГKD 34.46.401-96 Трансформатори силові, пристрої перемикання відгалужень обмоток трансформаторів РПН під навантаженням типів PS, SDV, SCV, SAV [Текст]: методичні вказівки з налагодження / Міністерство енергетики України. – К.: ДонОРГРЕС, 2003. – 50 с.
4. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций [Текст]: учебн. для техникумов / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
5. Баркан, Я. Д. Эксплуатация электрических систем [Текст] / Я. Д. Баркан. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.
6. Bengtsson T., Kois H., Foata M., Leonard F. Monitoring tap-changer operations. Report CIGRE 12-209, 1998.
7. Kramer A. On-Load Top-Changers for Transformers/ Operations Principels, Applications and Selection. MR-Publication, Regensburg, 1 Ausgable, 2000. – P. 172-230.
8. M. Franke, H. Mrech, "Analysis on a RRSRM with his Nonlinear Magnetic Properties", 54. IWK, Ilmenau, Germany, Sept 2009.
9. Franke M., Punk O., Mrech H., Schmucker U. Electrical actuation of a rolling rotor switched reluctance motor. – 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2011. – P. 451-456.
10. Наний, В. В. Развитие теории и создание эффективных конструктивных исполнений электродвигателей с катящимся ротором [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Наний Виталий Викторович. – Харьков: Харьковский политехнический институт, 2014. – 335 с.
11. Моторний привод пристрою регулювання під навантаженням силового трансформатора [Текст]: патент України № 45761; МПК H02P 13/00, H01F19/00/ - Власник Національний техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут»; Хоменко І.В., Наний В.В. – заяв. 2009, № 05848, Бюл. № 22. – 4 с.
12. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем. Ч. 1. Теоретические основы [Текст]: учебн. пособие / В. Г. Китушин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 256 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
13. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации [Текст] / Б. В. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53-58.

Хоменко Ігор Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +380 (057) 707-66-43. E-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Федосєєнко Олена Миколаївна, старший викладач кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +380 (050) 702-33-39. E-mail: e.n.fedoseienko@gmail.com.

Стасюк Іван Володимирович, аспірант, кафедра «Передача електричної енергії» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +380 (096) 302-54-90. E-mail: brokeyourbike@gmail.com.

Khomenko Igor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department "Electricity transmission", NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +380 (057) 707-66-43. E-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Fedoseenko Elena, Senior Lecturer, Department of "Transmission of electrical energy", NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +380 (050) 702-33-39. E-mail: e.n.fedoseienko@gmail.com.

Stasiuk Ivan, graduate student, Department of "Electricity transmission", NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +380 (096) 302-54-90. E-mail: brokeyourbike@gmail.com.

Стаття прийнята 19.06.2017 р.