

УДК 620.91

КОМБІНОВАНИЙ ПРИНЦИП ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Кутін Василь Михайлович

д.т.н., професор

Кутіна Марина Василівна

к.т.н., доцент

Ковальов Артем Іванович

аспірант

Вінницький національний технічний університет
м. Вінниця, Україна

Анотація: Запропоновано принцип комбінованого діагностування який ґрунтується на перевірці технічного стану системи електропостачання промисловості і сільського господарства за сигналом інформаційно змінної, неперервного контролю робоздатності системи за узагальненими діагностичними параметрами та вімовами.

Керування технічним станом відображено моделлю у вигляді структурного інформаційного графа системи з стохастичними зворотними зв'язками. Побудову структурного інформаційного графа здійснено на основі узгодження взаємопов'язаних детермінованого та стохастичних аналізів, коли основним є детермінований підхід, а стохастичний – його розвитком. В основу детермінованого підходу покладено уявлення про інформаційну зміну сигналів системи керування, що визначають вихідний ефект функціонування СЕП. Стохастичний підхід будує модель зв'язку СЕП з ланцюгами керування. Ефективність системи оцінюється ймовірністю випадкового вихідного потоку СЕП – коефіцієнтом готовності. Запропоновано метод визначення коефіцієнта готовності СЕП для комбінованої системи діагностування.

Ключові слова: система електропостачання, комбінована система діагностування, структурний інформаційний граф.

Вступ. Системи електропостачання (СЕП) промислових і сільськогосподарських споживачів функціонально різноманітні, конструктивно складні, мають високу вартість відмов та значну автономність, тому їх відносять до складних систем. В сучасних умовах неможливо забезпечити необхідну якість та надійність СЕП без застосування на всіх стадіях їх життєвого циклу методів та засобів технічної діагностики. Особливо це стосується таких умов застосування СЕП, щоб було важливо або повністю запобігати виникненню аварійних ситуацій або зменшити наслідки аварій, коли вони вже виникли [1,2,3].

Значну кількість недоліків технологічного, технічного і проектного характеру можна усунути на стадії проектування, якісного виготовлення і монтажу. Але дія прихованих дефектів, несприятливих для тривалої роботи факторів, відхилень від розрахункових режимів виявляється поступово і механізм їх дії прихований, тому вирішальне значення має розробка методів діагностування і прогнозування експлуатаційних показників надійності електрообладнання, особливо електротехнічних систем з тривалим терміном використання, характеристики надійності яких можна оцінити виключно за результатами тривалої експлуатації [4, 5].

Зрозуміло, що вибір стратегії керування ТС СЕП, є найбільш відповідальним моментом у всій системі технічної її експлуатації, оскільки цим визначаються найбільш важливі показники ефективності використання СЕП- рівень втрат на відновлення параметрів елементів. В вітчизняній та зарубіжних СТОР [3,5,6,7] в основному використовується стратегія відновлювальних дій після відмови та попереджувальна за наробітком]. Стратегію відновлювальних дій після відмови [8] доцільно застосовувати для елементів, яким властива експоненційна щільність розподілу наробітка на відмову виду

$$f(T) = \lambda \exp(-\lambda T), (1)$$

де T – час безвідмовної роботи;

λ - параметр потоку відмов.

Цю стратегію можна застосовувати і для елементів, відмова яких приводить не до втрати роботоздатності РМ, а до виникнення пошкодження, яке не пов'язане з погіршенням електробезпеки. Економічний показник відновлювальних робіт після відмови – рівень питомих втрат C'_{II} - визначається рівнем втрат від відмови елемента C_0 і його середнім наробітком на відмову \bar{T}

$$C'_{II} = \frac{C_0}{\bar{T}} = C_0 / \int_{T_{min}}^{T_{max}} T f(T) dT, \quad (2)$$

де T_{min} , T_{max} - мінімальний та максимальний час наробітку на відмову;
 $f(T)$ - щільність розподілу наробітку на відмову.

Для керування технічним станом РМ за наробітком роботи групуються в комплекси, які відрізняються за періодичністю і номенклатурою [3, 5, 6,7]. В загальному випадку елемент відмовить і буде відновлений до моменту T_p попереджувального відновлення з ймовірністю

$$Q(T_p) = \int_{T_{min}}^{T_p} f(T) dT. \quad (3)$$

Середній наробіток на відмову, за умови, що вона виникає до T_p , визначимо як

$$T' = \frac{\int_{T_{min}}^{T_p} T f(T) dT}{Q(T_p)}. \quad (4)$$

Середній використаний ресурс елемента з урахуванням відновлення через відмови і попереджувальній заміні через наробіток T_p

$$\bar{T} = \int_{T_{min}}^{T_p} T f(T) dT + T_p [1 - Q(T_p)]. \quad (5)$$

Якщо відсутні неперервні втрати від зміни параметра елемента, питомі втрати

$$C''_{II} = \frac{(C_0 - C_{II})Q(T_p) + C_{II}}{\bar{T}}, \quad (6)$$

де C_{Π} - втрати, пов'язані з попереджувальним відновленням елемента.

Із виразів (1), (6) видно, що зменшуючи T_p можна знизити ймовірність відмови елемента, а збільшуючи T_p - збільшити середній використаний ресурс. Величину T_p в разі досягнення мінімуму питомих втрат можна визначити із диференційного рівняння

$$\frac{dC_{\Pi}''(T_p)}{dT_p} = 0. \quad (7)$$

Розглянемо можливості керування основними показниками РМ - безвідмовністю і рівнем питомих втрат при цих стратегіях відновлення. Для елементів, відмова яких є одночасно і відмовою РМ, в разі відновлювальних дій після відмови, попереджувальне керування ТС взагалі не має сенсу. Рівень безвідмовності і нижня границя втрат в разі відмови в даному випадку визначаються тільки надійністю елемента, яку можна підвищити тільки зміною конструкції самого елемента. Ефективність відновлювальних робіт при даній стратегії можна досягти лише за рахунок автоматизації процесу пошуку пошкодженого елемента.

В разі стратегії за наробітком маємо два види втрат – відмови одних елементів і недовикористаний ресурс інших. Зменшити один вид втрат без одночасного збільшення другого неможливо. Можна тільки мінімізувати сумарні питомі втрати за рівнянням (7). З другого боку, стратегія відновлення за наробітком РМ ґрунтується на використанні в основному евристичних методів оцінки ТС РМ [5,6,7]. Суб'єктивно вирішується і питання періодичності ТО і Р і виводу в технічне обслуговування та ремонт – згідно річному графіку ТО і Р, який складається попередньо на запланований рік і не може відобразити фактичного ТС мережі і обладнання в наперед заданий момент часу. Покладені в основу планування терміну ремонту середні величини ремонтного циклу і міжремонтних періодів, хоч і спрощують питання планування, але мають суттєвий недолік – не дають об'єктивної оцінки суб'єктивної необхідності в ремонті обладнання або діючої мережі.

Оптимізувати взаємодію об'єктивного процесу зміни ТС СЕП і суб'єктивного процесу технічної експлуатації можна шляхом виявлення прихованих дефектів на основі неперервного моніторингу та автоматизації процесу пошуку місця їх виникнення. Якщо моніторинг не може бути неперервним, то повинен передбачатись стан експлуатації (операції), коли СЕП додатково перевіряється. Це потребує створення комбінованої системи діагностування, яка дозволяє виявити поточне значення ТС, порівняти його з потрібним, визначити керувальну дію і реалізувати її за допомогою ланцюгів керування технологічним процесом. Наукові основи її побудови ґрунтуються на структурній інформаційній теорії надійності.

Мета роботи. Підвищення рівня надійності, безпеки і ефективного використання СЕП промисловості і сільськогосподарства шляхом створення комбінованої системи діагностування, що ґрунтується на процесі динамічного керування індивідуальною надійністю елементів СЕП.

Результати дослідження. Принцип комбінованого діагностування ґрунтується на перевірці ТС СЕП за сигналом інформаційної змінної неперервного контролю робоздатності системи за інтегральним діагностичним параметром та відмовам і оптимізації процесу пошуку пошкоджень шляхом спільного використання статичних та динамічних характеристик СЕП. Методологія його побудови ґрунтується на узгодженні причинно-наслідкового детермінованого підходу з його стохастичним розвитком, тобто на структурно-інформаційній теорії надійності [9,10].

В даній системі метою керування є підтримка експлуатаційних показників РМ на заданому рівні протягом визначеного часу. Для СЕП в якості інтегральних експлуатаційних показників використовують

$$\alpha(t) = \{K_{Г}, K_{ПР}, K_{ТВ}, K_{ОГ}\}, \quad (8)$$

де $K_{Г}$ – коефіцієнт готовності;

$K_{ПР}$ – коефіцієнт простою;

$K_{ТВ}$ – коефіцієнт технічного використання;

$K_{ог}$ – коефіцієнт оперативної готовності.

До числа параметрів зовнішнього середовища $L(t)$ відносять масив довідкової бази СЕП та техніко-економічні показники, показники діяльності служби експлуатації та ремонту СЕП, характеристики та параметри ремонтної бази, персоналу, технічного оснащення оперативних та ремонтних бригад, облік наявних матеріалів, запасних частин та комплектуючих пристроїв, дані про кліматичні умови експлуатації РМ та інші.

На рис.2 зображено граф керування ТС СЕП. Перший шлях графа відображає нормальні умови експлуатації СЕП. Другий – керування за технічним станом і наробітком на відмову; третій – керування за відмовами. Для прикладу, розглянемо другий шлях графа. Вітка 1-2 відображає подію ∂_{12} неперервного контролю технічного стану за вибраним діагностичним параметром. В разі втрати роботоздатності з'являється інформаційний сигнал Q_{∂} , подія його передачі в керувальний центр відображається як ∂_{23} . На основі отриманої інформації в керувальному центрі (вузол 3) виробляється керувальна дія (направлення оперативно-виїздної бригади на підстанцію від якої живиться РМ), яка є подією ∂_{31} . У вузлі 2 відбувається перевірка отриманої інформації - подія ∂'_{22} (сигнал $\Theta_{п}$). Якщо інформація достовірна, то відбувається процес пошуку пошкоджених елементів, перевірка ТС апріорно визначених деградуючих елементів, локалізуванню пошкоджених елементів та вмикання резерву, що є подією $\partial_{2'4}$ (сигнал $\Theta_{п.л.}$). Якщо оперативно-виїзна бригада здатна сама відновити пошкодження, то це є подією ∂_{45} . Якщо ні – то передається інформація в керувальний центр – подія ∂_{56} , який приймає рішення – подія ∂_{64} про відновлення системи ремонтною бригадою.

Для визначення умов роботоздатності елементів СЕП використовувались діагностичні моделі типу

$$\bar{Y} = A\bar{X}; A = A_0 \Rightarrow Q, (9)$$

де \bar{X}, \bar{Y} - вектори відповідно вхідної і вихідної величини;

A, A_0 – оператори, що характеризують роботоздатність системи та норму.

На стадії локалізування пошкоджень крім технічних засобів використовуються евристичні методи оцінки ТС.

Взаємодію оператора з об'єктом можна відобразити в такій послідовності.

Оператор збирає інформацію в порядку зниження її надходження

$$v_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}^{(k)} = \frac{1}{t_k} \sum_{\gamma_k} P_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(\gamma_k) \times \left[\sum_y P_{\gamma_1, \dots, \gamma_k}(y) \log_2 P_{\gamma_1, \dots, \gamma_k}(y) - \sum_y P_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(y) \log_2 P_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(y) \right] \quad (10)$$

Накопичує цю інформацію у відповідності з рівнянням

$$P_{\gamma_1, \dots, \gamma_k}(y) = \frac{P_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(y) P_{y, \gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(\gamma_k)}{\sum_y P_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(y) P_{y, \gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(\gamma_k)} \quad (11)$$

Використовує її для вибору дії у відповідності з виразом

$$P_{\gamma_1, \dots, \gamma_k}(y=d) = 1 - \delta \quad (12)$$

де y – діагноз;

k – k -ий за чергою сприйняття образ – носій діагностичної інформації;

γ_k – результат порівняння k -го носія інформації з еталоном $\gamma_k = 0$ – носій співпадає з еталоном; $\gamma_k = 1$ – протилежний результат;

t_k – час отримання оператором k -го носія інформації,

$P_{\gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(\gamma_k)$ - ймовірність сприйняття оператором k -го носія інформації;

$P_{\gamma_1, \dots, \gamma_k}(y)$ - розподіл ймовірностей можливих діагнозів після сприйняття оператором k -носіїв інформації;

$P_{y, \gamma_1, \dots, \gamma_{k-1}}(\gamma_k)$ - ймовірність, яка характеризує досвід оператора по вилученню інформації з k -го носія;

δ - міра ризику оператора у виборі діагнозу в разі нестачі інформації.

Процес пошуку пошкоджень може бути відображений як об'єднання

результатів пошуку дистанційними методами u_1 , топографічним методом u_2 та методом послідовного ділення мережі u_3 , тобто

$$Y = Y_1 U Y_2 U Y_3 \quad (13)$$

Оскільки в основі детермінованого підходу лежить уявлення про інформаційну змінну, що визначає вихідний ефект функціонування РМ, а також зв'язаних з ним сигналів керування нею, то існує можливість установити взаємозв'язок всіх частин електротехнічного комплексу, який складається із об'єкта і ланцюгів керування, в загальний алгоритм функціонування і врахувати їх вплив на кінцевий вихідний ефект системи. Якщо задана множина станів $\Omega = \{\Omega_X\}$, подій $\partial = \{\partial_{ij}\}$ і шляхи керування ТС СЕП є незалежними подіями, то вихідний потік можна визначити як

$$\theta_{\text{вих}} = \bigcup_{i \neq j} \partial_{ij} \theta_{ij}, \quad i=1,2,3 \quad (14)$$

а ймовірність вихідного потоку

$$P(\theta_{\text{вих}}) = \sum_{i=1}^3 P(\theta_{ij}) \cdot P(\partial_{ij} / \theta_{ij}). \quad (15)$$

Для представлення рівняння (14) в розгорнутому вигляді проведемо аналіз інформаційних потоків.

$$\theta_{\text{вих}} = \theta_{15} + \theta_{25} + \theta_{35};$$

$$\theta_{15} = \theta_M \Omega_M = \theta_C \Omega_B \Omega_M, \quad (16)$$

де θ_C - сигнал системи (напруга джерела живлення мережі);

Ω_B, Ω_M - відповідно роботоздатний стан вимикача і мережі.

Для інформаційної змінної θ_∂ справедливе рівняння [10]

$$\theta_\partial (1 - \Omega_\partial \partial_{23} \partial_{31} \partial_{12}) = \overline{\Omega_\partial} \partial_{12} \theta_M, \quad (17)$$

де Ω_∂ - стан, коли зворотній стохастичний зв'язок 21 працює і наступає подія передачі інформації про необхідність відновлен РМ;

$\overline{\Omega_\partial}$ - стан, коли зворотний стохастичний зв'язок 21 не працює;

I – достовірна інформація.

Якщо виконуються умови:

$$\overline{\Omega}_\partial \partial_{23} \partial_{31} = \emptyset; \quad \overline{\Omega}_\partial \partial_{12} = \emptyset; \quad \overline{\Omega}_\partial \partial_{12} + \overline{\Omega}_\partial \partial_{23} \partial_{31} = \mathbf{I},$$

то вхідний потік інформації передається без втрат, а тому

$$\theta_\partial = \overline{\Omega}_\partial \partial_{12} \theta_M \quad (18)$$

де $\overline{\Omega}_p$ - стан, коли зворотний зв'язок 5-6-4 не працює;

тоді

$$\theta_{25} = \overline{\Omega}_\partial \overline{\Omega}_p \partial_{12} \partial_{22'} \partial_{2'4} \partial_{45} \theta_M; \quad (19)$$

Аналогічно в разі керування ТС за відмовами (спрацювання релейного захисту).

$$\theta_{35} = \overline{\Omega}_3 \overline{\Omega}'_p \partial_{17} \partial_{77'} \partial_{7'9} \partial_{95} \theta_M, \quad (20)$$

де $\overline{\Omega}_3, \overline{\Omega}_3$ - стани, коли релейний захист відповідно працює і не працює;

$\overline{\Omega}'_p, \overline{\Omega}'_p$ - стани, коли зворотний зв'язок 5-10-9 відповідно працює і не працює.

Враховуючи рівняння (16), (17), (20) отримаємо

$$\theta_{\text{вих}} = \theta_c \Omega_B \left(\Omega_M + \overline{\Omega}_\partial \overline{\Omega}_p \partial_{12} \partial_{22'} \partial_{2'4} \partial_{45} + \overline{\Omega}_3 \overline{\Omega}'_p \partial_{17} \partial_{77'} \partial_{7'9} \partial_{95} \right) \quad (21)$$

Виходячи із рівняння (21) ймовірність вихідного сигналу комплексу визначимо як

$$\begin{aligned} P(\theta_{\text{вих}}) &= P(\theta_c) \cdot P(\Omega_B) \times \\ &\times \left\{ P(\Omega_M) + \frac{P(\overline{\Omega}_\partial \partial_{12}) \cdot P(\partial_{22'}) \cdot P(\partial_{2'4}) \cdot P(\overline{\Omega}_p \partial_{45})}{[1 - P(\partial_{23} \partial_{31} / \Omega_\partial) \cdot P(\partial_{12})] \cdot [1 - P(\partial_{56} \partial_{64} / \Omega_p) \cdot P(\partial_{45})]} + \right. \\ &\left. + \frac{P(\overline{\Omega}_3 \partial_{17}) \cdot P(\partial_{77'}) \cdot P(\partial_{7'9}) \cdot P(\partial_{95})}{[1 - P(\partial_{78} \partial_{81} / \Omega_3) \cdot P(\partial_{17})] \cdot [1 - P(\partial_{510} \partial_{109} / \Omega'_p) \cdot P(\partial_{95})]} \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

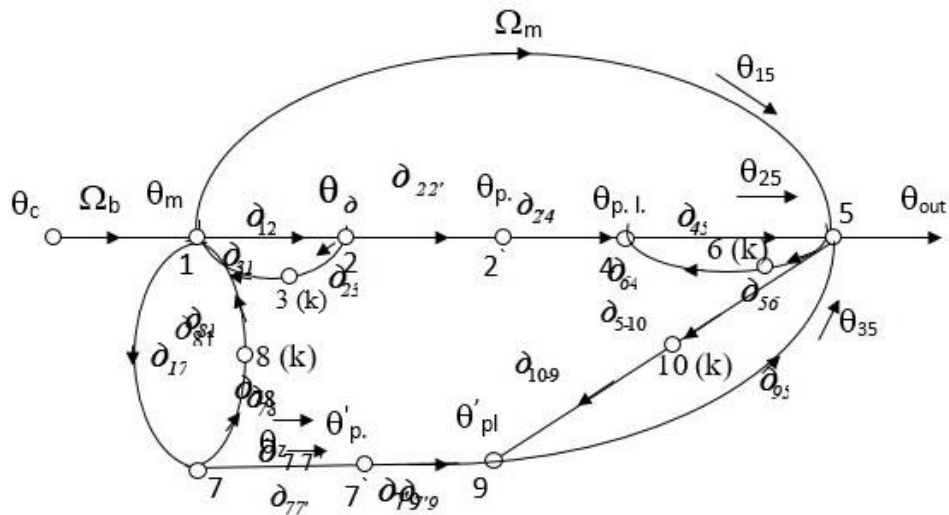


Рис.1 Структурно-інформаційний граф СЕС з ланцюгами керування.

Комбінована система діагностування пропонує зниження інтенсивності відмов СЕС за рахунок підвищення інтенсивності контролю шляхом неперервного контролю ізоляції фаз мережі відносно землі і в разі зниження його до критичної величини переходити в режим локалізування. Це дає можливість описувати систему пуасонівською течією при довільних законах відмов, контролю, ремонту. Можливість такого представлення для нерезерованих систем з миттєвим контролем та відновленням відзначалась в [11,12]. Нижче пропонується метод, який базується на використанні пуасонівського потоку та розвинутий для резервованої системи з довільним характером відновлення та контролю.

Будемо розглядати РМ як модель, що складається із $N_{Л}$ ділянок лінії, які можна виділити комутаційними апаратами, з'єднаних послідовно в плані надійності. Кожна i -а ділянка є вузол з l -кратним резервним з'єднанням елементів k -го типу. Щільність ймовірностей відмови елемента i -го типу – $f_i(t)$, інтенсивність відмов – $\lambda_i(t)$, інтенсивність контролю $W(t)$, щільність імовірності контролю $Z(t)$.

Застосування пуасонівських уявлень зумовлює виконання такої умови

$$T^H \ll T^P, \quad (23)$$

яка обов'язково виконується для РМ, де T^H – середній час перебування

системи в нероботоздатному стані;

T^P – в роботоздатному.

Враховуючи те, що $T_e = T^H + T^P$ та умову (23), можна вважати, що $T_e \gg M_e(T_e) \times \tau_c^{(N_{Л})}$, тоді

$$K_{\Gamma} = 1 - \frac{M_e(T_e) \tau_c^{(N_{Л})}}{T_e}.$$

Комбінована система передбачає профілактичні заміни вузла з частково пошкодженим резервом i -го вузла, тому надалі будемо розрізняти контрольовані відмови, тобто такі, які можна усунути шляхом профілактичних заміні і неконтрольовані, на які реагує релейний захист. Враховуючи те, що в цих випадках система знаходиться в вимкненому стані, K_{Γ} по (2.45) може бути представлений рівнянням

$$K_{\Gamma} = 1 - \frac{1}{T_e} \sum_{i=1}^{N_{Л}} \{M_3^i(T_e)M(t_k^i) + M_{HK}^i(T_e)M(t_{HK}^i)\},$$

де $M_3^i(T_e)$ – середнє число профілактичних заміні i -го вузла;

$M_{HK}^i(T_e)$ – середнє число повних відмов i -го вузла;

$M(t_k^i)$ – математичне очікування тривалості контрольованого простою i -го вузла;

$M(t_{HK}^i)$ – математичне очікування тривалості неконтрольованого простою i -го вузла.

В початковому нестационарному періоді експлуатації РМ, коли для середнього часу безвідмовної роботи елементів вузла виконується умова

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f_i(t) dt \gg T_e ,$$

а тому і

$$M(T_e) = \sum_{i=1}^{N_{Л}} M^i(T_e) \ll N_{Л} , (24)$$

$$M^i(T_e) \approx F^i(T_e), (25)$$

де $F^i(t)$ – функція розподілу часу безвідмовної роботи, яка тотожно рівна ймовірності відмови i -го вузла. Розповсюджуючи (25) на поняття “профілактична заміна” та “повна відмова” маємо

$$K_{\Gamma} = 1 - \frac{1}{T_e} \sum_{i=1}^{N_{\text{Л}}} \{F_3^i(T_e)M(t_{\text{К}}^i) + F_{\text{НК}}^i(T_e)M(t_{\text{НК}}^i)\}. \quad (26)$$

Із виразу (26) зрозуміло, що кожний вузол тепер може розраховувати не на випадкове число повних відмов і замін, а лише на одне з цих явищ за T_e .

Введемо поняття $S(t)$ – поріг відновлення, тобто число пошкоджених елементів у вузлі, з перевищенням якого вузол замінюється, а також відмітимо високу інтенсивність контролю в комбінованій системі

$$\int_0^{\infty} tZ(t)dt \ll T_e. \quad (27)$$

Вважаючи, що $S(t)$ є дискретна випадкова величина із спектральними величинами $0,1,2,\dots$ і дискретний процес $S(t)$ є марковським процесом, тобто для будь-якої множини $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$ виконується умова

$$P(S_n, t_n | S_1, t_1; \dots; S_{n-1}, t_{n-1}) = P(S_n, t_n | S_{n-1}, t_{n-1}) \quad (28)$$

та такі властивості перехідних ймовірностей [13, 14]

$$P(S_2, t_2 | S, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } S_2 < S \\ 1 - \bar{\alpha}\Delta t + O(\Delta t) & \text{при } S_2 = S \\ \bar{\alpha}\Delta t + O(\Delta t) & \text{при } S_2 = S + 1 \\ O(\Delta t) & \text{при } S_2 > S + 1 \end{cases}, \quad (29)$$

де $\Delta t = t_2 - t$;

$S, S_2 = 0, 1, 2, \dots$, а через $O(\Delta t)$ позначені такі члени, що $O(t) / \Delta t \rightarrow 0$

коли

$\Delta t \rightarrow 0$;

$\bar{\alpha}$ – середнє число явищ за одиницю часу, або середня швидкість відліку в процесі Пуасона.

Розгорнемо рівняння (26) для профілактичних замін

$$F_3^i(T_e) \approx \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{0 \leq t \leq T_e} C_{\ell+1}^S \left[\int_0^t f_i(\tau) d\tau \right]^S (\ell+1-S)\lambda_i(t)\Delta t + O(\Delta t) \approx \int_0^{T_e} C_{\ell+1}^S \left[\int_0^t f_i(\tau) d\tau \right]^S (\ell+1-S)\lambda_i(t) dt; \quad (30)$$

$$M(t_K^i) = \int_0^{\infty} t g_i(t) dt, \quad (31)$$

де $C_{\ell+1}^S$ – число комбінацій з $\ell+1$ по S ;

$g_i(t)$ – щільність розподілу часу контрольованих простоїв i -го вузла;

t – верхня межа, що носить умовний характер, але враховуючи (22) та відповідну вимогу швидкого відновлення, таке представлення є допустимим.

Аналогічно

$$F_{HK}^i(T_e) \approx \lim_{\substack{\Delta t_1 \rightarrow 0 \\ \Delta t_2 \rightarrow 0}} \sum_{0 \leq t_1 \leq t_2} \sum_{0 \leq t_2 \leq T_e} C_{\ell+1}^S \left[\int_0^{t_1} f_i(\tau) d\tau \right]^S (\ell+1-S)\lambda_i(t_1)\Delta t (\ell-S) \left[\int_{t_1}^{t_2} f_i(\tau) d\tau \right]^{\ell-S-1} \times \\ \times \left[1 - \int_{t_1}^{t_2} Z(\theta) d\theta \right] \lambda_i(t_2)\Delta t_2 + O(\Delta t) \approx \int_0^{T_e} C_{\ell+1}^S (\ell+1-S)(\ell-S)\lambda_i(t_2) \int_0^{t_2} \left[\int_0^{t_1} f_i(\tau) d\tau \right]^S \times \\ \times \left[\int_{t_1}^{t_2} f_i(\tau) d\tau \right]^{\ell-S-1} \left[1 - \int_{t_1}^{t_2} Z(\theta) d\theta \right] \lambda_i(t_1) dt_1 \quad (32)$$

$$M(t_{HK}^i) = \int_0^{T_e} \left[\int_{\tau'}^{\infty} t Z(t) dt \right] f^i(\tau') d\tau', \quad (33)$$

де $f^i(\tau') = \frac{d}{dt} F_{HK}^i(\tau')$;

θ – час контролю.

Використовуючи рівняння (30)-(33) можна проаналізувати вплив профілактичних заміन на загальну кількість відмов та дати оцінку K_{Γ} .

Для практичних цілей вважають, що закони відмов, відновлень та контролю стаціонарні.

Якщо вони мають інтенсивність λ, μ, W а вузли вважати рівноцінними у відношенні ремонтоздатності та рівнонадійні, то K_{Γ} можна визначити як

$$K_{\Gamma} = 1 - \frac{N_{\text{Л}}}{T_e} K_1 (\lambda T_e)^{s+1} \left[K_2 \left(\frac{\lambda}{W} \right)^{1-s} \frac{1}{W} + \frac{1}{\mu} \right], \quad (34)$$

де K_1, K_2 – коефіцієнти пропорційності.

Коефіцієнт простою системи може бути визначений як

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\Gamma} = \frac{1}{T_e} \sum_{i=1}^{N_{\text{Л}}} \{F_3^i(T_e)M(t_{\text{К}}^i) + F_{\text{НК}}^i(T_e)M(t_{\text{НК}}^i)\}. \quad (35)$$

Перейдемо до визначення коефіцієнта технічного використання.

Коефіцієнт технічного використання РМ запишемо як

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{T_c}{T_c + \tau_c + \eta_c}, \quad (36)$$

де η_c – середній час обслуговування системи.

Якщо контрольовані (планові) вимикання вважати незалежними явищами, тоді для послідовно з'єднаних вузлів РМ, частота контрольованих вимикань, як і частота відмов, відповідає сумі контрольованих вимикань вузлів, тобто

$$v_c^{(N_{\text{Л}})} = \sum_{i=1}^{N_{\text{Л}}} v_i \quad (37)$$

при середньому часі обслуговування

$$\eta_c^{(N_{\text{Л}})} = (v_c^{(N_{\text{Л}})})^{-1} \sum_{i=1}^{N_{\text{Л}}} v_i \eta_i. \quad (38)$$

В реальних умовах в разі планового вимикання РМ вимикається декілька взаємопов'язаних вузлів. Наприклад, трансформатор 110/35/10 кВ і повітряна або кабельна мережа 6, 10 кВ, що від нього живиться, трансформатор та шини розподільного пристрою. Це вказує на те, що сумарна частота контрольованих вимикань ланцюга менше частот окремих вузлів. Тому [15, 16] один із вузлів ланцюга, який частіше вимикається, називають базовим, а відносну частоту контрольованих вимикань інших вузлів по відношенню до базового - коефіцієнтом співпадання, статистично його визначають як

$$g_{i0} = \frac{m_{i0}(t)}{M_i(t)}, \quad (39)$$

де $m_{i\delta}(t)$ – число контрольованих вимикань i -го вузла, які виконують одноразово з вимиканням базового елемента за період t ;

M_i – загальна кількість контрольованих вимикань i -го вузла. В [13] наведені коефіцієнти співпадання основних елементів РМ.

Якщо враховувати коефіцієнти співпадання, то основні показники контрольованих вимикань можуть бути визначені як:

$$v_c^{(N_L)} = v_\delta + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq \delta}}^{N_L} v_i (1 - g_{i\delta}) \quad (40)$$

$$\eta_c^{(N_L)} = (v_c^{(N_L)})^{-1} [v_\delta \eta_\delta + v_{\max} (\eta_{\max} - \eta_\delta) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq \delta}}^{N_L} v_i (1 - g_i)] \quad (41)$$

де v_δ, η_δ – частота контрольованих вимикань та середній час обслуговування базового елемента;

v_{\max}, η_{\max} – ті ж показники, але вузла ланцюга, у якого максимальний час обслуговування;

N_L – число вузлів в ланцюзі.

Формулами (40) і (41) користуються, коли система не еквівалентна. Після еквівалентування вузлів контрольовані вимикання вважаються незалежними явищами та застосовують формули (37) і (38).

Для аналізу виразу (36) перетворимо його до вигляду

$$K_{ТВ} = 1 - \frac{\tau_c^{(N_L)} + \eta_c^{(N_L)}}{T_c^{(N_L)} + \tau_c^{(N_L)} + \eta_c^{(N_L)}} = 1 - \frac{M_B(T_e)(\tau_c^{(N_L)} + \eta_c^{(N_L)})}{T_e + M_B(T_e)(\tau_c^{(N_L)} + \eta_c^{(N_L)})} \quad (42)$$

Враховуючи те, що $T_e \gg M_B(T_e)(\tau_c^{(N_L)} + \eta_c^{(N_L)})$, (42) подамо у вигляді

$$\begin{aligned} K_{ТВ} &\approx 1 - \frac{M_B(T_e)\tau_c^{(N_L)}}{T_e} - \frac{M_B(T_e)\eta_c^{(N_L)}}{T_e} = K_\Gamma - \frac{M_B(T_e)\eta_c^{(N_L)}}{T_e} = \\ &= K_\Gamma - \omega_c^{(N_L)}\eta_c^{(N_L)} = K_\Gamma - \sum_{i=1}^{N_L} \omega_i \frac{\sum_{i=1}^{N_L} v_i \eta_i}{\sum_{i=1}^{N_L} v_i}. \end{aligned} \quad (43)$$

Аналіз виразу (43) показує, що величина $K_{ТВ}$ залежить від частоти та тривалості контрольованих та неконтрольованих вимикань, які є випадковими явищами та взаємопов'язані. Збільшуючи частоту контрольованих вимикань можна зменшити кількість раптових відмов.

Аналітично отримати таку залежність дуже складна задача, яка потребує великої кількості припущень та обмежень при невизначеності похибки для цільової функції, тому для числової оцінки зв'язку між часом контрольованих та неконтрольованих вимикань користуються статистичними даними параметрів надійності елементів РМ.

Висновки. Динамічне керування ТС СЕП для підвищення надійності і безпеки її експлуатації, можна забезпечити на основі комбінованої системи діагностування (КСД). Вона дозволяє отримати високі показники діагностування за рахунок нового принципу перевірок, коли передбачається процедура оцінки ТС СЕП за сигналом неперервного контролю узагальнюючого діагностичного параметру, перевірки діагнозу більш точними методами, пошуку місця несправності автоматизованими методами, перевірки попередньо визначених для даного циклу елементів СЕП по критерію мінімуму витрат та вибору стратегії ремонтно-обслуговуючих дій за результатами контролю параметрів технічного стану, наробітком на відмову та відмовами. Процес керування технічним станом запропоновано відображати моделлю у вигляді структурного інформаційного графа системи з стохастичними зворотними зв'язками.

Методологія його побудови базується на узгодженні взаємопов'язаних детермінованого і стохастичних аналізів, коли основним є детермінований підхід, а стохастичний його розвитком. В основу детермінованого підходу покладено уявлення про інформаційну змінну сигналів системи керування, що визначають вихідний ефект функціонування СЕП, тобто детермінований підхід враховує аналогові зв'язки. Стохастичний дозволяє побудувати модель зв'язку об'єкта з ланцюгами керування. Ефективність системи оцінюється ймовірністю випадкового вихідного потоку об'єкта – коефіцієнтом готовності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электрических сетей / под. ред. Д. Л. Файбисовича – 3е изд. Перераб и доп., - М. ЭНАС, 2009.- 329 с.
2. Кизим Н. А., Лелюк А. В. «Аналіз стану електроенергетичного сектора України» In SPIN, № 7616, p. 1550, 2019
3. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних споруд. «Відкрите засідання НКРЕКП 29 березня 2019 року» Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 році (постанова від 29.03.2019, №440) [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://www.nerc.gov.ua/filearch/Catalog3/RichnyizvitNKREKP2018.pdf/>
4. Кутін В. М. Діагностика електрообладнання: Навчальний посібник/ В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна – Вінниця ВНТУ, 2014 – 161 с.
5. ГДК 34.20.507-2003 «Правила Технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Правила » [Чинний від 2007-04-15], Львів: ОРГРЕС, 2003, 597с.
6. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. - К.:Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2003 329с.
7. Кутін В. М. Вибір стратегії ремонтно-обслуговуючих дій систем електропостачання промисловості і агропромислового комплексу / В. М. Кутін //Енергетика і електрифікація:2003 - №9 – С. 47-51.
8. Кутін В.М. Вибір стратегії відновлювальних дій складних електромеханічних систем / В. М. Кутін, С. В. Матієнко, В. О. Травінський, Ю. М. Притула// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету – 2004 - №2(25)- С. 48-49.
6. Стратегії ТО і Р і діагностика обладнання [Електронний ресурс] // Новини електротехніки: інформаційно довідкове видання 2008 - №2 (50) Режим доступу до журналу: <http://www.news.elten.ru/arr/2008/50/20.php>
7. Норми випробувань електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302.2007

Видання офіційне К. : ГРІФРЕ, 2007. – 262 с. Стандартиформ, 2007.

9. Гобрей Р. М. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагодження і експлуатації. Довідков-методичний посібник (частина 1) / Р. М. Горбей, О. Є. Рубаненко, В. Л. Таловерья – Київ: А.юЕл. Енерго, 2008, - 524 с.

10. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагодження і в експлуатації: довідниково-методичний посібник – 4.2. Загальні методи та засоби діагностування, випробувань та вимірювань електрообладнання, виведеного з роботи / Р. М. Горбей, Г. В. Шинкаренко, О. М. Болдирев, Г. М. Коліушко, Д. Г. Коліушко – К.:ДПНГУКЦ, 2011 – 1008с.

11. Пампуро В. И. Структурная информационная теория надежности систем. Киев. Наук. Думка, 1992 – 328с.

12. Бешелев С. Д. Матиматико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гуревич – [2е изд, перераб . и доп.] М.:Статистика, 1980 – 236с.

13. Дубовой В. М. Моделювання систем керування в умовах невизначеності [Текст]: монографія / В. М. Дубовой, О. В. Глонь. – Вінниця; УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004 – 169с. - ISBN 966-641-101-6.

14. Моделювання та оптимізація систем [Текст]: підручник / В. М. Дубовой, Р. Н. Кветній, О. І. Міхальов, А. В. Усов – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017 – 804с. –ISBN 978-617-7237-23-4.

15. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребне, М. Э. Сальгадо – М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004- 342с.

16. Дорф Р. Современные системыуправления / Р. Дорф, Р. Бишон – М. Бином. Лаборатория базовых знаний. 2004. – 412с.