

РОЗДІЛ 2

НАУКОВІ НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО ФАКТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

2.1 Вивчення проблеми

Крім надійності електрообладнання, яка закладена на стадії його проектування й виготовлення, необхідно досліджувати надійність електрообладнання, яка проявляється під час експлуатації. Процес експлуатації включає такі елементи: саме електрообладнання, організацію його експлуатації та організацію обслуговування й ремонту. Розрізняють розрахункову й експлуатаційну надійність енергосистеми та її елементів. Перша характеризує очікувану надійність електроустановок або енергосистеми в цілому, розраховану з використанням статистичних даних показників експлуатації обладнання енергосистеми. Методично розрахункова надійність може бути поділена на апаратну й схемну. Друга (експлуатаційна надійність) характеризує надійність роботи конкретного обладнання (елемента) енергосистеми, яке реально експлуатується, або надійність системи електропостачання в цілому.

Між розрахунковою та експлуатаційною надійністю є принципова різниця. При проектуванні та розвитку системи тягового електропостачання використовується розрахункова надійність електрообладнання, а при оцінці господарської діяльності експлуатованої електричної системи, з метою розробки заходів щодо поліпшення її роботи, проводиться розрахунок експлуатаційної надійності електроустановок.

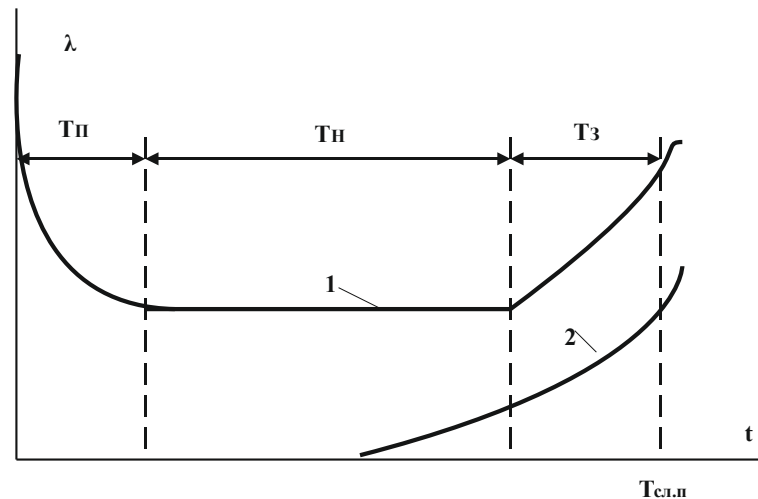
Експлуатація здійснює вирішальний вплив на надійність об'єктів, яка забезпечується шляхом:

- дотримання умов і режимів експлуатації (мастило, навантажувальні режими, температурні режими й ін.);
- проведення періодичних технічних обслуговувань з метою виявлення й усунення виникаючих порушень та підтримки об'єкта в працездатному стані;

- систематична діагностика стану об'єкта, виявлення відмов та запобігання їм, зниження шкідливих наслідків відмов тощо;
- проведення профілактичних відновних ремонтів.

Основною причиною зниження надійності в процесі експлуатації є знос і старіння компонентів об'єкта. Знос призводить до зміни параметрів об'єкта, порушення працездатності, поломки, зниження міцності й т.д. Старіння спричиняє зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, що викликає несправності або відмови.

Надійність об'єкта на стадії експлуатації можна проілюструвати графіком типової залежності інтенсивності відмов об'єкта від часу експлуатації, наведеним на рис. 2.1.



1– інтенсивність відмов $\lambda(t)$; 2– крива старіння; $T_{\text{П}}$ – період приробітку; $T_{\text{Н}}$ – період нормальної роботи; $T_{\text{З}}$ – період зносу; $T_{\text{сл.п}}$ – призначений термін служби (сумарна календарна тривалість експлуатації)

Рисунок 2.1 – Залежність інтенсивності відмов об'єкта від часу експлуатації

У період приробітку надійність, у першу чергу, визначається конструктивно-технологічними факторами, що веде до підвищеної інтенсивності відмов. У міру виявлення та усунення цих факторів надійність об'єкта досягає номінального рівня, який зберігається в тривалому періоді $T_{\text{Н}}$ нормальної експлуатації обладнання.

Протягом експлуатації в об'єкті накопичуються прояви зносу і втоми,

інтенсивність яких зростає зі збільшенням терміну експлуатації об'єкта (зростаюча крива 2 на рис. 2.1). Настає період T_3 інтенсивного зносу об'єкта, який закінчується його переходом у граничний стан та зняттям з експлуатації.

Досвід експлуатації показує, що надійність роботи електрообладнання залежить від численних і різноманітних факторів, які умовно можуть бути розділені на чотири групи: конструктивні, виробничі, монтажні, експлуатаційні [66].

Конструктивні фактори зумовлені застосуванням у пристроях елементів з низькою надійністю; недоліками схемних і конструктивних рішень, прийнятих під час проектування; застосуванням комплектуючих елементів, що не відповідають умовам навколишнього середовища, тощо.

Виробничі фактори зумовлені порушеннями технологічних процесів та слабким контролем якості виготовлення, забрудненням навколишнього середовища, робочих місць і пристроїв, слабким контролем якості виготовлення та ін.

Монтажні фактори. У процесі монтажу електротехнічних пристроїв їх надійність може бути знижена в разі недотримання вимог технології і порядку виконання робіт та безпосередньо монтажу.

Експлуатаційні фактори. Умови експлуатації мають найбільший вплив на надійність електротехнічних пристроїв. Перевантаження елементів електрообладнання, струми коротких замикань, різні види перенапружень (дугові, комутаційні, резонансні й т. д.), температура, вологість, корозійні рідини й гази, електричні й магнітні поля, удари, вібрація, сонячна радіація, пісок, пил, цвіль – усе це впливає на роботу пристроїв. Різні умови експлуатації неоднаково можуть позначатися на терміні служби й надійності роботи електрообладнання ТП.

Перевантаження призводять до підвищення температури нагрівання ізоляції електротехнічних пристроїв вище допустимої і різкого зниження терміну її служби. Електричні й механічні перевантаження відбуваються в результаті несправності механізмів електроустановок, значних змін частоти або напруги мережі живлення, загустіння мастила механізмів у холодну погоду, перевищення

номінальної розрахункової температури навколишнього середовища в окремі періоди року і дня тощо.

Високі температури також викликають механічні та електричні пошкодження елементів електротехнічних пристроїв, прискорюючи їх знос і старіння. Вплив підвищеної температури на надійність роботи електротехнічних пристроїв проявляється в найрізноманітніших формах: утворюються тріщини в ізоляційних матеріалах, зменшується опір ізоляції, а значить, збільшується небезпека електричних пробоїв, порушується герметичність (починають витікати заливні й просочувальні компаунди). У результаті порушення ізоляції в обмотках трансформаторів, електромагнітів і електродвигунів виникають пошкодження. Так само підвищена температура дуже впливає на роботу механічних елементів електротехнічних пристроїв.

Під дією вологи відбувається дуже швидка корозія металевих деталей електротехнічних пристроїв, зменшується поверхневий і об'ємний опір ізоляційних матеріалів, з'являються різні витоки, різко збільшується небезпека поверхневих пробоїв, утворюється грибкова цвіль, під впливом якої поверхня матеріалів роз'їдається й електричні властивості пристроїв погіршуються.

Ударно-вібраційні навантаження значно знижують надійність електротехнічних пристроїв. Вплив ударно-вібраційних навантажень у деяких випадках може бути значнішим впливу інших механічних, а також електричних і теплових навантажень. У результаті тривалого знакозмінного впливу навіть невеликих ударно-вібраційних навантажень відбувається накопичення втоми в елементах, що призводить до раптових відмов. Під впливом вібрацій і ударів виникають численні механічні пошкодження елементів конструкції, послаблюються їх кріплення й порушуються контакти електричних з'єднань.

Навантаження при циклічних режимах роботи, пов'язаних з частими увімкненням й вимиканням електротехнічного пристрою, так само як і ударно-вібраційні навантаження, сприяють виникненню й розвитку ознак втоми елементів. Фізична природа підвищення небезпеки відмов пристроїв при їх увімкненні й вимкненні полягає в тому, що під час перехідних процесів у їхніх

елементах виникають надструми і перенапруги, значення яких часто набагато перевищують (хоча й короткочасно) значення, регламентовані технічними умовами.

Пил, потрапляючи в мастило, осідає на частинах і механізмах електротехнічних пристроїв і викликає швидкий знос частин, що труться, і забруднення ізоляції. Тому при великій запиленості особливого значення набуває якість ущільнень елементів електричних пристроїв і догляд за ними.

Якість експлуатації електротехнічних пристроїв також залежить від ступеня наукової обґрунтованості застосовуваних методів експлуатації та кваліфікації обслуговуючого персоналу (знання матеріальної частини, теорії та практики надійності, вміння швидко знаходити й усувати несправності тощо). Застосування профілактичних заходів (регламентні роботи, огляди, випробування), ремонту, використання досвіду експлуатації електротехнічних пристроїв забезпечують їх більш високу експлуатаційну надійність.

Враховуючи вищевикладене, відзначимо основні шляхи підвищення надійності ТП:

- подальше вивчення й удосконалення умов експлуатації та підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання, визначення характеру, причин і законів розподілу відмов;
- вдосконалення та розробка нових методів розрахункової оцінки надійності електроустаткування, а також оцінки надійності шляхом випробування на надійність;
- розробка і вдосконалення методів розрахункової і експериментальної оцінки надійності при зберіганні й транспортуванні;
- налагодження й правильна експлуатація систем захисту електрообладнання, передбачених під час проектування;
- покращення теплового стану електрообладнання шляхом переходу на більш високий клас нагрівостійкості ізоляції, вирівнювання температури окремих частин обладнання за рахунок вибору навантажень, розробки сучасних систем охолодження, застосування захисту від перевантажень тощо;

- розробка і впровадження заходів щодо зниження вібрацій як електроустаткування, так і електромеханічної системи ТП у цілому;
- підвищення якості комплектуючих виробів і матеріалів, у тому числі: застосування їх найвищих класів, використання просочувальних лаків, спеціальних проводів з міцною та еластичною ізоляцією, зменшення жорсткості обмотувальних проводів, застосування високоякісної міканітової ізоляції (міканітова ізоляція струмовідводів настільки надійна, що їх огляди можуть здійснюватися через дуже великі проміжки часу) тощо;
- розробка методів визначення економічно оптимальних показників надійності.

Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання пов'язане з матеріальними витратами, тому ця проблема повинна вирішуватися на базі техніко-економічних розрахунків. Для кожного типу силового електрообладнання ТП можуть бути розроблені економічно-обґрунтовані оптимальні показники надійності з урахуванням умов застосування, фізичного та морального зносу, витрат на технічне обслуговування і ремонт.

Утримання технічного обладнання залізничного транспорту на високому експлуатаційному рівні неможливе без об'єктивної інформації про його фактичний стан. Об'єкти залізничного транспорту містять велику кількість пристроїв, тривала експлуатація яких без належного діагностування технічного стану може призвести до виходу їх з ладу та значних матеріальних збитків. Для реалізації ефективного діагностування цих пристроїв необхідна інтелектуалізація електричних мереж. При розробці проектів з інтелектуалізації електричних мереж необхідно вивчати світовий досвід розвитку концепцій Smart Grid. Керування повинно здійснюватися всією системою електропостачання залізниць, яка зрештою повинна стати повністю автоматичною, а всі наявні автоматизовані системи (АСДУ, АСУТП, системи моніторингу, системи керування даними, системи діагностування тощо) є лише інструментом для досягнення поставлених цілей. Інтегровані в єдину платформу існуючі автоматизовані інформаційні системи дистанції електропостачання дозволять

по-новому підходити до побудови електричних мереж та контролю їх роботи. Інтелектуальна електрична мережа залежно від умов, що склалися, у автоматичному режимі повинна здійснювати зміну конфігурації системи електропостачання з метою досягнення мінімуму витрат енергоресурсів без зниження надійності роботи, у тому числі: керування системою електропостачання дистанції, діагностування стану електротехнічного електрообладнання ТП, а також організацію, планування та проведення ТО і Р обладнання.

Регламентоване обслуговування, що виконується згідно з інструкціями на обладнання, у цілому призначене забезпечувати його працездатність. Проте інколи таке обслуговування призводить до невиправданих витрат, оскільки за реальним технічним станом пристрій в момент виконання робіт може й не потребувати технічного обслуговування, а замінювані деталі ще не досягли критичної межі зносу. Однак поступове старіння парку устаткування й зниження запасів міцності гостро ставлять питання оцінки його стану й рівня ризику його експлуатації за межами нормованого терміну служби. Розвиток вільного ринку електроенергії і збільшення фінансового тиску стали додатковими чинниками, які, з одного боку, максимально підсилюють необхідність продовження термінів служби устаткування, а з іншого – спрямовані на зниження експлуатаційних витрат на його технічне обслуговування і ремонт. Необхідність розв'язання цієї суперечності приводить до формування нового підходу в оцінці стану устаткування.

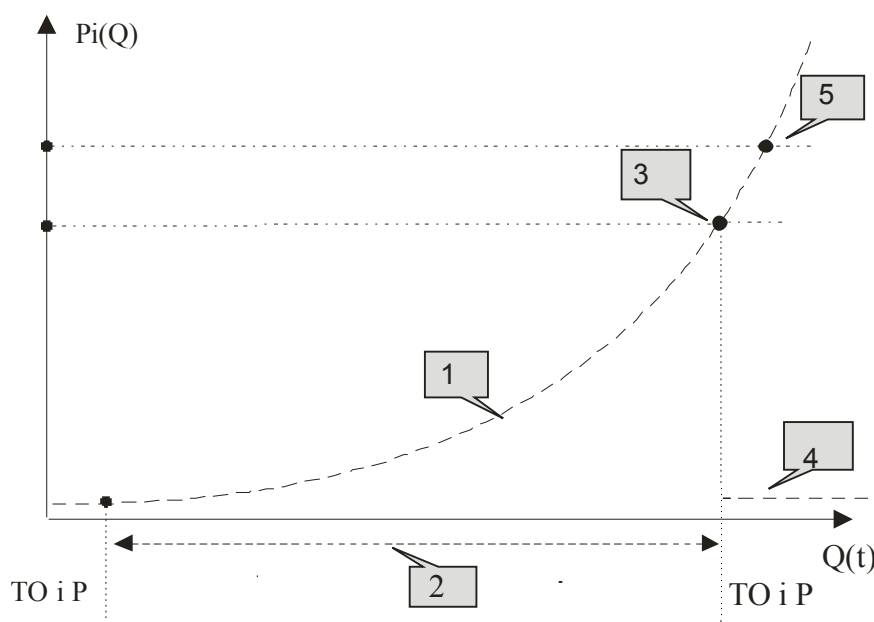
В основі нових пропонованих методів управління й прийняття рішень, що формуються сьогодні, лежить аналіз ризиків експлуатації старого устаткування або устаткування з певними дефектами (обслуговування устаткування за фактичним технічним станом). Метою ТО і Р за фактичним технічним станом є забезпечення необхідного рівня надійності при зниженні експлуатаційних витрат. При цьому призначають необхідні роботи з ТО і Р залежно від реального технічного стану конкретного об'єкта й передбачуваної зміни його стану в процесі експлуатації. Цей метод полягає в контролі за технічним станом

устаткування з використанням сучасних засобів технічної діагностики та проведенням ремонтних робіт лише тоді, коли вони дійсно необхідні (рис. 2.2).

У результаті проведення безперервної діагностики експлуатованого устаткування можна досягти зниження обсягів робіт за рахунок систематичного зменшення причин виникнення дефектів.

Накопичений світовий досвід застосування ТО і Р за фактичним технічним станом дозволяє дати таку узагальнену оцінку ефективності цього методу [67, 68]:

- зниження витрат на обслуговування на 75 %;
- зниження кількості обслуговувань на 50 %;
- зниження кількості відмов на 70 % за перший рік роботи.



$PI(Q)$ – узагальнений показник ресурсу пристрою; 1– зміна технічного стану обладнання пристрою $Q(t)$; 2– моніторинг та діагностування технічного стану обладнання; 3 – передвідмовний стан пристрою; 4 – відновлення ресурсу; 5 – відмова пристрою

Рисунок 2.2 – Обслуговування пристроїв за фактичним технічним станом

Порівняльний аналіз різних методів обслуговування устаткування, за даними Асоціації відкритих систем управління інформацією про стан машин «MIMOSA», показав, що питомі витрати на ТО і Р в енергетичному секторі США склали в 1998 р.:

- 24 \$ на 1 кВт – при функціонуванні устаткування до виходу з ладу;
- 18 \$ на 1 кВт – при ТО і Р на базі планово-запобіжних ремонтів;
- 12 \$ на 1 кВт – при ТО і Р на базі оцінки фактичного стану устаткування.

Інший приклад економічного ефекту від переходу з обслуговування і ремонту за регламентом на ремонт і обслуговування за фактичним станом за даними фірми «Buel and Kjaer» (Данія) [14] наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Річний економічний ефект від переходу з ТО і Р за регламентом на ТО і Р за фактичним станом

Підприємство	Економічний ефект
Хімічний комбінат (електричні машини)	Зниження кількості ТО і Р з 274 до 14
Нафтопереробний комбінат (ел. обладн.)	Зниження затрат на ТО і Р на 75 %
Паперова фабрика (електрообладнання)	Економія 250 000 \$, що в 10 разів перекрыло затрати на закупівлю засобів для моніторингу
Атомна електростанція (електрообладнання)	Економія 3 000 000 \$ за рахунок зниження затрат на ТО і Р
Залізничний транспорт	Зниження кількості ТО і Р на 15 %
Коефіцієнт окупності вкладених коштів	Більше 10 разів

Також при переході на технічне обслуговування за фактичним станом в одному лише депо «Московка» Західно-Сибірської залізниці (Росія) отримано економічний ефект 1,5 млрд руб. [70].

Розглянутий досвід показує, що для вирішення проблеми своєчасного відновлення ресурсу та підвищення надійності пристроїв електропостачання залізниць, скорочення витрат, пов'язаних з ремонтом і простоями, необхідно переходити від регламентованого ТО і Р до інтелектуальної системи обслуговування за фактичним технічним станом.

Сьогодні підтримка необхідного рівня надійності енергетичного устаткування в процесі експлуатації забезпечується, по-перше, за рахунок значних коефіцієнтів запасу, які закладені при його створенні, а по друге, системою технічного обслуговування і періодичних ремонтів, яка базується на

проведенні ПЗР після напрацювання певного часу.

В основу діючої системи ТО і Р ТП, згідно з «Інструкцією з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць» ЦЕ-0024 [4], покладено поєднання технічного обслуговування й ПЗР. Залежно від важливості призначення устаткування в технологічному процесі, ПЗР може проводитися за методом планово-періодичного ремонту й ремонту за технічним станом.

Згідно з вимогами вказаної Інструкції (п. 4.14.7), ремонт обладнання за технічним станом виконується у випадку виявлення при оглядах несправностей, що загрожують нормальній роботі обладнання, після відмов у роботі обладнання та пристроїв релейного захисту й автоматики (РЗА), у разі пошкодження обладнання аварійними струмами, атмосферними й комутаційними впливами, а також при виробітку встановленого механічного й комутаційного ресурсу.

Як бачимо, питання визначення фактичного технічного стану обладнання за допомогою діагностування, вимірів, випробувань тощо не розглядається, а ТО і Р виконується за фактом пошкодження обладнання, його несправного стану або непрацездатності.

Вищерозглянутий закордонний досвід обслуговування за фактичним технічним станом дозволяє, з одного боку, забезпечити працездатність техніки, з іншого – заздалегідь підготуватися до проведення ТО і Р та мінімізувати витрати на нього.

Однак планування ТО і Р пристроїв ТП досить складне у зв'язку з тим, що стан кожного з об'єктів контролюється множиною показників, за кожним з яких повинна розраховуватися дата наступного ТО і Р або іншого виду обслуговування. В існуючій на ТП системі ТО і Р необхідно шукати резерви для скорочення витрат. У цьому напрямку, в першу чергу, згідно з [70], необхідно забезпечити прозорість і обґрунтованість ремонтної програми:

1. Прозорість витрат на ТО і Р – це розуміння того, на що, на які об'єкти і які роботи плануються засоби ремонтного фонду, скільки коштує кожна з цих робіт.

2. Обґрунтованість витрат на ТО і Р – це усвідомлений вибір між витратами на підтримку працездатності устаткування й розміром ризику в разі невиконання ремонту.

Для забезпечення прозорості й обґрунтованості витрат на ТО і Р ТП слід:

- впровадити пооб'єктне планування ремонтного фонду;
- прив'язати витрати на ремонт до технічного стану й фактичного завантаження обладнання;
- впровадити оцінку ризику невиконання ремонтів і систему прийняття рішень на основі ризиків.

Виконаний аналіз показує, що найбільш прогресивна система технічного обслуговування і ремонту – це система, що базується на встановленні *фактичного технічного стану обладнання*. Основою для побудови такої системи служать методи технічної діагностики. Сучасний рівень і перспективи розвитку засобів діагностики, дефектоскопії і автоматизованого контролю в електропостачанні залізниць відкривають реальні можливості застосування в недалекому майбутньому методів технічного обслуговування й ремонту устаткування за технічним станом у широких масштабах.

Стосовно електрообладнання принципово важливо визначити, які параметри контролювати і які чинники враховувати при оцінці його технічного стану, тобто слід вирішити питання про глибину діагностування. Як відомо, широко розглядаються механічні (вібраційні), теплові, електричні й інші чинники, що мають різну фізико-хімічну природу. При цьому згадані чинники призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування. У цьому випадку оцінка технічного стану за окремими властивостями електрообладнання виконується більш-менш задовільно. Проте загальна оцінка технічного стану пристрою надзвичайно ускладнена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи й відсутність між ними кореляційних залежностей. Ця проблема змушує шукати інший підхід до загальної оцінки технічного стану електрообладнання. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є доцільність прийняття як інтегральної оцінки технічного стану електрообладнання значення

спрацьованого (залишкового) ресурсу. Спрацьований (залишковий) ресурс визначається за результатами експлуатаційного контролю параметрів пристрою в перехідних і стаціонарних режимах роботи.

У системі ремонту електроустаткування за фактичним технічним станом питання про призначення термінів ТО і Р конкретним видам устаткування повинне визначатися не регламентним графіком ПЗР, а їх фактичним технічним станом. У той же час періодичне діагностування виконується у рамках технічного обслуговування за планом, який включається в календарні графіки. Безперервне діагностування в процесі експлуатації найбільш ушкоджуваних і відповідальних елементів електрообладнання ТП за технічним станом можливо впровадити за допомогою застосування запропонованої автором концепції інтелектуальної системи ТО і Р, моніторингу та діагностування обладнання ТП.

На початковому етапі впровадження системи ТО і Р електроустаткування за фактичним технічним станом доцільно зберегти планування основних ремонтних показників (ремонтного циклу, міжремонтного періоду, трудомісткості, об'єму складських запасів матеріалів і запасних частин). Проте в ремонтний цикл як основну операцію технічного обслуговування необхідно включити графік контролю технічного стану електрообладнання ТП, сформований за допомогою інтелектуальної системи моніторингу й діагностування обладнання [68–74]. У результаті прогнозування технічного стану на підставі діагностування міжремонтний період кожного виду електрообладнання необхідно коригувати залежно від його фактичного технічного стану. У процесі накопичення діагностичної інформації про відпрацьований або залишковий ресурс різного електроустаткування можуть бути внесені корективи у встановлені системою ПЗР нормативи періодичності й обсягу ТО і Р. При подальшому глибокому розвитку й впровадженні методів і засобів технічної діагностики можна буде відмовитися від регламентного календарного планування термінів ремонту, замінивши його на календарне планування діагностичних перевірок.

2.2 Визначення експлуатаційних ушкоджень і відмов силового електрообладнання тягових підстанцій

Умови практичної експлуатації об'єктів ТП відрізняються значною різноманітністю й нестабільністю.

Так, у процесі експлуатації ТП змінюються:

- напрацювання електрообладнання з початку експлуатації або після чергового ремонту (у годинах напрацювання, кількості включень і так далі);
- зовнішнє середовище, у якому використовується електрообладнання (температура, вологість, запилення та дія агресивних або хімічних речовин тощо);
- фактичні режими роботи обладнання ТП і його систем залежно від змін графіка руху потягів, підвищення швидкості, навантаження тощо;
- рівень підготовки й майстерність інженерно-технічного складу, який полягає в умінні вибирати та використовувати оптимальні режими роботи електрообладнання ТП та дотримуватися встановлених правил експлуатації;
- організація ТО і Р, технічне забезпечення процесів ТО і Р, застосування методів контролю технічного стану обладнання ТП, використовуваного устаткування й пристроїв;
- якість виконання робіт з ТО і Р залежно від своєчасного виявлення й усунення ушкоджень, виконання профілактичних робіт і заміни пристроїв, технічної оснащеності виробничої бази дистанції електропостачання, кваліфікації і достатньої чисельності технічного персоналу й робітників та організації їх праці.

Перераховані чинники визначають рівень експлуатаційної надійності електрообладнання ТП і його систем, оскільки в загальному випадку мають випадковий характер і призводять до того, що в процесі експлуатації ТП відбуваються зміни технічного стану елементів: виникнення й розвиток відхилень від технічних параметрів; поява відмов і несправностей, зумовлених різними дефектами пристроїв ТП.

Більшість вказаних дефектів є керованими, тобто можуть бути фактично

змінені шляхом формування оптимальних режимів ТО і Р і розробки заходів, спрямованих на своєчасну ліквідацію виникаючих чинників або запобігання їм.

З урахуванням [1, 41, 42, 45-50] та практичного досвіду, дефекти обладнання ТП можуть бути класифіковані за характером і походженням на такі групи:

- I група – тріщини, деформації і руйнування втомного характеру, викликані дією експлуатаційних навантажень, що багаторазово повторюються;
- II група – спрацювання (люфти) рухомих зчленувань, послаблення нарізних з'єднань і заклепувальних швів, потертості й інші види механічного зносу елементів конструкції тощо;
- III група – руйнування і деформації, викликані разовими діями навантажень, що перевищують розрахункові й пов'язані з особливими умовами експлуатації силового електрообладнання ТП або з порушеннями правил експлуатації;
- IV група – втрата властивостей мастил і спеціальних рідин, використовуваних у вузлах, агрегатах і системах ТП, а також старіння деталей;
- V група – руйнування лакофарбових та інших видів захисних покриттів;
- VI група – корозія елементів конструкції ТП;
- VII група – механічні ушкодження, викликані недбалістю при ТО і Р або при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт.

До причин виникнення названих груп дефектів слід віднести такі фактори:

- напрацювання обладнання ТП (I і II групи);
- організація і практичне виконання завдань електропостачання залізниць у різних умовах експлуатації ТП, які не відповідають вимогам НТД (III група);
- календарні терміни експлуатації та дія зовнішніх факторів (IV, V, VI групи);
- недоліки організації праці, кваліфікація робочого персоналу (VII група).

Запропонована вище класифікація експлуатаційних ушкоджень і відмов є базою для прогнозування технічного стану обладнання ТП та розробки

профілактичних заходів, які безпосередньо повинні враховуватися при ТО і Р та підвищенні експлуатаційної надійності ТП.

2.3 Наукове обґрунтування та розробка методу підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання тягових підстанцій

Для зниження економічних втрат і підвищення терміну експлуатації електрообладнання ТП необхідно отримати інформацію щодо експлуатаційної надійності цього обладнання, на підставі якої слід розробити заходи щодо більш коректної та відповідальної експлуатації електрообладнання ТП, а також скласти методичні вказівки щодо вдосконалення системи ТО і Р з метою продовження терміну служби.

Величини, що характеризують надійність (показники надійності) конкретного обладнання або технологічної системи, мають ймовірнісний характер. Це означає, що той чи інший показник надійності досить точний лише стосовно великої кількості зразків або одного зразка, але за умови, що спостереження за ним ведеться так довго, що є можливість спостерігати велику кількість відмов.

Ймовірнісний характер показників надійності зумовлений тим, що більшу частину свого терміну служби технічний об'єкт перебуває на етапі нормальної роботи, коли відмови відбуваються раптово, тобто мають випадковий характер.

Однак і на етапі зносу і старіння, незважаючи на те що наближення відмови того чи іншого об'єкта можна передбачити (тобто він має не випадковий, а закономірний характер), сам момент відмови точно передбачити неможливо. Звідси, час безвідмовної роботи так само, як і на етапі нормальної роботи, є випадковою величиною [75, 76]. Враховуючи це, визначимо основні напрямки у визначенні фактичних значень показників, які характеризують експлуатаційну надійність електрообладнання ТП на стадії експлуатації.

Експлуатаційна надійність розглядається як складна властивість, яка включає такі показники: безвідмовність, працездатність, довговічність, ремонтпридатність та значною мірою залежить від умов експлуатації [57]. Під

експлуатаційною надійністю електрообладнання розуміється його здатність зберігати працездатність у ході використанні протягом певного часу.

В умовах експлуатації кількісну оцінку безвідмовної роботи системи тягового електропостачання отримують за результатами обробки експлуатаційних даних шляхом розрахунку відношення кількості об'єктів системи, які безвідмовно пропрацювали до моменту часу t , до кількості об'єктів, працездатних у початковий момент часу

$$P(t) = \frac{N}{N_0} = \frac{N_0 - r(t)}{N_0} = 1 - \frac{r(t)}{N_0}, \quad (2.1)$$

де N – кількість об'єктів системи;

N_0 – кількість працездатних об'єктів у початковий момент часу;

$r(t)$ – кількість відмов за час t .

Враховуючи велику кількість параметрів, які впливають на працездатність об'єктів ТП, можна прийняти нормальний закон розподілу оцінки безвідмовної роботи

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (2.2)$$

де x – вимірне значення параметра;

σ – середньоквадратичне відхилення параметра;

\bar{x} – середнє значення параметра (математичне сподівання).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.4)$$

де x_i – виміряне значення параметра на i -му кроці;

n – кількість вимірювань параметра.

Фізична величина (параметри електрообладнання), схильна до впливу великої кількості незалежних факторів, здатних вносити з однаковою похибкою додатні й від’ємні відхилення, незалежно від природи цих випадкових факторів.

При експоненціальному законі розподілу напрацювання на відмову, характерному для усталеного режиму експлуатації, ймовірність безвідмовної роботи визначається за формулою

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.5)$$

де e – основа натуральних логарифмів ($e = 2,7183$);

λ – інтенсивність відмов;

t – час.

Слід мати на увазі, що застосування ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови без зазначення періоду часу спостереження не має сенсу, бо для різної тривалості роботи об’єкта ймовірність безвідмовної роботи і ймовірність відмови будуть так само різними.

Якщо пристрій складається з n послідовно з’єднаних елементів, ймовірність безвідмовної роботи яких для різних інтервалів часу дорівнює $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$, то на підставі теореми множення незалежних подій ймовірність безвідмовної роботи пристрою

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (2.6)$$

Небезпека відмов пристрою

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad (2.7)$$

де $\lambda_i(t)$ – небезпека відмови i -го елемента пристрою.

В окремому випадку при експоненціальному законі розподілу, коли

$\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, ймовірність безвідмовної роботи пристрою

$$P(t) = e - (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n) \cdot t. \quad (2.8)$$

Якщо пристрій складається з n паралельно з'єднаних елементів, ймовірність відмови яких для різних інтервалів часу дорівнює $Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q(t)$, то ймовірність відмови пристрою

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t). \quad (2.9)$$

Вивчення теоретичного та практичного досвіду експлуатації й ремонту з метою підвищення надійності електрообладнання енергосистем та систем у цілому [57, 67, 77–89], а також дослідження роботи господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці за 2002–2013 роки [1, 41, 42, 45-50] дозволяє визначити основні складові, напрямки формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП, концепцію якої наведено на рис. 2.3.

Аналіз [10, 11, 57, 66] вказує на використання низки важливих показників експлуатаційної надійності.

Основними комплексними показниками групи заходів «А» (див. рис. 2.3) за календарний період часу T_K є:

- коефіцієнт готовності

$$K_2 = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + T_{\text{рем}}}, \quad (2.10)$$

де $T_{\text{роб}}$ – час роботи електрообладнання ТП, год;

$T_{\text{рем}}$ – час ремонту електрообладнання ТП, що припадає на

плановий час його використання, год;

- коефіцієнт технічного використання

$$K_{me} = \frac{T_{\text{роб}}}{(T_{\text{роб}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{ТО}} + T_{\text{Д}})}, \quad (2.11)$$

де $T_{\text{ТО}}$ і $T_{\text{Д}}$ – сумарний час технічного обслуговування та діагностування, що припадає на плановий час роботи електрообладнання, год.

Основними показниками групи заходів «В» (див. рис. 2.3) для електрообладнання ТП за період часу T_K є:

- середній час $T_{o.p}$, год, між зупинками електрообладнання через ремонти;
- середній час $T_{o.TO}$, год, між зупинками електрообладнання через виконання технічного обслуговування;
- середній час $T_{o.D}$, год, між зупинками електрообладнання через виконання заходів з діагностування.

Основними показниками групи заходів «С» (див. рис. 2.3) за період часу T_K є:

- середній час одного ремонту $T_{рем.1}$, год;
- середній час одного технічного обслуговування $T_{TO.1}$, год;
- середній час одного діагностування $T_{Д.1}$, год.

Між групами показників «А», «В» і «С» для однієї одиниці обладнання ТП можна встановити такі взаємозв'язки:

$$K_2 = \frac{T_{роб}}{T_{роб} + \frac{T_{роб}T_{рем.1}}{T_{o.p.1}}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{рем.1}}{T_{o.p.1}}}, \quad (2.12)$$

$$K_{me} = \frac{1}{1 + \frac{T_{рем.1}}{T_{o.p.1}} + \frac{T_{TO.1}}{T_{o.TO.1}} + \frac{T_{Д.1}}{T_{o.D.1}}}. \quad (2.13)$$

Як бачимо з виразу (2.9), внаслідок зменшення $T_{рем.1}$ та збільшення $T_{o.p.1}$ підвищується коефіцієнт готовності (K_2) одиниці обладнання ТП. Вираз (2.10) показує, що для підвищення коефіцієнта технічного використання одиниці обладнання ТП (K_{me}) необхідно зменшити середній час одного ремонту $T_{рем.1}$ (технічного обслуговування, діагностування) та збільшити середній час $T_{o.p.1}$ між зупинками обладнання через ремонти (технічне обслуговування, діагностування).

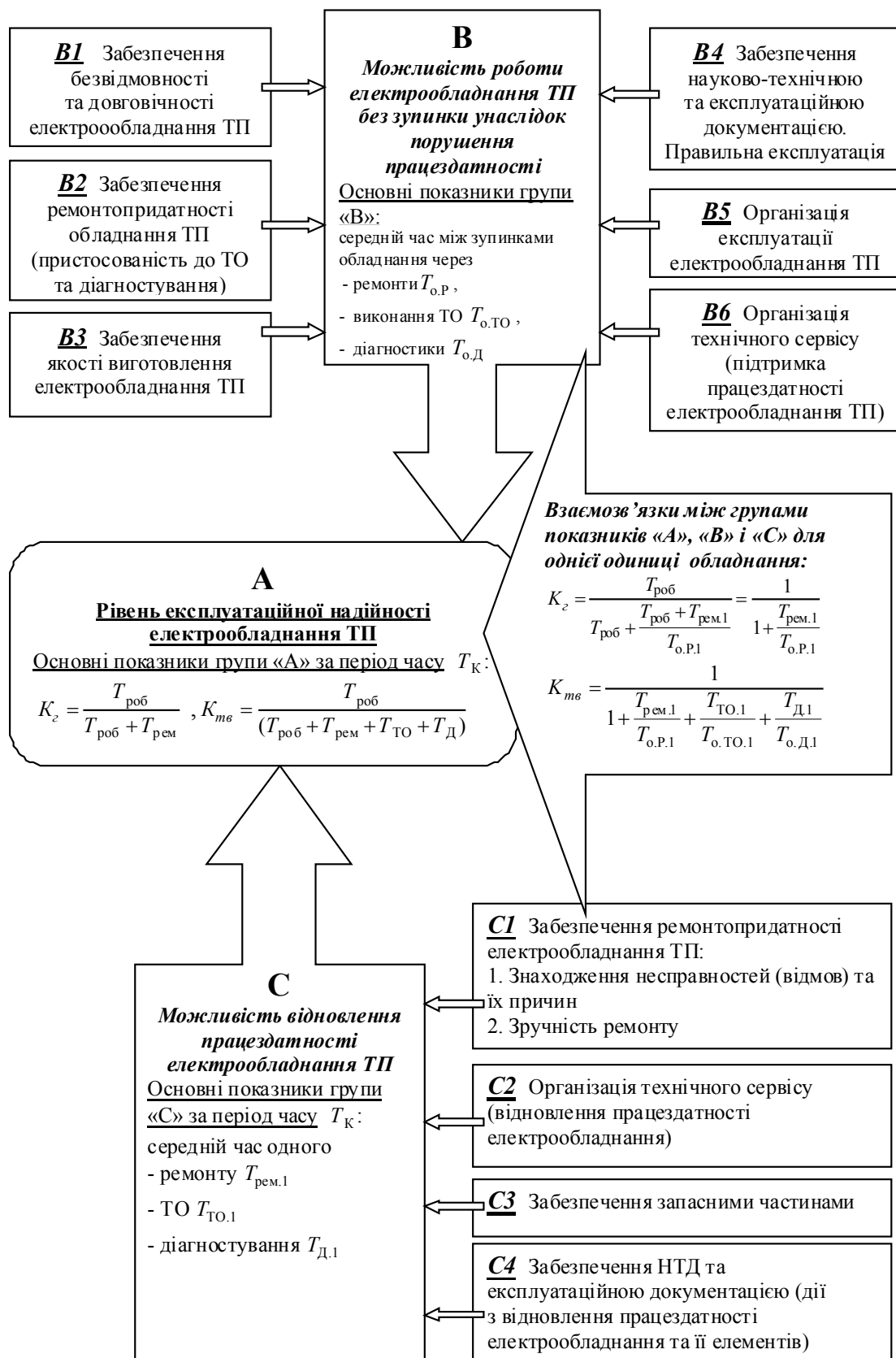


Рисунок 2.3 – Концепція формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП

Розрізняють плановані й фактичні значення показників експлуатаційної надійності. Відповідно їх прив'язують до року експлуатації електрообладнання ТП (1-й, 2-й і т.д.) і умов роботи (природно-кліматичні та вид виконуваних робіт). Також слід мати на увазі, що рівень надійності окремого обладнання зменшується за роками експлуатації. Особливо інтенсивно це спостерігається після 3-4 років використання [1, 63].

На практиці широко застосовуються ефективні інформаційні системи, що дозволяють визначати показники надійності окремого обладнання за певний календарний проміжок часу [5, 72, 74].

Щодо кращих світових зразків обладнання стосовно конкретної моделі техніки, можна розрізнити «високий», «середній» і «низький» рівні експлуатаційної надійності з певними значеннями показників надійності.

Цілком очевидно, що в досягненні певного рівня експлуатаційної надійності обладнання ТП беруть участь підприємства (підрозділи), що здійснюють його проектування, виготовлення та експлуатацію.

Пропонована схема формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП (рис. 2.3) у своєму складі має такі групи заходів:

- група заходів з індексом «В», яка впливає на здатність електрообладнання працювати без зупинок з технічних причин;
- група заходів з індексом «С», яка впливає на тривалість зупинок електрообладнання з технічних причин.

Використовуючи досвід підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання [10, 11, 57, 66, 78-89], визначимо ефективний склад комплексних заходів груп «В» і «С» (див. рис. 2.3).

Визначений ефективний склад комплексних заходів групи «В» (можливість роботи електрообладнання без зупинки внаслідок порушення його працездатності) такий:

- В1 – забезпечення безвідмовності й довговічності;
- В2 – забезпечення ремонтпридатності обладнання (приспосованість до ТО і діагностування);

В3 – забезпечення якості виготовлення електрообладнання ТП;

В4 – забезпечення науково-технічною та експлуатаційною документацією.

Правильна експлуатація;

В5 – організація експлуатації електрообладнання ТП;

В6 – організація технічного сервісу (підтримка працездатності обладнання ТП).

Забезпечення безвідмовності й довговічності електрообладнання ТП (В1). Для вирішення цієї проблеми можна запропонувати такі дії:

- розробка вимог, пропозицій та стратегій ТО і Р для підвищення довговічності й безвідмовності обладнання ТП в цілому, її систем і елементів;

- розробка якісної конструкторської та технологічної документації, виконання положень якої забезпечує довговічність та безвідмовність обладнання;

- оцінка ступеня виконання встановлених вимог до надійності на експериментальних зразках елементів електрообладнання за допомогою стендових випробувань та випробувань дослідних зразків обладнання в експлуатаційних умовах дистанцій електропостачання;

- коригування нормативно-технічних документів ТО і Р за результатами випробувань;

- поступове підвищення рівня безвідмовності й довговічності елементів електрообладнання на основі результатів його експлуатації, а також за інформацією про відмови, що надходять від інших дистанцій електропостачання;

- впровадження автоматизованих систем збору, обліку інформації про відмови й результатів діагностування електрообладнання ТП в умовах експлуатації та розробка пропозицій щодо підвищення рівня безвідмовності й довговічності електрообладнання ТП тощо.

Пристосованість електрообладнання до технічного обслуговування та діагностики (В2). У цьому напрямку необхідно забезпечити:

- вільний доступ до найважливіших агрегатів ТП для обслуговування та очищення;

- виведення на пульт управління ТП індикаторів, показчиків, звукових сигналів і ін., які оперативно інформують оператора про стан елементів електрообладнання;

- по можливості групування в єдині вузли точок обслуговування й візуальних показчиків;

- можливість установки автоматизованої системи змащення;

- зручну позу технічного персоналу під час обслуговування;

- спрощений ефективний набір інструментів і пристроїв та ін.;

- наявність пристроїв для підключення переносних діагностичних засобів;

- можливість установки на основне силове електрообладнання пристроїв для збору інформації про напрацювання і його технічний стан;

- наявність комп'ютера, який дозволяє оперативно оцінити стан систем основного силового електрообладнання ТП та ін.

Забезпечення якості виготовлення електрообладнання (В3) передбачає сукупність дій, які гарантують з необхідною ймовірністю, що електрообладнання буде відповідати встановленим вимогам.

На якість виготовлення електрообладнання впливають:

- організація виробництва (використовуване обладнання, кваліфікація персоналу, технологія виконання робіт, методологія, здійснення менеджменту та ін.);

- контроль якості, що включає:

- вхідний контроль якості, комплектуючих і матеріалів;

- вихідний контроль;

- статистичний контроль якості процесів;

- коригувальні дії за результатами контролю та ін.;

- забезпечення поліпшення якості виготовлення за результатами експлуатації електрообладнання.

Забезпечення НТД та експлуатаційною документацією. Правильна експлуатація (В4):

- документація, що поставляється на ТП разом з обладнанням, повинна

включати настанови для інженерно-технічного персоналу, каталог запасних частин і настанови із сервісу (склад робіт з ТО і Р та діагностування; діагностичні параметри; використовувані прилади, обладнання та інструменти; логічні схеми пошуку причин несправностей (відмов) та ін.);

- рекомендації з організації ефективної роботи інженерно-технічного персоналу, а також детальні інструкції щодо їх роботи;

- програмне забезпечення з планування ТО і Р та аналізу результатів діагностування тощо;

- рекомендації з технології виконання монтажних робіт;

- спеціальні інструкції, наприклад, з виконання робіт при низькій температурі повітря, зі зберігання та ін.;

- рекомендації з розрахунку продуктивності електрообладнання і витрат на його експлуатацію (у т.ч. ТО і Р).

Для властивості електрообладнання «В» зі складу розглянутої документації найбільш важливе значення мають рекомендації для інженерно-технічного персоналу для всіх можливих робочих ситуацій і зі щоденного технічного обслуговування, рекомендації для інженерно-технічного персоналу з проведення ТО і Р та діагностування, рекомендації для інженерного персоналу ТП з технології виконання робіт.

Організація експлуатації електрообладнання ТП (В5) повинна включати:

- транспортування;

- монтаж і демонтаж;

- зберігання;

- умови роботи електрообладнання:

- природно-кліматичні умови;

- часовий режим роботи електрообладнання (протягом дня, тижня, місяця, року);

- параметри робочого майданчика;

- особливості споруджуваних електротехнічних об'єктів;

- використання електрообладнання за призначенням:
 - підбір технічного персоналу, його навчання та підвищення кваліфікації (у передовій практиці в навчанні бере участь виробник або дилер);
 - установку змінних завдань технічного персоналу, у тому числі на основі рекомендацій виробника за розрахунком продуктивності електрообладнання;
 - управління роботою технічного персоналу;
 - організацію взаємозв'язку обладнання в комплексі системи тягового електропостачання;
 - організацію обліку роботи силового електрообладнання ТП тощо.

Комплекс послуг з технічного сервісу електрообладнання ТП (В6).

Усі з перерахованих робіт з технічного сервісу основного силового електрообладнання ТП можуть виконуватися тільки дилером або частина з них виконується тільки дилером, а інша частина самим споживачем або із залученням сторонніх організацій. Наукові дослідження та досвід експлуатації і ремонту технічного обладнання [58, 59, 49, 78, 83–85] вказують на використання стратегії, за якою:

- значна увага приділяється заходам профілактичного характеру, спрямованим на максимально можливе зменшення відмов електрообладнання;
- необхідність своєчасного здійснення ремонту агрегатів, поки цей ремонт не трудомісткий, не ускладнений і не потребує великих витрат і тривалого простою електрообладнання.

За цієї стратегії найбільшої важливості набувають такі ефективні заходи з підтримки працездатності електрообладнання: технічне обслуговування й ремонт за фактичним технічним станом (у т.ч. при введенні в експлуатацію) та діагностування з визначенням максимально реальних параметрів обладнання. Розходження в затратах на ремонт при прогресивній стратегії та при поширеній на сьогодні роботі до відмови може досягати трикратного значення.

Роботи з підтримки працездатності електрообладнання повинні виконуватися висококваліфікованими сертифікованими фахівцями, які використовують сучасні технології і мають високоякісне обладнання. Провідні

виробники здійснюють підготовку (підвищення кваліфікації) сервісного персоналу й беруть участь в оснащенні приладами, пристроями та інструментом.

До складу профілактичних заходів з технічного сервісу також входить забезпечення мастильними матеріалами та охолодними рідинами, що включає:

- придбання мастильних матеріалів, мастильних та охолоджувальних рідин (провідні зарубіжні виробники поставляють фірмові високоякісні експлуатаційні рідини спеціального виготовлення);
- організацію зберігання та підтримання запасів експлуатаційних рідин;
- періодичну очистку масел маслоснаповненого силового електрообладнання, у тому числі з використанням мобільних засобів.

Висока якість профілактичних заходів характеризується такими показниками: відхилення від графіка технічного обслуговування $\pm 10\%$, ступінь плановості ремонтів 80–90 %.

Визначений ефективний склад комплексних заходів групи «С» (можливості електрообладнання з відновлення його працездатності) такий:

С1 – забезпечення ремонтпридатності обладнання:

1. Знаходження несправностей (відмов) та їх причин.
2. Зручність ремонту.

С2 – організація технічного сервісу (відновлення працездатності електрообладнання).

С3 – забезпечення запасними частинами.

С4 – забезпечення НТД та експлуатаційною документацією (дії з відновлення працездатності електрообладнання та її елементів).

Ефективні конструктивні рішення з ремонтпридатності електрообладнання (С1) включають:

- пристосованість конструкції до знаходження несправності (відмови) (див. В2);
- рішення, що забезпечують зручність ремонту:
- можливість легкого доступу до пошкоджених елементів електрообладнання;

- можливість швидкого зняття непрацездатних елементів, що не мають складних зв'язків із сусідніми (модульність конструкції);
- можливість використання високоефективних інструментів і пристроїв, у тому числі тих, що поставляються провідними виробниками;
- зручність пози сервісного персоналу при ремонті тощо.

Заходи технічного сервісу з відновлення працездатності електрообладнання (С2). Для виконання ремонту електрообладнання в польових умовах агрегатним методом використовуються спеціально виготовлені мобільні майстерні, оснащені малогабаритним краном високої вантажопідйомності, кузовом для перевезення агрегатів, генератором, зварювальною установкою, компресором, комплексом інструментів і запасних частин та ін.

Стаціонарні майстерні повинні мати:

- прийнятні площі;
- мостові крани достатньо високої вантажопідйомності;
- необхідний набір стендів, обладнання та інструментів;
- можливості з навантаження та доставки;
- обладнання для фарбування та мийки та ін.

Сервісні служби працюють 7 днів на тиждень, 24 години на добу. Є також обмінний фонд агрегатів для виконання ремонту агрегатним методом. Сервісна служба дилера у разі потреби надає кваліфіковані консультації сервісним службам споживача.

У передовій практиці відсоток виконання замовлень на ремонт у місці роботи машини становить: протягом дня – 85 %, протягом доби – 95 %.

Забезпечення запасними частинами сервісних служб (С3) здійснюється з власних складів. При цьому під запасною частиною розуміється складова частина електрообладнання (деталь або складальна одиниця), призначена для заміни такої самої частини, що перебуває в експлуатації.

У складі постачальників можуть бути зовнішні (у т.ч. виробники електрообладнання) і внутрішні (підрозділи, що здійснюють відновлення

працездатності агрегатів і деталей електрообладнання).

На складах дилера зберігаються запасні частини, які користуються великим попитом. При цьому на початковому етапі формування запасів запасних частин дилером виробник допомагає визначити оптимальні запаси за номенклатурою і кількістю запасних частин. Надалі виробник допомагає дилеру правильно спроектувати склад, а також сприяє отриманню дилером сучасного програмного забезпечення для обліку запасних частин та управління їх запасами. За контрактом з виробником на основі замовлень здійснюється регулярна поставка запасних частин, що користуються середнім і малим попитом, вони поставляються за замовленням дилера через Інтернет екстреним порядком (у передовій практиці за 24 години). Таким чином, забезпечується мінімальний термін доставки запасних частин для ремонту (ТО) електрообладнання при мінімальних їх запасах.

У практиці відсоток задоволення попиту на запасні частини зі складів дилера протягом доби становить 90–95 %. Коефіцієнт оборотності запасів протягом року досягає 2–3.

Експлуатаційна і сервісна документація (С4), яка розробляється виробником (згадувалася вище (В4)), повинна містити методичні матеріали:

- зі знаходження несправностей (відмов) та їх причин;
- швидкого і якісного відновлення працездатності машин, у тому числі схему розбирання та складання; склад дій і використовувані інструменти, пристрої; нормативи трудових затрат та ін.

Враховуючи особливості названого складу заходів формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП (підрозд. 2.2), можна зробити висновок, що для покупця електрообладнання також доцільно отримати відповідь на таке запитання: «Як оцінити з позиції надійності пропоноване декількома виробниками електрообладнання, що поставляється за допомогою дилерів?». Отримати відповідь на це питання можна з використанням поширеного в практиці методу рангів [89]. Приклад оцінки надійності однотипного електрообладнання, яке пропонується декількома виробниками, наведено в дод. А.

Виходячи з вищерозглянутого, можна зробити висновок, що характеристики експлуатаційної надійності порівняно з іншими характеристиками електрообладнання мають найбільший вплив на успіх діяльності дистанції електропостачання та є найважливішими показниками споживчої цінності електрообладнання. Важливість суттєвого підвищення рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП повинні усвідомити як керівники служб електропостачання, виробники обладнання, так і дилери. При цьому повинні бути встановлені раціональні відносини між ними на основі розглянутих вище методик.

2.4 Удосконалення методу визначення залишкового ресурсу силового електрообладнання тягових підстанцій в умовах експлуатації

В умовах, коли заміна у великій кількості старіючого силового устаткування ТП практично неможлива, використання цього устаткування зводиться до проблеми підвищення довговічності устаткування. Підвищення довговічності повинне передбачати підвищення надійності, як однієї з основних її властивостей. Проте шляхи вирішення цієї проблеми істотно відрізняються від відомих методів підвищення безвідмовності і ремонтпридатності. Проблема підвищення довговічності зводиться до підвищення залишкового терміну служби. Трудність вирішення цієї проблеми полягає і в тому, що методи оцінки залишкового терміну служби для електроустановок на цей час вивчені недостатньо повно.

Стратегія ПЗР в умовах розвитку ринкових відносин в області ТО і Р у багатьох випадках не забезпечує ухвалення оптимальних рішень. Це пов'язано з тим, що призначення профілактичних робіт здійснюється відповідно до регламенту і не залежить від фактичного технічного стану силового електрообладнання (СЕО) ТП, що призводить до появи додаткових матеріальних і трудових витрат, які на цей час повно і вчасно не забезпечуються.

У цих умовах основним напрямом в розвитку системи ТО і Р є розробка сучасних методів, що базуються на індивідуальному спостереженні за

реальними змінами технічного стану устаткування в процесі експлуатації і комплексній оцінці фактичного технічного стану СЕО.

У цьому напрямі, згідно із запропонованим алгоритмом і математичною моделлю зменшення втрат системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць від відмов силового електроустаткування ТП за рахунок удосконалення системи ТО і Р [91], одним з індивідуально важливих параметрів експлуатаційної надійності є залишковий ресурс електроустаткування [57]. Порівнюючи набуте значення залишкового ресурсу з допустимими межами його зміни, можна дати рекомендації про необхідність виведення електроустаткування в ремонт (відновлення ресурсу) або про продовження його експлуатації. Ресурс можна розглядати як інтегральну оцінку технічного стану устаткування, вимірювану в одиницях напрацювання. Для різних типів електроустаткування напрацювання вимірюється в різних одиницях. Якщо використовуються одиниці виміру ресурсу напрацювання за часом, то нормативний ресурс відповідає встановленому терміну служби, а фактичний ресурс - фактичному терміну служби. У нормативних умовах експлуатації фактичний ресурс електроустаткування приймається рівним нормативному, встановленому в його паспортних даних.

Місце системи ТО і Р у виробничому процесі ТП з підтримки й відновлення ресурсу СЕО показано на рис. 2.4.

Причиною зміни ресурсу силового електроустаткування ТП є не лише фактичний час його експлуатації, але і ряд експлуатаційних факторів, наприклад: підвищені робочі температури при експлуатації; перевантаження електрообладнання; перехідні процеси в електрообладнанні; низька якість ТО і Р та ін., кожен з яких певним чином впливає на зміну технічного стану устаткування. Залежно від їх інтенсивності, характеру умов і режимів роботи відбувається зменшення ресурсу на певну величину. Очевидно, що чим більше відхилення кожного з визначальних параметрів від номінального значення, під впливом експлуатаційних факторів, тим інтенсивніше спрацьовується технічний ресурс обладнання.

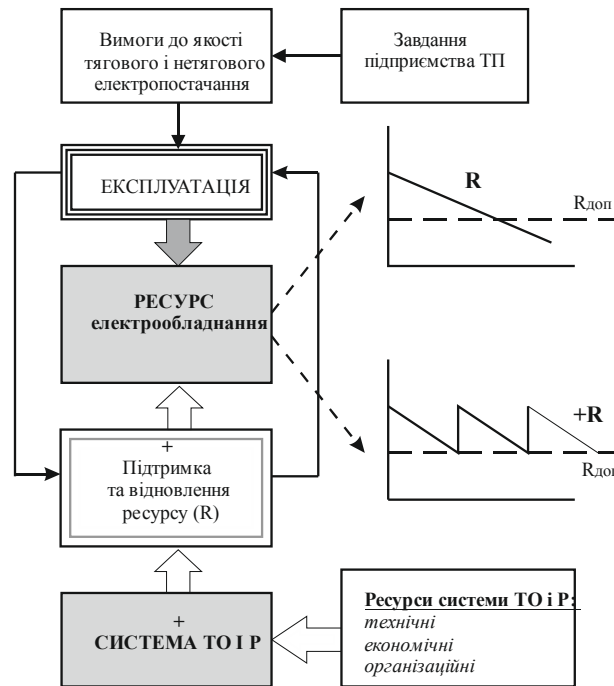


Рисунок 2.4 – Підтримка і відновлення ресурсу силового електрообладнання ТП

Причиною зміни ресурсу силового електроустаткування ТП є не лише фактичний час його експлуатації, але і ряд експлуатаційних факторів, наприклад: підвищені робочі температури при експлуатації; перевантаження електрообладнання; перехідні процеси в електрообладнанні; низька якість ТО і Р та ін., кожен з яких певним чином впливає на зміну технічного стану устаткування. Залежно від їх інтенсивності, характеру умов і режимів роботи відбувається зменшення ресурсу на певну величину. Очевидно, що чим більше відхилення кожного з визначальних параметрів від номінального значення, під впливом експлуатаційних факторів, тим інтенсивніше спрацьовується технічний ресурс обладнання.

З існуючих методів прогнозування залишкового ресурсу найбільш ефективним є метод індивідуального прогнозування для конкретних типів устаткування [92]. Хоча, застосування цього методу вимагає певних витрат, пов'язаних з використанням діагностичних засобів, випробувального устаткування, техніки для обробки отриманої інформації, програмного забезпечення і побудови математичної моделі, проте ці витрати окупаються, враховуючи економічний ефект від отриманих результатів.

Складність проблеми прогнозу залишкового ресурсу електрообладнання, яке вже відпрацювало призначений термін експлуатації, пов'язана в першу чергу з розробкою принципів побудови алгоритму і опису математичної моделі прогнозу. Вказана модель має бути деякою сукупністю фізичних властивостей і характеру процесів деградації устаткування в часі за увесь період експлуатації.

Для визначення технічного стану конкретного силового електроустаткування ТП, автором запропонований коефіцієнт відносної оцінки технічного стану (спрацьованого ресурсу) по визначальному параметру, який можна вчислити для кожного визначального параметра електрообладнання, шляхом порівняння виміряного в даний момент часу значення цього параметра з початковим і граничним значеннями за такою формулою:

$$K_i = 1 - \frac{X_i - X_{Bi}}{X_i - X_{Gi}} \quad (2.14)$$

де X_i - початкове значення i -го визначального технічного параметра по нормативно-технічній документації;

X_{Bi} - вимірне значення i -го визначального параметра при проведенні діагностування;

X_{Gi} - граничне значення i -го параметра, при якому експлуатація цього устаткування недопустима.

На початку експлуатації $K_i = 1$, так як $X_i = X_{Bi}$. У міру спрацьовування ресурсу устаткування вимірне значення визначального параметра X_{Bi} зменшується і при $X_{Bi} = X_{Gi}$ коефіцієнт $K_i = 0$.

Таким чином, технічний стан устаткування по цьому визначальному параметру оцінюється коефіцієнтом K_i , який змінюється в межах $1 \geq K_i \geq 0$.

Проте в кожного типу силового електроустаткування ТП може бути декілька параметрів, які визначають його старіння. У цьому випадку визначити технічний стан цього устаткування можна за значенням мінімального коефіцієнта K_i одного з параметрів, значення якого максимально наближене до граничного (K_{\min}) порівняно з іншими визначальними параметрами.

Для якісної оцінки значення залишкового ресурсу приймемо деякі умови:

- устаткування при дотриманні необхідних умов експлуатації зможе прослужити проектний термін, при цьому його технічний стан у кінці проектного терміну експлуатації буде близьким до граничного ($K_i \approx 0$);

- можлива реальна оцінка технічного стану показала, що у кінці проектного терміну експлуатації ресурс устаткування не вичерпався і є відносний залишковий запас, рівний $K_{зал}^*$ [92];

- приймемо значення залишкового ресурсу з урахуванням обмеження по $K_{min} = 0,1 \div 0,2$, при якому для запобігання відмові подальша експлуатація має бути припинена [92].

З урахуванням цих допущень визначимо приблизне значення залишкового ресурсу за i – м параметром обладнання ТП

$$R_{зал.i} = R_{H.i} \cdot (K_{зал.i}^* - K_{min.i}) , \quad (2.15)$$

де $R_{H.i}$ – нормативний термін експлуатації обладнання за i – м параметром; $K_{зал.i}^*$ – відносний коефіцієнт оцінки залишкового запасу ресурсу електроустаткування ТП за i – м параметром; $K_{min.i}$ – мінімально допустимий коефіцієнт оцінки залишкового запасу ресурсу за i – м параметром.

Поточний режим роботи СЭО ТП характеризується множиною значень K_i для усіх можливих параметрів. Відхилення будь-якого параметра сприяє переходу СЭО в новий режим роботи, якому відповідає нова швидкість спрацьовування ресурсу за i – м визначальним параметром. Для урахування цього чинника при оцінці залишкового ресурсу за i – м визначальним параметром ($R_{зал.i}$) необхідно розробити метод відстежування механізму динаміки старіння електрообладнання ТП з урахуванням значення середньої швидкості зміни визначальних параметрів за весь період експлуатації силового електрообладнання ТП, у відмінності від визначення показників технічного стану устаткування "Гамма-процентне напрацювання до відмови" [93].

Швидкість зміни визначального параметра силового електрообладнання ТП за $i - m$ визначальним параметром, що діагностується, упродовж усієї його експлуатації визначимо за формулою

$$v_i = \frac{X_0 - X_H}{T} \quad (2.16)$$

де X_0 – початкове значення визначального параметра; X_H – виміряне при випробуванні значення визначального параметра; T – час від початку експлуатації до моменту вимірів.

Враховуючи статистичні дані експлуатації СЕО ТП [5] і ГОСТ 27.402 – 95 (Міждержавний стандарт. Надійність в техніці. Плани випробувань для контролю середнього напрацювання до відмови (на відмову). Ч.1. Експоненціальний розподіл) зробимо припущення, що спрацювання ресурсу СЕО ТП за $i - m$ параметром здійснюється в основному за експоненціальним законом. Тоді з урахуванням швидкості спрацювання ресурсу СЕО ТП (2.16) можна розрахувати залишковий ресурс обладнання за $i - m$ визначальним параметром

$$R_{зал.i} = R_{н.i} e^{-(v_i t)} \quad (2.17)$$

Поділивши обидві частини рівності (2.17) на $R_{н.i}$, отримаємо аналогічний вираз у відносних одиницях

$$R_{зал.i}^* = e^{-(v_i t)} \quad (2.18)$$

Залежності залишкового ресурсу обладнання ТП по $i - му$ визначальному параметру $R_{зал.i}^*$ у відносних одиницях (в.о.) від швидкості зміни визначального параметра і часу t , відображені на рис. 2.5.

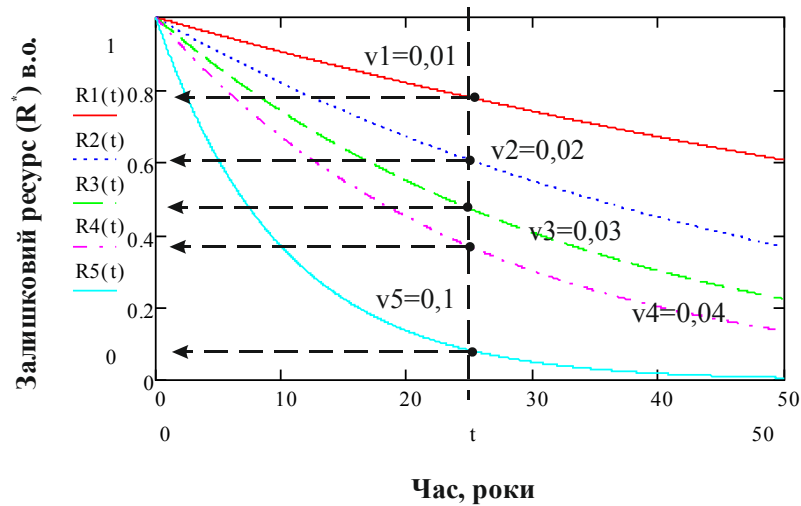


Рисунок 2.5 – Залежність відносного залишкового ресурсу $R_{зал.i}^*$ від швидкості спрацьовування й часу експлуатації t

Як було вказано, при роботі електроустаткування ТП в реальних умовах на нього здійснюють дію N різних експлуатаційних факторів. Допустимо, що на електроустаткування діє фактор F_j . При зміні фактора F_j на величину d_j , фактичний ресурс електрообладнання також змінюється (збільшується або зменшується). Фактор F_j може характеризуватися як одиничною дією на визначальний параметр, так і комплексною дією, які відображують природу досліджуваного експлуатаційного впливу на електрообладнання.

З урахуванням (2.14)–(2.18) та [93, 94] можна записати такий вираз для обчислення фактичного спрацьованого ресурсу електроустаткування $R_{\phi.i}$ за i -м визначальним параметром залежно від зміни фактора F_j

$$R_{\phi.i} = R_{н.i} e^{\frac{-(k_i-1)}{d_j}} \quad (2.19)$$

де $R_{н.i}$ – нормативний ресурс за i -м визначальним параметром.

Розділивши обидві частини рівності (2.19) на $R_{н.i}$, отримаємо вираз фактичного спрацьованого ресурсу за i -м визначальним параметром у відносних одиницях

$$R_{\phi.i}^* = e^{\frac{-(k_i-1)}{d_j}} \quad (2.20)$$

Уведемо в (2.19), (2.20) швидкість (v_i) зміни i -го визначального параметра обладнання ТП, що діагностується упродовж усього періоду його експлуатації (рис. 2.6), та отримаємо вирази

$$R_{\phi,i} = R_{n,i} e^{-v_i \frac{(k_i-1)}{d_j}} \quad (2.21)$$

$$R_{\phi,i}^* = e^{-v_i \frac{(k_i-1)}{d_j}} \quad (2.22)$$

Тоді залежність фактичного спрацьованого ресурсу обладнання ТП за i -м визначальним параметром $R_{\phi,i}^*$ як функції: коефіцієнта спрацьованого ресурсу за i -м визначальним параметром K_i , величини зміни фактора F_j на величину d_j та швидкості зміни визначального параметра силового електрообладнання ТП, що діагностується, наприклад при: $K_i = 0,1 \dots 1,0$; $d_j = \{0,1; 0,4; 0,7; 0,1\}$; при $v_a = 0,0$; $v_b = 0,05$; $v_c = 0,1$; $v_d = 0,25$ матиме вигляд, наведений на рис. 2.6.

Залежність відносного фактичного спрацьованого ресурсу $R_{\phi,i}^*$ СЭО ТП за i -м визначальним параметром (рис. 2.6) показує зміну ресурсу стосовно нормативного, яке може спрацювати обладнання ТП за i -м параметром протягом терміну експлуатації з урахуванням K_i , d_j та v_i . Ця залежність має якісний характер і відображує лише тенденцію зміни ресурсу. Для точного визначення залежності (2.22) необхідно знати реальні значення v_i та d_j які, у свою чергу, можуть бути визначені діагностуванням СЭО ТП.

Для N експлуатаційних чинників F_i вираз (2.22) запишемо як

$$R_{\phi,i}^* = \prod_{i=1}^N e^{-v_i \frac{(k_i-1)}{d_j}} = e^{-\sum_{i=1}^N v_i \frac{(k_i-1)}{d_j}} \quad (2.23)$$

Наприклад, для чотирьох груп експлуатаційних факторів залежність фактичного спрацьованого ресурсу SEO ТП $R^*_{\phi.i}$ за i – м визначальним параметром запишемо у вигляді

$$R^*_{\phi.i} = e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} -v_{i1} \frac{(k_{i_1}^T - 1)}{d_{i_1}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} -v_{i2} \frac{(k_{i_2}^{\text{II}} - 1)}{d_{i_2}} + \sum_{j_3=1}^{n_3} -v_{i3} \frac{(k_{i_3}^{\text{III}} - 1)}{d_{i_3}} + \sum_{j_4=1}^{n_4} -v_{i4} \frac{(k_{i_4}^{\text{TOuP}} - 1)}{d_{i_4}}} \quad (2.24)$$

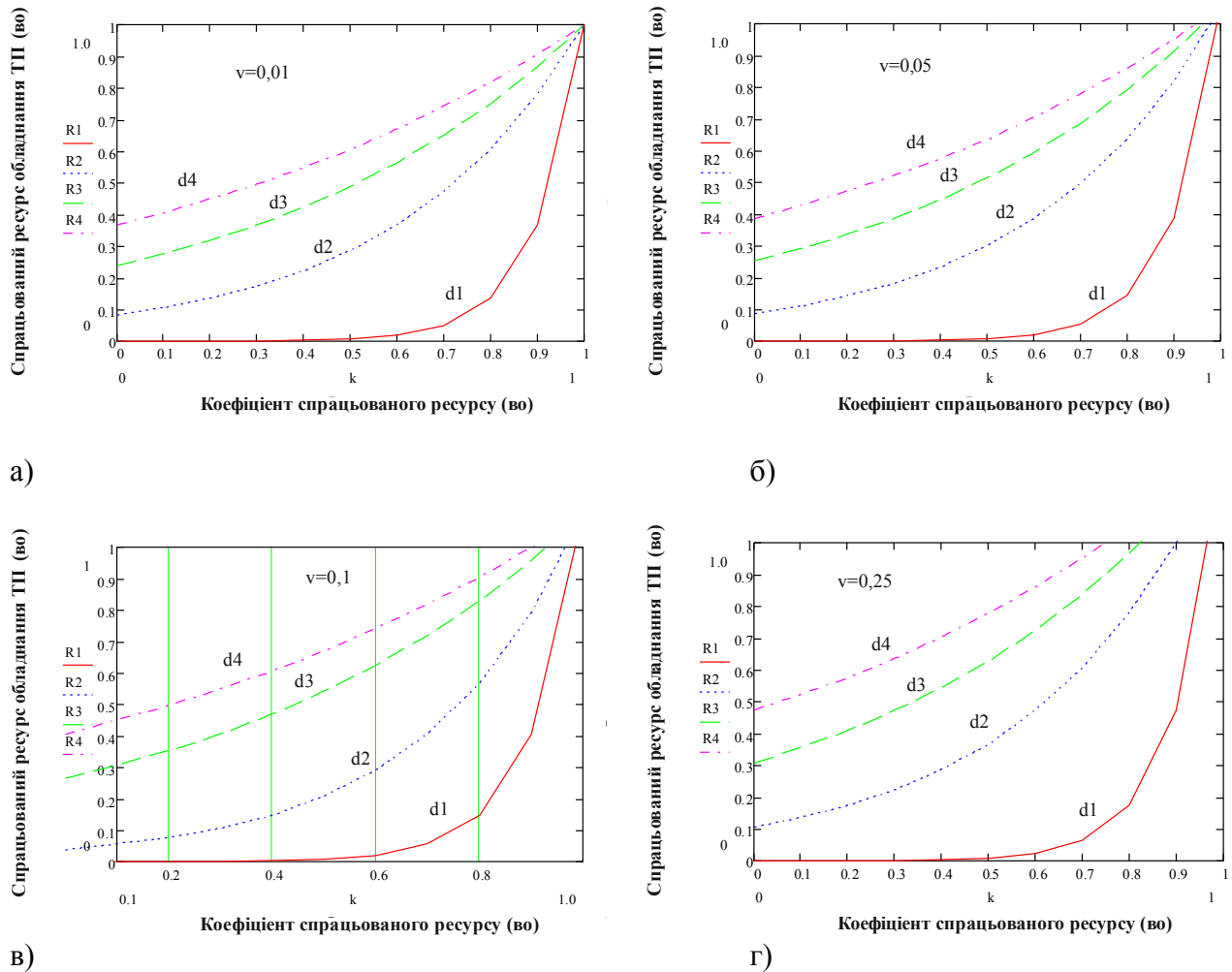


Рисунок 2.6 – Залежність фактичного спрацьованого ресурсу SEO ТП $R^*_{\phi.i}$ за i – м визначальним параметром від коефіцієнта спрацьованого ресурсу K_i , величини зміни фактора F_j на величину d_j і швидкості зміни визначального параметра v_i

У формулі (2.24) $j_1 = 1 \div n_1$ – кількість чинників підвищення робочої температури при експлуатації; $j_2 = 1 \div n_2$ – кількість чинників перевантаження устаткування; $j_3 = 1 \div n_3$ – кількість чинників перехідних процесів; $j_4 = 1 \div n_4$ –

кількість чинників низької якості ТО і Р; $k_{i_1}^T$ – кратність i -го чинника підвищення робочої температури; d_{i_1} – відносне відхилення i -го чинника підвищення робочої температури; $k_{i_2}^{II}$ – кратність i -го чинника перевантаження електроустаткування; d_{i_2} – відносне відхилення i -го чинника перевантаження електроустаткування; $k_{i_3}^{III}$ – кратність i -го чинника перехідних процесів в електроустаткуванні; d_{i_3} – відносне відхилення i -го чинника перехідних процесів в електроустаткуванні; $k_{i_4}^{TOuP}$ – кратність i -го чинника недостатньої якості ТО і Р; d_{i_4} – відносне відхилення i -го чинника недостатньої якості ТО і Р, при яких ресурс СЕО змінюється, при цьому $n_{i_1} + n_{i_2} + n_{i_3} + n_{i_4} = N$.

Якщо силове електрообладнання ТП вже спрацювало деякий ресурс $R_{\phi_{спр.i}}^*$ по i -му визначальному параметру, тоді можна визначити нормативний залишковий ресурс по i -му визначальному параметру за умови подальшої роботи силового електрообладнання ТП в нормативних умовах

$$R_{H.зал.i}^* = 1 - R_{\phi_{спр.i}}^* \quad (2.25)$$

Розроблений метод оцінки ресурсу силового електроустаткування ТП за i -м визначальним параметром з урахуванням умов експлуатації і параметрів фактичного спрацьованого ресурсу $R_{\phi.i}^*$, коефіцієнта спрацьованого ресурсу K_i , величини зміни чинника d_j і швидкості зміни визначального параметра v_i дозволяє розрахувати фактичний спрацьований ресурс $R_{\phi_{спр.i}}^*$ та нормативний залишковий ресурс $R_{H.зал.i}^*$ СЕО ТП за i -м визначальним параметром системи тягового електропостачання.

Цей метод може бути використаний для оцінки фактичного спрацьованого ресурсу за i -м визначальним параметром для різних видів

електроустаткування ТП. Приклад прогнозування ресурсу трансформатора за параметром найбільш нагрітої точки (ННТ) наведено в дод. Б.

2.5 Ризик-аналіз технічного стану силового електрообладнання тягових підстанцій

2.5.1 Процес управління ризиками

Функціонування системи ТО і Р включає в себе моніторинг технічного стану обладнання, аналіз отриманих результатів, своєчасне проведення ремонтів з частковим або повним відновленням ресурсу обладнання при прийнятному рівні матеріальних і фінансових витрат. Однак сьогодні існує суттєве зниження ефективності використовуваної системи ПЗР обладнання СТЕ. Це викликано недосконалістю планування в сучасних умовах експлуатації та організації ремонтних робіт у частині необґрунтованого зменшення витрат на проведення технічного обслуговування та ремонту, відсутністю якісних запасних частин тощо. Тому актуальним стає питання розробки і впровадження сучасних методів і способів підвищення ефективності існуючої системи, одним з яких є формування на підприємствах електрифікованих залізниць України системи внутрішнього контролю та управління ризиками експлуатації обладнання тягових мереж.

У сучасних умовах експлуатації обладнання СТЕ увага з боку керівництва підприємства до управління ризиками зумовлена необхідністю посилення контролю над незапланованими матеріальними і фінансовими витратами при експлуатації обладнання, а також зниженням збитку від виходу його з ладу.

Управління ризиками – це логічний і систематичний процес, який можна застосовувати для вибору шляху подальшого вдосконалення експлуатації обладнання, підвищення ефективності функціонування системи ТО і Р і який передбачає ретельний аналіз технічного стану пристроїв СТЕ для прийняття рішень.

Ризик-менеджмент включає в себе стратегію і тактику управління [96-98]. Під стратегією управління розуміють напрям і спосіб використання засобів

досягнення поставленої мети. Під тактикою – конкретні методи і прийоми для досягнення стратегічної мети в конкретних умовах. Завданням тактики управління є вибір оптимального рішення і найбільш прийнятних методів і прийомів управління.

Головним принципом побудови системи ризик-менеджменту діяльності дистанції електропостачання електрифікованих залізниць є комплексне урахування ризику при прийнятті рішень з планування діяльності, оцінка загальних результатів діяльності, а також діяльності підрозділів дистанції електропостачання та конкретних керівників.

Реалізація системи ризик-менеджменту передбачає:

- організацію ризик-менеджменту (формування спеціальних функцій і процедур в управлінні процесами підприємства та забезпечення їх виконання);
- формування необхідного методологічного забезпечення діяльності з управління ризиками;
- розробку інформаційно-аналітичних систем ризик-менеджменту і їх практичну реалізацію.

Система управління ризиками повинна ґрунтуватися на таких принципах:

- цілеспрямоване постійне усвідомлення й відстеження ризиків;
- оцінка ймовірності та наслідків виникнення тієї чи іншої несприятливої ситуації;
- формування і постійне оновлення інструментарію управління ризиками;
- встановлення лімітів ризику (максимально точне визначення межі збитку);
- розробка рекомендацій щодо формування стратегії і ефективного розподілу ресурсів з урахуванням ступеня ризику;
- повнота і своєчасність відображення величин ризиків у системах управлінської інформації (інформаційних системах).

В основу процесу аудиту та управління ризиками експлуатації обладнання тягових мереж покладена якісна і вартісна ідентифікація ризик-індикаторів. Ризик, який може застосовуватися в питаннях гарантування безпеки руху

поїздів, у трактуванні ризик-менеджменту може мати властивості операційного ризику.

Операційний ризик можна визначити як агреговане поняття, що об'єднує технічні, технологічні, інформаційні ризики, які виникають в поточній операційній діяльності, ризики неадекватної поведінки персоналу та ін. [99].

Операційні ризики можна розбити на такі групи:

- техногенний (виробничий) ризик – це ризик, фактори якого мають техногенне походження, джерелом якого є техніка і обладнання, що використовується у виробництві;
- ризик персоналу – ризик втрат, пов'язаний з можливими помилками співробітників, шахрайством, недостатньою кваліфікацією, нестійкістю штату організації, можливістю несприятливих змін у трудовому законодавстві та ін.;
- ризик організаційної структури управління – ризик втрат, пов'язаний з неправильним вибором організаційної структури процесів. Проявляється, насамперед, у додаткових фінансових затратах та організаційних труднощах у зв'язку з нечітким розподілом зон відповідальності між підрозділами підприємства.

Класифікація ризиків має строго прикладне призначення при формуванні прозорого і аналітично обробленого матеріалу з метою адекватного опису ризиків з подальшою побудовою системи управління ними. Таким чином, класифікація ризиків описує певне коло діяльності дистанції електропостачання залежно від мети та завдань керівництва (табл. 2.2).

Діагностика ризиків являє собою аналіз технічних процесів [100] підприємства з метою виявлення факторів ризику й реалізується в ході ризик-аудиту. Це комплексний аналіз параметрів технічного обладнання та напрямів діяльності підприємства з метою ідентифікації, опису та класифікації ризиків. Найбільш поширений метод при діагностиці ризиків базується на статистичних спостереженнях, які є найбільш об'єктивними і точними. Виявлення ризиків є пріоритетним етапом, фундаментом побудови системи управління ризиками. На ньому ґрунтуються всі інші процедури ризик-менеджменту, оскільки, зрештою,

якісна діагностика визначає успішність управління ризиками та рівень ефективного управління в цілому.

Таблиця 2.2 – Класифікація ризиків

Класифікаційна ознака	Вид ризику	Характеристика ризику
Залежно від етапу вирішення проблеми	На етапі прийняття рішення	Помилки в застосуванні методів визначення рівня ризику через нестачу інформації або її низьку якість, використання дезінформації
	На етапі реалізації рішення	Помилки в реалізації правильного рішення, несподівані зміни суб'єктивних умов
За масштабами	Локальний	Ризик окремого підприємства рівня ЕЧЕ
	Регіональний	Охоплює роботу підприємства на рівні ЕЧ
	Галузевий	Ризик, пов'язаний зі специфікою функціонування Укрзалізниці
За ступенем допустимості	Мінімальний	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 0-25 %
	Підвищений	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 25-50 %
	Критичний	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 50-70 %
	Недопустимий (катастрофічний)	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 75-100 %

Процес управління ризиками на підприємстві можна зобразити у вигляді схеми (рис. 2.7).

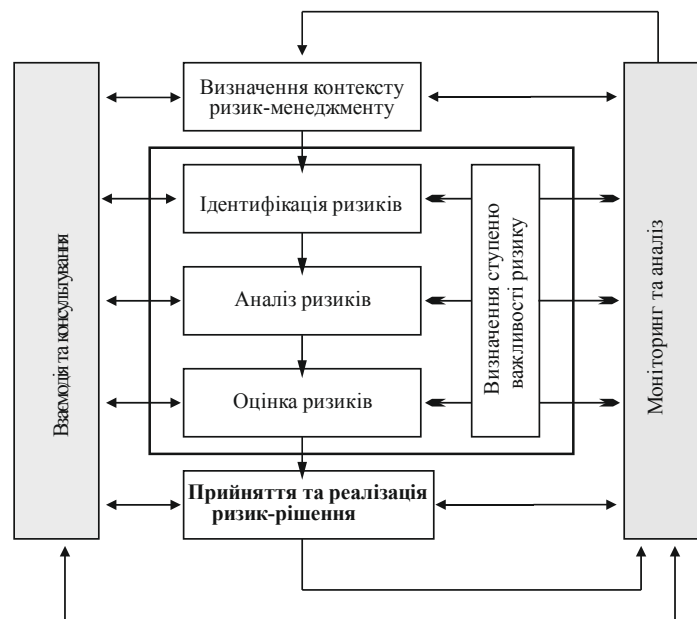


Рисунок 2.7 – Алгоритм процесу управління ризиками

Розглянемо структурну схему процесу управління ризиками.

Взаємодія та консультування. На кожному етапі процесу управління ризиками необхідно проводити обмін інформацією з внутрішніми і зовнішніми учасниками цього процесу.

Визначення контексту ризик-менеджменту. Визначаються зовнішні та внутрішні параметри функціонування організації та процесу ризик-менеджменту. Також необхідно визначити вимоги за критеріями оцінки ризиків, їх структури і методів аналізу.

Ідентифікація ризиків. На даному етапі відбувається конкретизація ризикової ситуації стосовно досягнення поставленої мети.

Аналіз ризиків. Визначається рівень ризику через ймовірність виникнення ризику і наслідки ризикової ситуації. Виявляються причини і фактори виникнення ризику, масштаби наслідків, конкретизуються і оцінюються моделі й методи контролю ризиків.

Оцінка ризиків. На даному етапі відбувається порівняння рівня ризику до встановлених критеріїв. Визначається баланс між потенційною вигодою і негативними наслідками ризикової ситуації. Проводиться оцінка масштабу керівного впливу на ризик і характеристики цього впливу.

Прийняття та реалізація ризикового рішення. Здійснюється розробка та впровадження керівних впливів, мета яких – збільшення потенційних вигод і зниження потенційних витрат відносно до ризикових ситуацій.

Моніторинг та аналіз. Відстеження та аналіз ефективності процесу управління ризиками. Проводиться на кожній стадії процесу управління.

2.5.2 Розробка методу та математичної моделі ризик-аналізу стану силового електрообладнання тягових підстанцій

Враховуючи розглянутий процес управління ризиками, розробимо математичну модель і методику аналізу експлуатації обладнання ТП з використанням основних принципів теорії ризиків [97-102]. Метод оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій у загальному вигляді має

ймовірнісний характер, а параметрами процесу є статистичні характеристики.

Фактичну якість експлуатації обладнання ТП можна формалізувати у вигляді вектора динамічних показників експлуатаційної роботи:

$$Y(t) = \left[D_j(t), K_{з.відм}(t), K_{відм.i}(t), T_{відм.i}(t), N_{затр.n}(t), T_{затр.n}(t) \right], \quad (2.26)$$

де $D_j(t)$ – діагностичні оцінки технічного стану j видів обладнання ТП;

$K_{з.відм}(t)$ – загальна кількість відмов обладнання ТП;

$K_{відм.i}(t)$, $T_{відм.i}(t)$ – відповідно кількість і тривалість відмов i технічних пристроїв обладнання ТП за j видами;

$N_{затр.n}(t)$, $T_{затр.n}(t)$ – відповідно кількість і час затриманих поїздів за n видами – вантажних, пасажирських, приміських.

Вектор динамічних показників експлуатаційної роботи $Y(t)$ залежить від умов експлуатації обладнання ТП, які характеризуються вектором динамічних показників умов експлуатації:

$$X(t) = \left[A_{ткм}(t), V_{діл}(t), M_{в}(t), N_{Пn}(t), W_{ерс}(t), U_{рег}(t) \right], \quad (2.27)$$

де $A_{ткм}(t)$ – перевізна тонно-кілометрова робота у вантажному русі на ділянці, млн т · км брутто;

$V_{діл}(t)$ – швидкість на ділянці, км/год;

$M_{в}(t)$ – середня маса вантажного поїзда, т;

$N_{Пn}(t)$ – кількість на ділянці поїздів, що обертаються, за n видами – вантажних, пасажирських, приміських;

$W_{ерс}(t)$ – тягове електроспоживання поїздів;

$U_{рег}(t)$ – вектор регулюючих факторів, що визначають процес експлуатації обладнання ТП.

Враховуючи результати проведеного статистичного аналізу експлуатації силового електрообладнання ТП (розд. 1), при якому виявлено стохастичний характер відмов обладнання, розглянемо процес експлуатації обладнання ТП як

динамічний керований стохастичний процес.

При цьому при постановці завдання *управління станом обладнання ТП за прогнозованим параметром*, необхідно оцінювати прогнозовані значення в умовах відомої ретроспективної інформації про фактичний стан обладнання Y , і керовані впливи U , які спрямовані на підтримку такого стану протягом часу t [103-108].

Формалізацію задачі прогнозування стану обладнання ТП можна здійснити при описі її векторним диференціальним рівнянням у формі Ланжевена з адитивним білим шумом, запис якого в безперервному вигляді має вигляд:

$$\dot{y} = f(y, u, t) + \xi(t), \quad (2.28)$$

де \dot{y} – повна похідна вектора показника технічного стану обладнання тягових підстанцій як оцінки якості стану утримання обладнання ТП за час t ; f – векторна функція векторних аргументів показників технічного стану обладнання ТП (y) і показників управління технічним станом обладнання ТП (u); t – скалярний аргумент часу; $\xi(t)$ – випадковий процес білого шуму з нульовим математичним очікуванням.

При розгляді процесу експлуатації обладнання тягових підстанцій у вигляді (2.28) знаходження оцінки технічного стану \dot{y} зводиться до розв'язання задачі ідентифікації, яка полягає в тому, що на підставі первинних діагностичних і експериментальних даних про стан обладнання ТП і про умови управління та експлуатації необхідно знайти векторну функцію f , що належить деякому класу функцій, які допускають існування рішень у всьому просторі станів що до \dot{y} або в підгалузях простору станів, у яких дана безперервна функція може бути вирішена.

У свою чергу, з урахуванням стохастичного характеру технічного стану обладнання ТП, фактичні показники стану (y) можуть залежати або визначатися умовами експлуатації обладнання (наприклад, інтенсивністю руху, швидкістю на ділянці, обсягом тонно-км роботи, тощо), мати інтегруючий характер і

обчислюватися через сукупність вихідних даних (наприклад, рівня ризику та наслідків відмов обладнання ТП) і, в загальному випадку, описуватись операторною формою взаємозв'язку A_t з показниками експлуатаційної діяльності (x) в попередні моменти часу (s) за період спостереження $S \in T$ з використанням виразу

$$y(t) = A_t x(s). \quad (2.29)$$

В окремому випадку, коли показники управління u технічним станом обладнання в попередні моменти часу S за період спостереження T змінюються не частіше, ніж $x(s)$, їх також можна віднести до показників, що підпорядковуються співвідношенню (2.29).

Оцінка та прогнозування показників технічного стану обладнання ТП проходить за два етапи. Спочатку на підставі рівняння (2.29) методами ідентифікації при спостережуваних значеннях $y(t)$ і $x(s)$ визначається оцінка A_t^* істинного оператора A_t . Потім знайдена оцінка оператора A_t^* і спостережуваних значень $x(t)$ дозволяє визначити оцінку y^* технічного стану обладнання ТП на підставі виразу

$$y^*(t) = A_t^* x(t). \quad (2.30)$$

Для визначення класу функцій виразу (2.30) і вибору коректного методу ідентифікації на математичне сподівання функції втрат між фактичним і оцінним технічним станом обладнання ТП $\rho[y_t, y_t^*]$ накладається вимога мінімуму:

$$M\{\rho[y_t, y_t^*]\} = \min, \quad (2.31)$$

і в цьому сенсі накладається вимога близькості оцінки оператора A_t^* до істинного значення оператора A_t . При ідентифікації об'єктів управління, як і в більшості практичних випадків, пошук оптимального оператора здійснюється за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, тобто

$$\rho[y_t, y_t^*] = (y_t - y_t^*)^2. \quad (2.32)$$

Відомо, що при критерії (2.32) рівняння для визначення оптимальної з позиції мінімуму середнього квадрата помилки оцінки оператора A_t являє собою вираз

$$y(t) = A_t^* x(s) = M\{Y(t) | x_s; s \in T\}, \quad (2.33)$$

тобто є оператором умовного математичного сподівання або регресією вихідної змінної $Y(t)$ щодо вхідної $x(s)$.

Тому, з позиції критерію (2.32) оптимальним оператором, що описує стан обладнання ТП, у першому наближенні можна вважати клас лінійних операторів.

З урахуванням визначеного вище класу операторів моделі й характеру технічного стану обладнання ТП як багатовимірного й стохастичного, залежного від умов експлуатації $X(t)$ та включаючи процеси управління $U_{\text{рег}}(t)$ станом обладнання ТП $Y(t)$, як об'єкт моделювання, може бути описано через операційну форму зв'язку A_t , тобто вектор $Y(t) = A_t(X(t), U_{\text{рег}}(t), \xi(t))$, де ξ – стохастична складова через невраховані фактори. Побудова моделі технічного стану обладнання ТП $Y^*(t) = A_t^*(X(t), U_{\text{рег}}(t), \xi(t))$ зводиться до пошуку оцінки оператора моделі обладнання ТП (A_t^*), яка здійснюється методами параметричної ідентифікації [109, 110].

Параметри оператора моделі A_t^* знаходять на базі його запису у вигляді багатовимірного рівняння регресії виду

$$Y_t^* = a_{0,t} + a_{1,t}X_{1,t} + a_{2,t}X_{2,t} + \dots + a_{m,t}X_{m,t} + \xi_t, \quad (2.34)$$

де Y_t^* – оцінка дискретних значень вихідного показника в дискретні моменти часу t ; $X_{1,t} \dots X_{m,t}$ – дискретні значення експлуатаційних і керованих факторів (показників), що використовуються при побудові моделі; M – кількість використовуваних факторів у моделі; $a_{0,t} \dots a_{m,t}$ – параметри моделі.

Для вирішення поставленого завдання – управління якістю утримання

обладнання ТП за прогнозним станом – необхідно знати не тільки фактичні, спостережувані значення вектора показників стану обладнання $Y^* = [y_1^*, y_2^*, \dots, y_r^*]$ у моменти часу $t = 1, 2, \dots, r$ або обчислювані їх оцінки $Y^* = [y_1^*, y_2^*, \dots, y_r^*]$, але і їх прогнозовані значення. При прогнозуванні в момент часу t на один період вперед позначається як момент часу $(t + 1)$, а прогнозовані значення показника – як $Y(t + 1)$. Моменти часу, що передують прогнозованому, – як $(t - 2)$, $(t - 1)$, $(t - 2)$, ..., $(t - r)$, де r – останній момент часу в аналізованому ряду. Відповідно показники в дані моменти часу позначаються як $Y(t)$, $Y(t - 1)$, $Y(t - 2)$, ..., $Y(t - r)$. Як метод прогнозування значень показників стану обладнання ТП і значень ризиків обрано метод, що базується на побудові авторегресійної моделі однокрокової процедури прогнозування:

$$Y_{t+1} = \sum_{j=0}^r a_j Y_{t-j} + \xi_t, \quad (2.35)$$

де j – поточний номер коефіцієнтів a_j рівняння авторегресії, $j = 0, 1, 2, \dots, r$; ξ_t – значення шуму апроксимації Y_{t+1} авторегресії кінцевої довжини.

Функціональну схему розробленої математичної моделі ризик-аналізу та прогнозування технічного стану обладнання ТП наведено на рис. 2.8.

Вхідні дані моделі про умови функціонування обладнання $X(t)$ надходять у вигляді вектора динамічних показників умов експлуатації з інформаційних систем аналізу та обліку виконання графіка руху ЕРС. Діагностична оцінка параметрів технічного стану j видів обладнання ТП $D_j(t)$ надходить у модель у вигляді результатів діагностичних обстежень обладнання автоматизованою інтелектуально-діагностичною системою ТП. При цьому загальний підхід до встановлення *визначальних* діагностичних параметрів технічного стану (ДПТС) обладнання ТП полягає у визначенні таких параметрів технічного стану, які при виході за допустимі межі (ознаки) призводять до відмови обладнання.

Діагностичні параметри технічного стану повинні задовольняти дві основні вимоги:

- параметр служить індикатором працездатності обладнання;
- параметр відновлюється до вихідного (близького до вихідного) значення в результаті проведення ТО і Р.

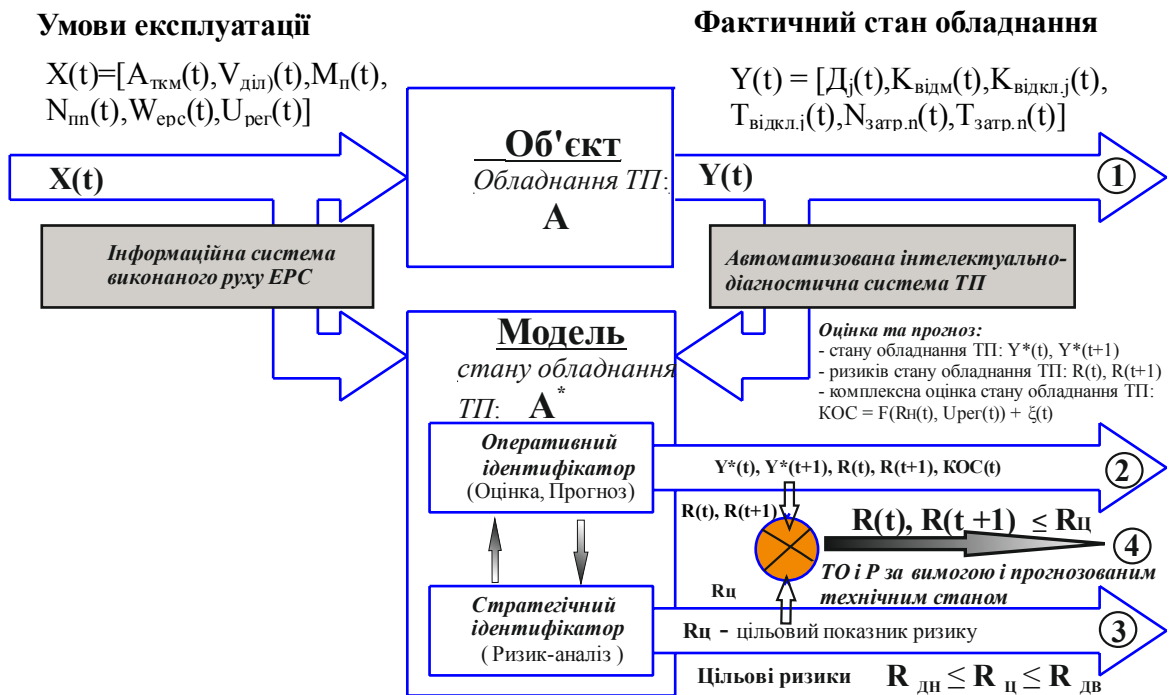


Рисунок 2.8 – Модель ризик-аналізу та прогнозування технічного стану обладнання ТП

Для встановлення ДПТС необхідне проведення комплексу робіт з аналізу проектної документації і даних з експлуатації об'єкта, аналізу результатів контролю його технічного стану тощо. Методику встановлення ДПТС наведено на рис. 2.9.

У блоках 1, 2, 12 показані початковий та кінцевий етапи встановлення ДПТС обладнання ТП. У дужках літерами від *a* до *e* вказані дані, на основі яких приймається відповідне рішення з визначення ДПТС обладнання. Процедура визначення ДПТС обладнання полягає в такому. Якщо показник технічного стану не є числовим, після перевірки необхідності його врахування виконується

аналіз на можливість експертного прогнозування даного параметра технічного стану обладнання. Якщо така можливість відсутня, ставиться завдання з розробки відповідних методик, засобів діагностики, які дозволяють чисельно оцінити параметр технічного стану або забезпечують можливість його експертного прогнозування. Далі перелік ДПТС уточнюється й процедура визначення ДПТС повторюється.

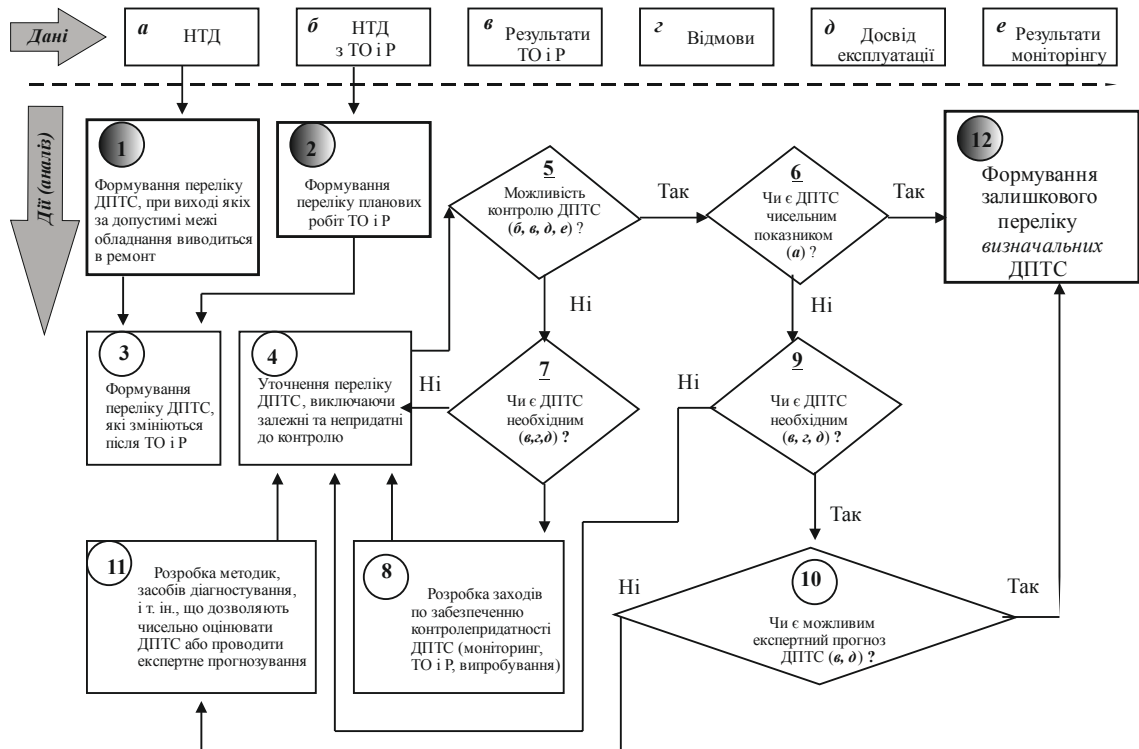


Рисунок 2.9 – Алгоритм встановлення визначальних діагностичних показників технічного стану обладнання тягових підстанцій

Перший вихід схеми об'єкта ризик-моделювання (див. рис. 2.8) характеризує фактичний стан якості експлуатації обладнання ТП $Y(t)$. Склад вектора $Y(t)$ визначено виразом (2.26). У модель дані про фактичний технічний стан устаткування $Y(t)$ надходять з інформаційних систем.

Другий вихід моделі характеризується вектором оцінок показників:

$$Y^*(t) = \left[D_j(t), K_{з.відм}(t), K_{відм.i}(t), T_{відм.i}(t), A_{з.ткм}(t) \right] \quad (2.36)$$

Як інтегральний показник збитку по господарству електрифікації прийнятий $A_{з.ткм}$ – збиток у поїзній роботі від затримки поїздів (за видами –

вантажних, пасажирських, приміських), який формується з показників входу і виходу як

$$A_{з.ткм}(t) = (T_{затр}(t) \cdot V_{діл}(t) \cdot N_{затр}(t) \cdot m_{п}(t)), \quad (2.37)$$

де $T_{затр}(t)$ – час затримки поїздів на момент часу t ; $V_{діл}(t)$ – значення дільничної швидкості поїздів на момент часу t ; $N_{затр}(t)$ – кількість затриманих поїздів; $m_{п}(t)$ – середня вага поїзда на момент часу t .

Оцінки $Y^*(t)$ на відміну від $Y(t)$ визначаються статистичною формою подання показників технічного стану обладнання ТП на базі таких обчислень: математичного сподівання показників (M), модального значення (mod), стандартного відхилення (σ), ранжованих значень показників (АВС-аналіз) і ступеня взаємодії показників. Показник $Y^*(t+1)$ – вектор прогнозних значень $Y^*(t)$ на один період спостережень вперед, який визначається методом лінійного прогнозу.

На даному виході моделі також формуються оцінки обчислюваних ризиків стану обладнання ТП $R(t)$ та прогноз ризиків $R(t+1)$. Оцінка найбільш ймовірних ризиків R_H подій, порушень і збитку визначається як добуток значення модальної ймовірності та модального значення відповідного показника, наприклад $R_{Аз.н} = P_{Аз} \cdot mod A_{з.ткм}$.

Так само на другому виході моделі формується показник *комплексна оцінка стану* обладнання ТП: $KOC(t) = F(R_H(t), U_{рег}(t)) + \xi_H$, де F – функціонал від найбільш ймовірних значень факторів; ξ_H – найбільш ймовірна помилка $\xi(t)$.

На *третьому виході* моделі формуються обчислювані нормативно допустимі верхні $R_{дв}$ і нижні $R_{дн}$ межі діапазонів ризиків у рамках обраної довірчої ймовірності.

На *четвертому виході* моделі аналізується виконання цільових показників

ризиків $R_{Ц}$ у зіставленні з поточним фактичним станом ризику $R(t)$. При розташуванні значень ризиків у допустимому діапазоні, тобто $R(t) \leq R_{Ц}$, виконуються штатні заходи ТО і Р з технічного утримання й ремонту устаткування ТП. При $R(t) \geq R_{Ц}$ здійснюються заходи з метою виявлення причин відхилень, а також виконується обслуговування та ремонт обладнання ТП на вимогу і за прогнозованим технічним станом.

Функціональна стратегія управління ризиками спрямована на подальше вдосконалення експлуатації обладнання ТП, регламентує підвищення якості й ефективності системи ТО і Р на базі виявлення потенційних областей ризику та їх оцінки, запобігання виникненню ризиків на основі їх систематичного прогнозування та оцінки технічного стану пристроїв ТП для прийняття рішень. Запропонована модель ризик-аналізу стану обладнання тягових мереж спрямована на оцінку рівня якості його обслуговування і прийняття стратегії обслуговування при зіставленні поточних і цільових показників ризиків порушень та їх наслідків.

Аналіз ризиків експлуатації обладнання дозволяє оцінити ефективність і контроль реалізації управлінських рішень, спрямованих на вдосконалення правил експлуатації, системи технічного обслуговування та ремонту обладнання СТЕ електрифікованих залізниць.

Методику проведення розрахунку ризик-аналізу стану силового електрообладнання ТП наведено в дод. В.

2.6 Висновки по розділу 2

1. Виходячи з вищерозглянутого, можна зробити висновок, що характеристики експлуатаційної надійності порівняно з іншими характеристиками електрообладнання мають найбільший вплив на успіх діяльності дистанції електропостачання. Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання пов'язане з матеріальними витратами, тому ця проблема повинна вирішуватися на базі техніко-економічних розрахунків для кожного типу силового електрообладнання ТП. Розглянутий досвід показує, що для

вирішення проблеми своєчасного відновлення ресурсу та підвищення надійності пристроїв електропостачання залізниць, скорочення витрат, пов'язаних з ремонтом і простоями, необхідно удосконалювати стратегію регламентованого ТО і Р та застосування інтелектуальної системи обслуговування за фактичним технічним станом.

2. Вперше розроблено нові теоретичні засади з наряду формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання тягових підстанцій, що дозволяє підвищити її показники: коефіцієнт готовності $K_g(t)$ та коефіцієнт технічного використання $K_{me}(t)$ за рахунок встановлення взаємозв'язків між складовими запропонованої концепції.

3. Удосконалено метод прогнозування технічного ресурсу силового електрообладнання тягової підстанції при оцінці динаміки старіння обладнання шляхом введення показника швидкості спрацьовування ресурсу за визначальним $i - m$ параметром під дією різних факторів. Це дозволило більш точно проводити розрахунок залишкового ресурсу електрообладнання при дії різних факторів та умов експлуатації.

4. Дістали подальший розвиток методи ризик-аналізу та прогнозування технічного стану силового електрообладнання тягової підстанції, що відрізняються від відомих методів можливістю приймати обґрунтовані рішення щодо вибору стратегії обслуговування обладнання тягових підстанцій за результатами порівняння поточних і цільових показників ризиків та їх наслідків, що дало можливість прогнозування технічного стану обладнання та виявлення найбільш ймовірних ризиків (R_n) подій, порушень і збитку системи електропостачання.