

М.В. Хворост¹, І.В. Доманський¹, В.О. Васенко²

¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

²Комунальне підприємство «Міськелектротранссервіс», Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ТЯГОВИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ НА БАЗІ ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Розроблено науково обґрунтовані принципи розвитку технології експлуатації електричних систем з тяговими навантаженнями за станом і мінімальними витратами в процесі їх життєвого циклу для міського електротранспорту. Узагальнено критерії якості струмозняття, що визначають ресурсозбереження. Запропоновано розширити функції трамвайних вагон-лабораторій для вимірювання основоположних критеріїв якості. Розроблено схему експертної системи для аналізу стану пристроїв електропостачання та вироблення керуючих впливів в аналітичних центрах систем управління.

Ключові слова: електротранспорт, тягові підстанції, електротягові мережі, діагностика та експлуатація, технології, енергоефективність, ресурсозбереження.

Постановка проблеми

Ключова роль міського електротранспорту у виконанні перевезень пасажирів потребує удосконалення як електротягових систем, так і технологій їх експлуатації у напрямку енерго- та ресурсозбереження. Унікальність контактної мережі (КМ) висуває підвищені вимоги як до конструкції її пристроїв, так і способів її технічної експлуатації. Тому існує наукова проблема забезпечення високої ймовірності реалізації проектного рішення з заданими показниками якості струмозняття. У роботі розглянуті теоретичні і практичні питання розвитку технологій обслуговування і ремонту тягових підстанцій (ТП), КМ, рейкової колії по стану для забезпечення енергобезпеки процесу перевезень. Узагальнені основоположні критерії стану КМ та якості струмозняття. Наведено вище і визначає актуальність теми дослідження роботи.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення енергоефективності електричних систем міського електротранспорту шляхом удосконалення технологій їх експлуатації на базі ресурсозбереження і економії електроенергії. Для досягнення зазначеної мети необхідно визначити критерії якості струмозняття, що визначають ресурсозбереження та розробити комплексну систему технічного обслуговування і ремонту за станом пристроїв електричних систем з тяговими навантаженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з найбільш перспективних методів зниження експлуатаційних витрат є перехід до науково обґрунтованих термінів ремонту і планування робіт на основі фактичного стану ТП та КМ. Це можливо за наявності комплексної системи моніторингу і діагностики параметрів електротягових мереж міського електротранспорту і критеріїв їх оцінки [1–19].

Досвід показує, що найбільш ефективна діагностика стану пристроїв поєднує оцінку стану пристроїв на математичних, імітаційних моделях та вимірювань параметрів з використанням постійно діючої діагностики електротехнічного обладнання тягових підстанцій, електротягових і кабельних мереж та рейкових колій електротранспорту та систем реєстрації небезпечних режимів дугового струмозняття і методологічних основ їх використання [4–6, 8–18].

Сучасні системи автоматики, телемеханіки та цифрового релейного захисту пристроїв електропостачання ТП дозволяють проводити постійну діагностику електротехнічного обладнання. Суттєвим недоліком є те, що лінії зв'язку не забезпечують передачу діагностичної інформації в аналітичні центри в режимі реального часу. Необхідність розширення трамвайних і троллейбусних ліній та модернізації пристроїв електропостачання (ПЕ) в умовах ресурсозбереження потребує нових технологій проектування, будівництва і експлуатації об'єктів інфраструктури КП «Міськелектротранссервіс». Такі технології уже реалізовані підприємством

«ДАК-Енергетика» при виготовленні сучасного електротехнічного обладнання ТП КП «Міськелектротранссервіс» [5, 13, 16–19]. Вперше на КП «Міськелектротранссервіс» введена в експлуатацію тягова підстанція нового покоління з сухими трансформаторами, 12-пульсовими схемами випрямлення, цифровими захистами і діагностикою обладнання, що забезпечує експлуатацію за станом.

КМ трамваїв та тролейбусів – це унікальний об'єкт, який хоча і складається з типових вузлів і деталей, що серійно випускаються промисловістю, але вимагає прив'язки їх в процесі проектування до місцевих умов: особливості траси, плану й профілю

колії, земляного полотна, типу рухомого складу, швидкості руху, кліматичних впливів [2–6]. Саме тому необхідно розвивати технічну діагностику КМ не тільки в напрямку створення автоматизованих систем для випробувальних вагон-лабораторій КМ трамваю (ВВКМ-Т), які розпізнають скриті дефекти КМ, але і в новому напрямі побудови стаціонарних територіально розподілених систем діагностики КМ та струмоприймачів при несприятливих зовнішніх діях, що породжують режими дугового струмозняття (рис. 1). Така задача ставиться вперше в нашій країні [5, 10].

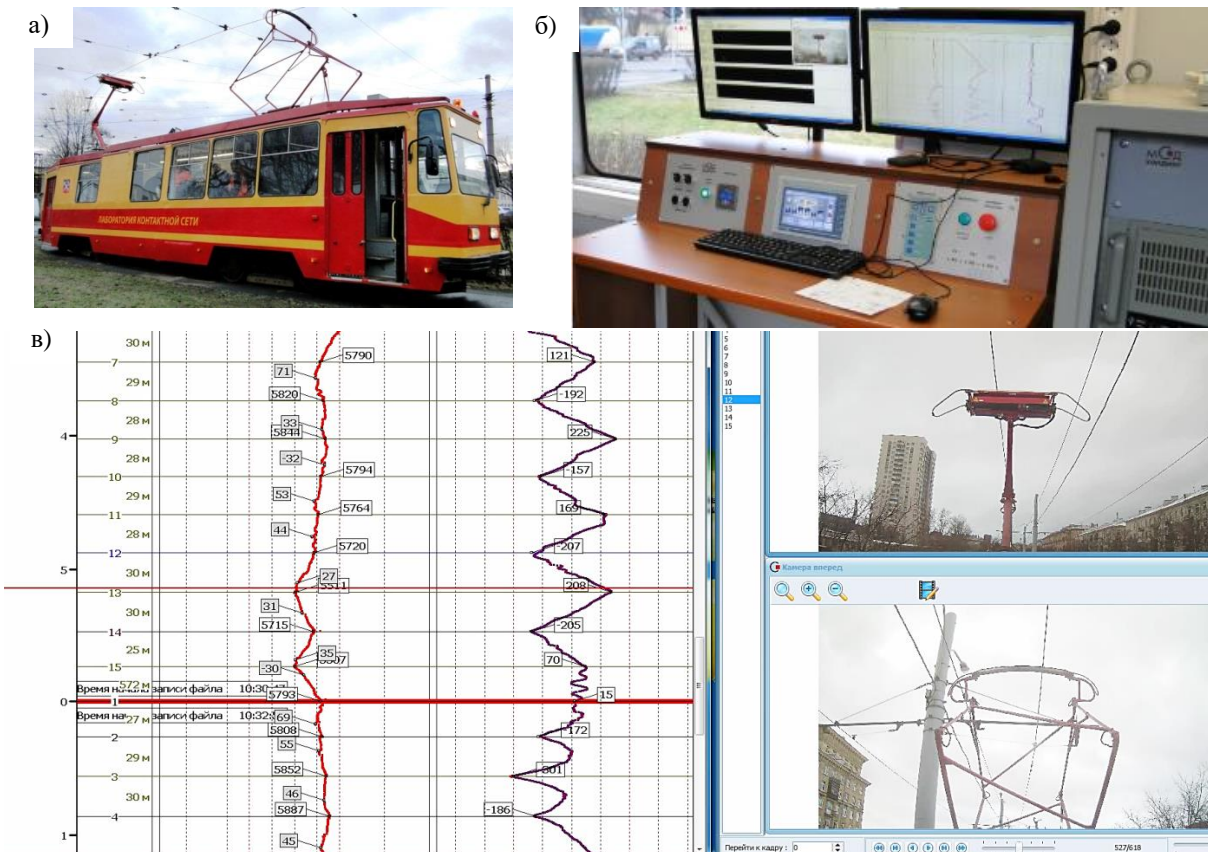


Рис. 1. ВВКМ-Т: зовнішній вигляд (а); робоче місце у вагоні (б); робота системи відеоспостереження і обробки інформації синхронно з визначенням геолокації вагону (в)

Наприклад (рис. 1,в), спеціалізована відеосистема проводить запис відеозображення, програма перегляду якої показана на екрані. Програми працюють синхронно, що дозволяє в місцях, де оператору необхідно зробити уточнення (наприклад, великий зигзаг) зупинити стрічку, зайти в відеопрограму в цьому місці і зробити фотографію з необхідним коментарем для аналізу і видачі на ділянку ремонту та зручності обслуговування.

До складу сучасних ВВКМ-Т входять: оптико-механічний блок; лазерна швидкодiюча система діагностики контактної мережі; система відеоспостереження і обробки інформації; система додаткового електроживлення; пульт управління комплексу і функціональний пульт; датчики кута

повороту, напруги, бокових переміщень, температури довкілля, швидкості руху вагону.

ВВКМ-Т дозволяє контролювати: поточні положення висоти контактної мережі; поточні положення зміщення контактної мережі; дефекти підвішування контактної мережі; знос контактної мережі; пройдений шлях; швидкість руху; температуру навколишнього повітря; напругу в контактній мережі; координати ГЛОНАСС / GPS; стан контактної мережі за допомогою відеофіксації.

Трамвай-лабораторія для комплексної оцінки стану інфраструктури на додаток до параметрів ВВКМ-Т дозволяє проводити вимірювання: просадки колії і рихтування, поздовжнього ухилу колії, прискорення на візку і кузові, ширини колії,

знос рейок, габариту опор КМ та відео контроль: рейкового полотна, з'єднання збірних стиків, приєднання живильних кабелів, міжрейкових з'єднань.

Використання ВВКМ-Т дозволяє отримати об'єктивні дані про стан КМ, проводити автоматизовану оцінку стану КМ по одному або декільком проїздів, прив'язку результатів вимірювань до місця на карті та відеоспостереження за інфраструктурою КМ. Все перераховане дозволяє створити бази даних про стан КМ, колії, кабельних ліній і ін. та умови переходу їх обслуговування за станом.

Таким чином, в роботі виникає наукова проблема дослідження та розвитку діючої інформаційної системи діагностики стану КМ. Рішення проблеми дозволить підвищити якість оцінки стану КМ і знизити можливість відмов та забезпечити енерго- і ресурсозбереження в процесі перевезень пасажирів.

Виклад основного матеріалу

Критерії якості струмозняття, що визначають ресурсозбереження

Відомо, що термін служби КП залежить від наступних факторів: матеріалу контактних елементів струмоприймачів, його фрикційних характеристик по відношенню до проводу, струму, що протікає через ковзний контакт, числа проходів струмоприймачів, швидкості руху, значень і характеру зміни натиснення в контакт і ін. [2–8]. Більшість із зазначених факторів визначає головним чином середній знос КП. Лише характер зміни натиснення в контакт істотно впливає на нерівномірність зносу проводу: при великій різниці контактного натиснення на провід з'являються окремі точки і зони з підвищеним зносом [3]. Оскільки від характеру зміни контактного натиснення залежить знос контактних елементів полоза і КП і, отже, термін їх служби, розрахунок натиснення (або експериментальний вимір) для різних точок (в просторі і часі) є кінцевою метою дослідження процесу взаємодії КМ і струмоприймачів. Механічна взаємодія контактної пари є тим процесом, від умов протікання якого багато в чому залежать надійність і економічність міського електротранспорту [3, 8].

В сталому режимі незадовільне струмозняття може привести до катастрофічного зносу контактуючих елементів і до пошкоджень з затримкою трамваїв і тролейбусів [3, 8, 16, 17]. Таким чином, в сталому режимі вирішальним фактором стає економічне і надійне струмозняття, а шлях його забезпечення це безперервна діагностика

і поліпшення характеристик контактних підвісок і струмоприймачів.

У перехідних режимах незадовільне струмозняття веде не тільки до перепалу проводів, а й до поломок елементів струмоприймачів і контактних підвісок. Шлях забезпечення надійного струмозняття в перехідних режимах це вдосконалення елементів струмоприймачів.

До основних критеріїв процесу струмозняття відносяться: величини зносу контактної пари, відриви струмоприймачів від проводів, розмах коливань полоза і контактного натиснення, коефіцієнти ненадійності роботи контакту і економічності струмозняття, а також мінімум річних експлуатаційних витрат.

Величина зносу контактних динамічних пар в експлуатації є найбільш об'єктивним критерієм оцінки їх роботи. Знос може використовуватися як порівняльний показник для матеріалів контактної пари і величини струму. Найважливішими для експлуатації є статистичні дані по середньому питомому зносу проводів і витраті пластин, співвіднесені до пробігу трамваїв і тролейбусів.

Відриви струмоприймачів від проводів є критерієм, який можна використовувати під час інспекційних і експериментальних поїздок. Вони дають миттєву оцінку надійності струмозняття, хоча і не враховують можливість підйому проводів під тиском струмоприймача. Коефіцієнт відривів K_e , визначається як процентне відношення суми часу відривів до періоду спостереження T

$$K_e = \sum t_e / T \cdot 100 \% \quad (1)$$

Розмах коливань полоза щодо рівня головки рейки (або відтиснення проводів струмоприймачем) визначають динамічною складовою контактного натиснення струмоприймача і розраховують за формулою

$$\Delta H_{\text{л}} = H_{\text{л max}} - H_{\text{л min}} \quad (2)$$

Контактне натиснення характеризується розмахом його коливань в прольоті

$$2\Delta P_{\text{кт}} = P_{\text{кт max}} - P_{\text{кт min}} \quad (3)$$

Малий розмах коливань означає, що динамічна складова контактного натиснення немає суттєвого впливу на натиснення.

Коефіцієнт ненадійності роботи контакту K_n характеризує його схильність до виникнення пошкоджень (підйом проводів під тиском струмоприймача або перепалів). Він базується на визначенні допустимих мінімальних і максимальних

натиснень, випадки виходу за які умовно вважаються відмовами. Величина виходу за недопустиме значення натиснення (серйозність відмови) задається шкалою небезпеки з коефіцієнтами $\Psi_{\max i}$ і $\Psi_{\min i}$. Тоді

$$K_H = \frac{\sum_{i=1}^v n_i' \Psi_{\max i} + \sum_{i=1}^v n_i'' \Psi_{\min i}}{n}, \quad (4)$$

де n – кількість інтервалів натиснення в контакт; n_i – кількість випадків даного натиснення на i -му інтервалі; v – кількість даних розрядів контактного натиснення.

Економічність струмозняття – забезпечення мінімальної величини і зносу проводів і пластин струмоприймачів. Для її оцінки необхідно знати U -образну залежність зносу ковзаючої контактної пари від контактного натиснення і струму.

Спрощений коефіцієнт економічності можна знайти, якщо використовувати одну точку U -образної кривої – оптимальне натиснення, при якому буде мінімальний знос. За таку точку можна взяти статичне натиснення для даного типу струмоприймача. Коефіцієнт можна знайти, аналізуючи відхилення значень максимального і мінімального натиснень в прольоті від оптимального

$$k_{zy} = (|P_{\text{кт max}}| + |P_{\text{кт min}}| - 2P_{\text{опт}}) / 2. \quad (5)$$

Це середнє в прольоті відхилення пропорційно перевищенню зносу над оптимальним, якщо прийняти, що U -образна крива має дві прямі, що розташовані під кутом 45° до осей ординат. Втрата міді в прольоті буде пропорційна сумі оптимального зносу з його перевищенням.

Ваговий коефіцієнт економічності K_e , що характеризує втрату контактуючих матеріалів, приведену до 1 км підвіски і пробігу 1 000 струмоприймачів, км

$$K_e = \frac{1000}{n} \sum_{i=1}^v j_i n_i, \quad (6)$$

де j_i ($P_{\text{кт}}$, I_s) – інтенсивність зносу (у функції натиснення і струму) на i -му інтервалі.

В якості узагальненого критерію для оптимізації характеристик і параметрів контактних підвісок і струмоприймачів можна застосовувати принцип мінімуму річних приведених витрат

$$\mathcal{E} = \frac{K_c}{T_c} + C_{\text{сн}} + C_{\text{сп}} + \frac{K_{\text{т}}}{T_{\text{т}}} + C_{\text{тн}} + C_{\text{тп}}, \quad (7)$$

де $C_{\text{сн}}$, $C_{\text{тн}}$ – експлуатаційні витрати, пов'язані із зносом контактних проводів і пластин струмоприймачів відповідно; $C_{\text{тп}}$, $C_{\text{сп}}$ – експлуатаційні витрати, які визначаються збитком від пошкоджень струмоприймачів і КМ відповідно; $K_{\text{т}}$, $K_{\text{с}}$ – капітальні витрати на струмоприймачі та контактну мережу з урахуванням пристроїв діагностики та ремонтного обладнання відповідно; $T_{\text{т}}$, $T_{\text{с}}$ – нормативні терміни окупності відповідно.

Мінімізацію цих витрат можна проводити за критеріями економічності і ненадійності, які виражені коефіцієнтами K_e і K_H . Визначення останніх пов'язано з необхідністю мати криві контактного натиснення, які є універсальними і об'єктивними оцінками процесу струмозняття. У зв'язку з цим важливим є пізнання процесу взаємодії струмоприймачів з контактними підвісками шляхом аналізу його технічних показників. При проведенні експериментальних досліджень з використанням вагона ВВКМ-Т одним з таких показників може бути коефіцієнт відносної зміни контактного натиснення [3], який визначається як максимальне значення з двох

$$n' = \frac{P_{\max} - (P_o + P_y)}{(P_o + P_y)} ; \quad n'' = \frac{(P_o + P_y) - P_{\min}}{(P_o + P_y)}, \quad (8)$$

де P_{\max} , P_{\min} – власне максимальне і мінімальне значення контактного натиснення; P_o – натиснення підйомних пружин струмоприймача, приведені до верхніх шарнірів рухомих рам; P_y – вертикальні складові сил аеродинамічного впливу на полоз, рухливі рами і струмоприймач в цілому.

Вимірювальна система ВВКМ-Т фіксує постійну складову контактного натиснення для заданої швидкості руху $P = P_o + P_y$. У базі даних вагона ВВКМ-Т графіки залежності $P = f(l)$ можуть бути записані для всіх трамвайних ділянок м. Харків при різних кліматичних умовах і швидкості руху трамваю.

Як показник, що характеризує стабільність зношування КП в прольоті, анкерній ділянці і т.д. можна прийняти середньоквадратичне відхилення натиснення від його оптимального значення $M(P)$

$$\sigma[P] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [P_i - M(P)]^2}, \quad (9)$$

де n – число точок в графіках анкерної ділянки, прольоту і т.д.

Найточнішим показником якості струмозняття при статичній обробці кривих контактного натиснення є дотримання умови $M[P] - 3\sigma[P] \geq P_{\text{міндоп}}$, де $P_{\text{міндоп}}$ – мінімальне

допустиме значення контактного натиснення. Як показує досвід для оцінки якості динаміки струмозняття досить користуватися абсолютним значенням максимальної змінної складової контактної натиснення $|P_v|_{\max}$. Тоді коефіцієнт відносної зміни натиснення можна представити виразом $n = |P_v|_{\max} / M[P]$. Характеризуючи експлуатаційний стан КМ по параметру контактної натиснення має сенс розглядати всі показники n , $\sigma[P]$, $|P_v|_{\max}$. Розроблена методика оцінки якості струмозняття і експлуатаційного стану КМ на основі статистичної обробки баз даних кривих контактної натиснення і показано, що за рахунок раціонального натягу КП, можна забезпечити необхідну якість струмозняття і понизити знос контактуючих елементів.

Ефективність стабілізації натиснення близько рівня, що забезпечує мінімальний знос контактних елементів струмоприймачів і КМ, можна оцінити за результатами тривалої експлуатації вагона ВВКМ-Т.

Визначення K_e для прольоту компенсованої підвіски (рис. 2) можливо, якщо є залежність $j_i(P_{кт}, I_{\mathcal{E}})$ для даної ковзаючої контактної пари і реальні криві контактної натиснення в даному прольоті $P_{кт}(x)$. Знос в прольоті виходить як сума площ зносу для всіх інтервалів. Поділивши цю суму на довжину прольоту, визначають середній знос, поділивши його на струмоприймач-пробіги – коефіцієнт економічності і питомий знос.

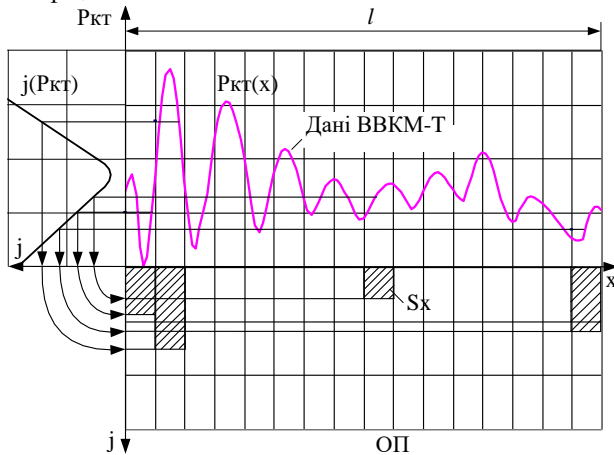


Рис. 2. Схема визначення K_e

Технологія обслуговування за станом електричних систем з тяговими навантаженнями міського електротранспорту

Технологія технічного обслуговування за станом є алгоритм призначення заходів з підтримки заданого технічного стану обладнання ТП та КМ в

процесі їх експлуатації. Процес технічного обслуговування і час проведення керуючих дій можна оптимізувати. Критеріями оптимізації можуть бути показники готовності пристроїв або мінімізація витрат часу і матеріальних засобів на обслуговування КМ, а саме: середні і питомі тривалості, трудомісткість, вартість, коефіцієнти готовності і технічного використання.

Аналіз пошкоджень пристроїв електропостачання показує, що переважна кількість пошкоджень припадає на КМ і особливо на дільницях з терміном експлуатації понад 40 років. Значно менше пошкоджень відбувається на ТП. Розподіл пошкоджень за видами пристроїв наступні: КМ – 49,7%; ТП – 5,4%; кабельні лінії та рейкові колії – 44,6%; самохідний рухомий склад – 0,3%. Рівень експлуатаційної надійності електротехнічного обладнання ТП і особливо нового покоління на базі комплектно-модульного принципу достатньо високий. Так математичне очікування проценту відмов ТП за останні десять років не перевищує 5%.

КМ є відновлювана складна система зі змішаним з'єднанням елементів, оскільки вона продовжує функціонувати після усунення ремонтом наслідків несправності, обслуговується наявними персоналом і в залежності від елемента, що відмовив може перебувати в двох або більше робочих станах. Іншими словами, можливі відмови, при яких КМ в цілому продовжує виконувати свої функції, але зі зниженою ефективністю. КМ окремої ділянки представляє систему з наступними елементами: анкерні ділянки; ізольовані і неізольовані сполучення; нейтральні вставки; повітряні стрілки; секційні ізолятори; живильні та обхідні лінії. Така диференціація елементів КМ має дуже відносний характер, оскільки кожен з них може бути прийнятий за самостійну підсистему, складену з нових елементів. Співвідношення математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень пошкоджень КМ і струмоприймачів та затримок трамваїв та тролейбусів в процентах від загальної кількості затримок за останні 10 років такі: 194,5 і 15,5 та 64,3% і 3,4%. Найбільшу пошкоджуваність мають елементи контактної підвіски 60%.

Аналіз динаміки змін фізичного та морального старіння ПЕ показує, що швидкими темпами збільшується кількість обладнання, яке відпрацювало свій технічний ресурс [5, 16–18]. Як наслідок збільшується кількість відмов пристроїв ТП і КМ. Зняття гостроти, а в перспективі – повне вирішення зазначеної проблеми базується на вирішенні питання значного збільшення обсягу щорічного поновлення ПЕ, в першу чергу ділянок з високим потоком пасажирського руху. Відповідно

стратегії розвитку та підвищення енергоефективності міських електротягових мереж на період 2020–2035 рр. розроблена концепція будівництва та оновлення тягових підстанцій. Стосовно до ТП слід зазначити: сухі трансформатори; комплектні розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією; регульовані пристрої компенсації реактивної потужності; випрямні і випрямно-інверторні агрегати нового покоління.

Говорячи про пристрої, які пов'язані з КМ, доцільно виділити: низьколеговані мідні КП; нові модифікації КМ на основі проєктів КМ-60 і в перспективі КМ-80 для різних умов експлуатації; демонтажно-розгортальні комплекси; засоби і технології для демонтажу та утилізації опор. Не менш важливе значення мають і технологічні інновації і в першу чергу комплекс технологій під загальним найменуванням технічне діагностування. Так для КП «Міське електротранссервіс» розроблена концепція технічного обслуговування пристроїв електропостачання міських електротягових мереж за станом на базі їх діагностики і моніторингу.

На сьогодні в розвитку технічного діагностування виділяються основні напрямки: вимірювальні комплекси ВВКМ-Т; системи реєстрації небезпечних режимів дугового струмозняття; діагностування ізоляторів сканером ультрафіолетового діапазону; системи постійного технічного діагностування електротехнічного обладнання тягових і трансформаторних підстанцій, силових трансформаторів, перетворювачів, вимикачів та ін. Для всіх систем діагностування можна виділити задачі: автоматизація процесів збору, передачі та аналізу результатів; підвищення контролю за технічним станом ПЕ, своєчасністю і якістю проведення їх ремонту та поліпшення технічного обслуговування ПЕ.

Інформаційні технології становлять невід'ємну основу всіх процесів технічного діагностування, які вже згадувалися вище. Поряд з технічним діагностуванням в число інновацій технологічного характеру доцільно включити технології спорудження об'єктів, перш за все ТП, на базі мобільних будівель, які в наш час завдяки багатьом факторам стали практично безальтернативними.

Технічне переобладнання і модернізація вимагають значних інвестицій, а стратегію технічного обслуговування і ремонту необхідно вдосконалювати шляхом впровадження нових прогресивних форм її організації і управління. Однією з них є система технічного обслуговування і ремонту за прогнозним технічним станом обладнання. Обслуговування та ремонт за станом підвищує ресурс і надійність і скорочує експлуатаційні витрати [15, 16].

Для впровадження нових принципів експлуатації, необхідно переходити до нових форм технічного обслуговування [5, 18]. На першому етапі необхідно вирішити завдання стратегічного рівня, пов'язані з оцінкою стану і прогнозуванням залишкового ресурсу обладнання, яке експлуатується чимало часу. Стратегія технічного обслуговування і ремонту за прогнозним станом електрообладнання на основі діагностики є найбільш раціональною і економічно обгрунтованою і призводить до ресурсозбереження. Досвід експлуатації ПЕ показує, що 80% дефектів, які обумовлюють вихід з ладу приладів та обладнання КМ, тягових і трансформаторних підстанцій та ліній електропередачі, може бути своєчасно виявлено сучасними методами і апаратурою для діагностування і моніторингу. На рис. 3 дано порівняння необхідної і фактичної схем контролю надійності, в яких передбачені спільні заходи щодо забезпечення надійності ПЕ, реалізовані виробником, персоналом дистанцій електропостачання і сервісною службою технічного обслуговування.

Знання фактичної ситуації базується на зворотному зв'язку, що надає інформацію про технічну розробку, монтаж та введення в експлуатацію ПЕ ділянки службі управління надійністю підприємства-виробника. У той же час для підвищення надійності нових ПЕ виробнику необхідні відомості про ПЕ, які вже перебувають в експлуатації (опори, елементи підвісок, роз'єднувачі, вимикачі та ін.). Після закінчення гарантійного терміну виробник вже не отримує такої інформації, однак вона повинна фіксуватися відділом управління надійністю сервісного підприємства, яке бере участь в технічному обслуговуванні ПЕ. Таким чином необхідна схема передбачає спільне управління надійністю виробником, експлуатаційним персоналом і сервісною службою технічного обслуговування.

Реалізація концепції управління ЖЦ обладнання КМ і ТП вимагає створення єдиного інформаційного середовища (ЄІС). Основна функція ЄІС полягає в інформаційній інтеграції та спільному використанні інформації всіма суб'єктами ЖЦ. На основі ЄІС реалізуються технології управління даними про обладнання ПЕ (включаючи проєкти, креслення, технологічні карти, моделі, розрахунки, дані з випробувань і т. д.) і базові управлінські технології: управління проєктами, процесами експлуатації та ресурсами. Об'єктами управління є всі процеси ЖЦ: НДДКР; розробка проєктно-кошторисної документації; виробництво і постачання вузлів і виробів ПЕ; будівництво та монтаж ПЕ; експлуатація об'єктів ПЕ. ЄІС дозволяє позбутися від типових проблем, пов'язаних з

історично сформованим документообігом; прискорити пошук актуальної документації; диференціювати права доступу до інформації;

зв'язати виробництво ПЕ з історією їх створення і, відповідно, мати можливість відстежувати процеси на всіх стадіях ЖЦ.

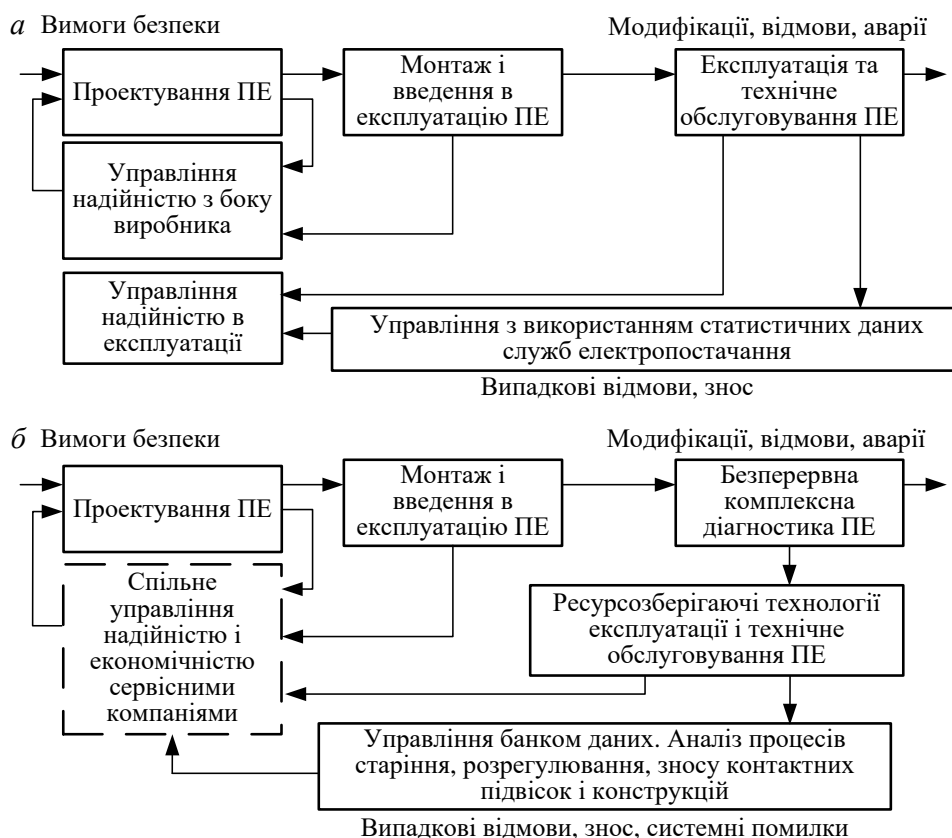


Рис. 3. Схеми процесу управління надійністю і економічністю ПЕ:
а – фактичне; б – необхідне

В якості оболонки, що об'єднує всю множину використовуваних прикладних комп'ютерних систем виступає PDM-система (product data management – управління інженерними даними), яка включає в себе: CAD (computer-aided design – автоматизована підтримка проектування), CAM (computer-aided manufacturing – автоматизоване підтримка виробництва), CAPP (computer-aided process planning – автоматизована система технологічної підготовки виробництва і монтажу), CAE (computer-aided engineering – підтримка інженерних розрахунків), SCAT (special computer-aided tools – спеціалізовані програмні засоби).

Основні функції, які здійснюються PDM-системою:

- зберігання даних і управління даними про обладнання ПЕ. При цьому дані доступні всім учасникам ЖЦ відповідно до прав доступу. Система дозволяє здійснювати пошук виробів і документів відповідно до різних характеристик з метою їх повторного використання;

- управління процесами. Всі бізнес-процеси описані на програмному рівні в системі. Це забезпечує фактичне, а не номінальне впровадження

принципів управління (формалізація процесів, документування записів, зміна і поліпшення та ін.);

- інтеграція даних про обладнання ПЕ і технологічних процесах його експлуатації.

На початковому етапі впровадження PDM-системи необхідна систематизація та впорядкування великого обсягу конструкторської документації вузлів і деталей, що входять до складу різних типів КМ, пристроїв тягових і трансформаторних підстанцій та ліній електропередач. На другому етапі необхідно описати бізнес-процеси експлуатації ПЕ.

На третьому етапі відповідно до розробленої структури даних і знову затвердженими бізнес-процесами необхідна установка і конфігурація системи. Така архітектурна організація дозволяє використовувати в технологічному модулі частину необхідної технологічної функціональності PDM, а також організувати єдиний інформаційно-довідковий простір для технологів і конструкторів. При цьому розроблені в TechCard технологічні процеси можуть бути використані як на стадії виробництва, так і в процесі монтажу і експлуатації.

Варто відзначити, що впровадження ЄС – тривалий і складний процес, що вимагає

консолідованих зусиль від усіх учасників процесів ЖЦ. Найбільш суттєві проблеми при впровадженні пов'язані з недоліком технічних засобів автоматизованого збору інформації, складнощами психологічного характеру при переході співробітників до нових принципів взаємовідносин і діловодства, а також низьким рівнем державної нормативної бази на електронне діловодство. Разом з тим ЄІС повинна виступати основою необхідної часом реалізації об'єктів інфраструктури «під ключ» з обов'язковим включенням в загальний інформаційний простір будівельно-монтажних і експлуатуючих організацій.

Для забезпечення комплексної оптимізації процесів розробки з урахуванням витрат ЖЦ ПЕ необхідно новий розподіл ролей між виробниками і експлуатуючими сервісними компаніями. При цьому головною метою є довірна спільна робота при проектуванні, виробництві, здачі в експлуатацію, технічному обслуговуванні ПЕ під час гарантійного терміну і в наступний період. Ця співпраця повинна реалізуватися у формі інтегрованого аналізу даних, вільного доступу до інформації про характеристики і параметри взаємодії ПЕ, оптимізації технічного обслуговування та ремонту за станом. Після кількісної оцінки оптимізованих в експлуатації витрат ЖЦ ПЕ їх можна зіставити з розміром отриманої економії. Вибір і реалізацію

ресурсозберігаючих технологій експлуатації електротягових мереж з мінімізацією витрат ЖЦ ПЕ можна реалізувати, використовуючи ЕС. Наприклад, при експлуатації КМ, кожен успішний випадок мінімізації витрат на відновлення певних її компонентів оператором оформляється у вигляді прикладу і вводиться в базу ретроспективних знань. Узагальнена схема ЕС для реалізації ресурсозберігаючих технологій експлуатації та ремонту ПЕ показана на рис. 4. Запропоновані алгоритми створення баз даних ЕС можна реалізувати після модернізації систем управління ПЕ на базі сучасних інтегрованих систем. Такі ЕС будуть необхідним інструментом аналітичних центрів.

На першому рівні виконується діагностика обладнання з ознаками наявності дефектів із застосуванням як традиційних методів (високовольтні випробування, вимірювання опору ізоляції та тангенса кута діелектричних втрат, випробування масла, корозійні обстеження пристроїв тощо), так і сучасних методів і приладів діагностики (вологоміст в маслі, тангенс кута діелектричних втрат масла тощо). У міру насичення служб електропостачання, колії та руху КП „Міськелектротранссервіс” сучасними засобами діагностики завдання первинної діагностики будуть розширюватися.

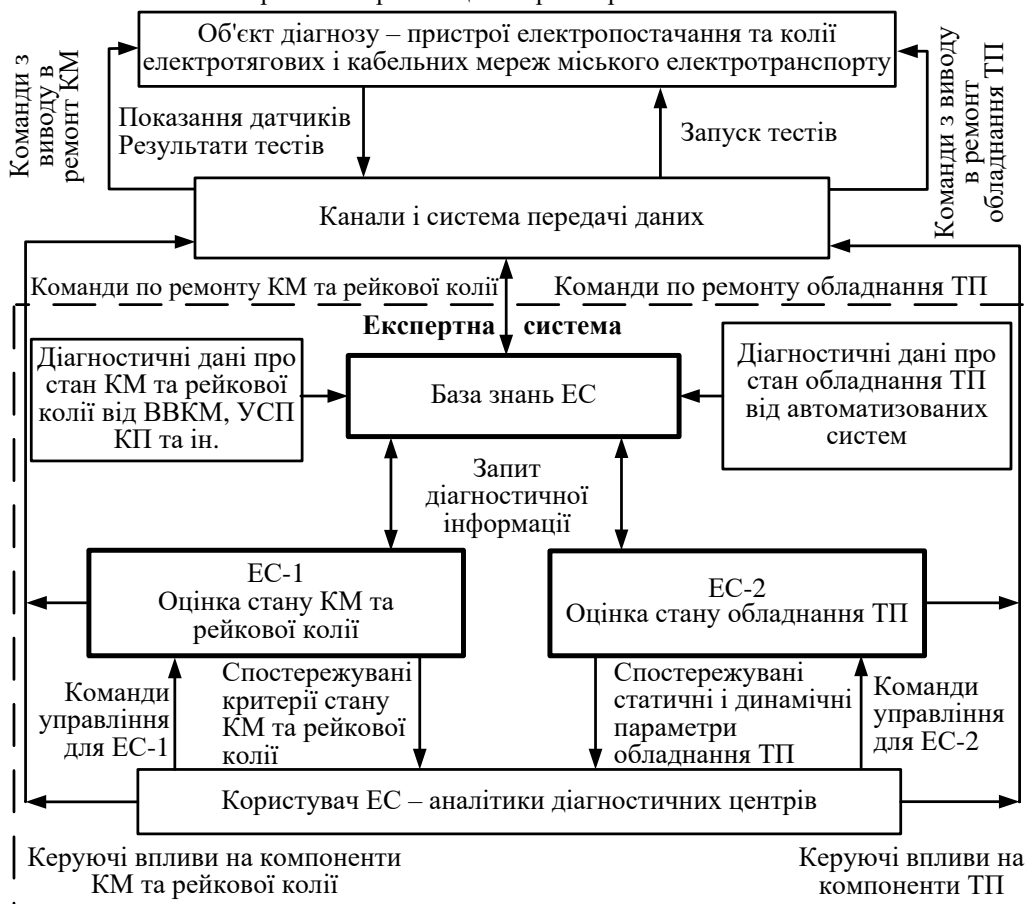


Рис. 4. Узагальнена схема експертної системи центру діагностики

Для координації діяльності, вирішення методологічних, методичних і метрологічних питань і організації роботи на міському електротранспорті в області діагностики і моніторингу стану КМ, електротехнічного обладнання підстанцій і кабельних мереж запропонована структура

аналітичного центру діагностики в КП «Міськелектротранссервіс» (рис. 5).

Проведення комплексної та складної діагностики ПЕ покладається на діагностичні центри, структура яких показана на рис. 6, а дистанції електропостачання забезпечують діагностику першого рівня.

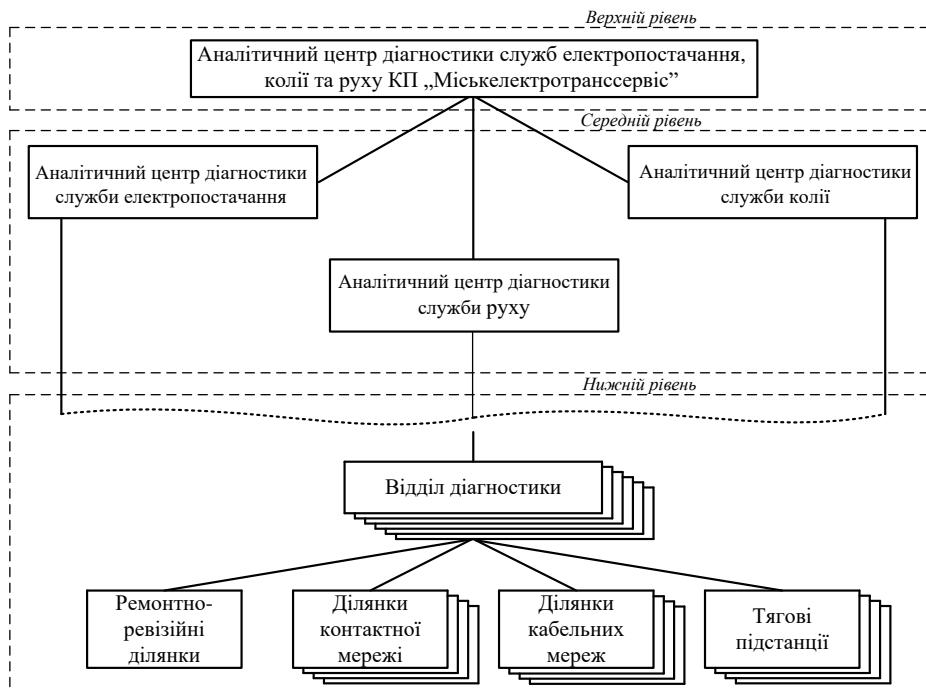


Рис. 5. Ієрархічні рівні системи діагностики пристроїв електричного транспорту

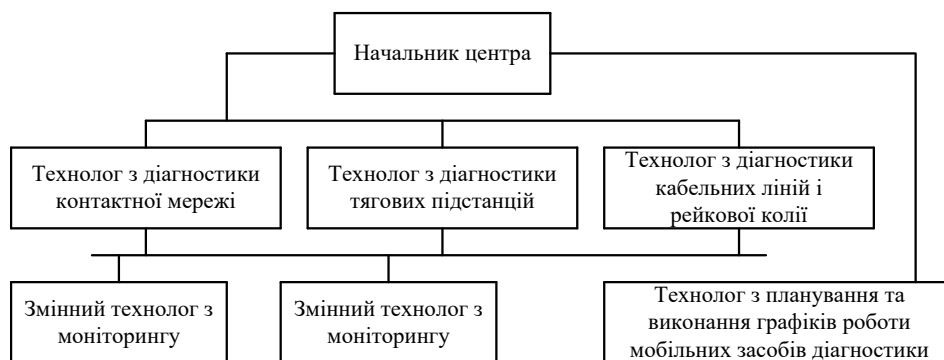


Рис. 6. Структура аналітичного центру діагностики

На другому рівні дорожній діагностичний центр проводить узагальнення і аналіз результатів діагностики, виконаної на першому рівні, комплексну і складну діагностику ПЕ з застосуванням сучасних методів і приладів діагностики, в першу чергу того обладнання, яке було виявлено при первинній діагностиці. Спеціально виділена група співробітників проводить безпосередній аналіз роботи ПЕ, використовуючи при цьому різні програми та інформацію, зібрану вручну. За результатами аналізу визначаються коригувальні заходи впливу щодо усунення передвідмовних ситуацій, дані передаються в аналітичний центр діагностики (рис. 7). За результатами комплексного

діагностичного обстеження робиться експертний висновок про обладнання: необхідність і обсяг ремонту або заміни, терміни проведення наступних випробувань, продовження терміну служби і так далі.

Основні складові діагностики ПЕ, що характеризують розвиток системи виявлення передвідмов, включають в себе виконання міжремонтних випробувань силового обладнання ТП відповідно [13, 18], обходи з оглядом ПЛ і ділянок КМ, огляди устаткування тягових і трансформаторних підстанцій, верхову діагностику КМ з використанням комплексних пересувних систем діагностики: ВВКМ-Т та інших спеціальних пристроїв діагностування ПЕ.

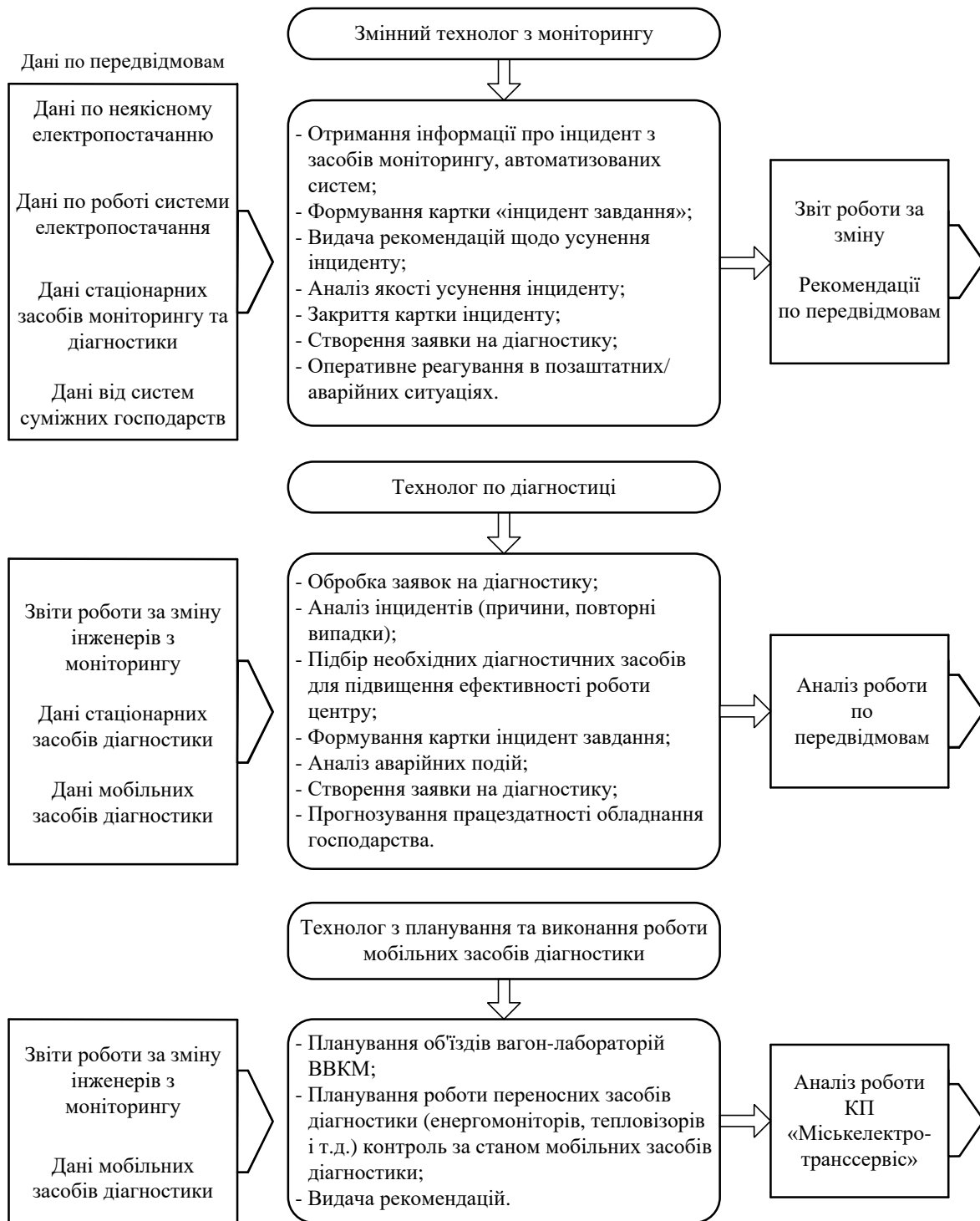


Рис. 7. Організація роботи інженерів з моніторингу в аналітичному центрі діагностики

Висновки

1. Узагальнено критерії якості струмозняття, що визначають ресурсозбереження. Встановлено і експериментально підтверджено, що основоположними критеріями стану КМ є контактне натиснення і коефіцієнти надійності і економічності струмозняття. Запропоновано розширити функції ВВКМ-Т в області вимірювання основоположних критеріїв для обслуговування КМ по стану.

2. Запропоновано інформаційні технології оцінки стану пристроїв електропостачання в процесі їх експлуатації на базі синтезу двох джерел інформації: діагностики в режимі реального часу і імітаційного моделювання. Розроблено узагальнену схему експертної системи для аналізу стану пристроїв електропостачання та вироблення керуючих впливів в аналітичних центрах систем управління.

3. Розроблено науково обґрунтовані принципи розвитку технології експлуатації електричних

систем з тяговими навантаженнями за станом і мінімальними витратами в процесі їх життєвого циклу, зокрема концепцію технічного обслуговування ПЕ за станом на базі їх діагностики і моніторингу, засоби підвищення якості струмозняття та зменшення зносу контактної провладу, що в сукупності вирішує проблему ресурсозбереження та дозволяє понизити експлуатаційні витрати в 1,5 раз.

Література

1. Далека, В.Х. Правила експлуатації міського електричного транспорту [Текст] : навч. посібник / В.Х. Далека, В.Б. Будниченко, В.І. Коваленко, М.В. Хворост, Л.О. Ісаєв. – Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. Бекетова, 2014. – 447 с.
2. Михеев, В.П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / Михеев В.П. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с. – (Учебник для вузов ж. д. транспорта).
3. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети [Текст] / Вологин В. А. – М.: Интекст, 2006. – 256 с.
4. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог [Текст] / А. В. Ефимов, А.Г. Галкин. – М.: УМК МПС России, 2000. – 512 с.
5. Доманський, І. В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями [Текст] : монографія / І. В. Доманський // НТУ „ХПІ”. – Харків: вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.
6. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schmieder, E. (2009). Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. *Second Edition, Berlin and Munich. Siemens*. 994.
7. Берент, В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в условиях железнодорожного транспорта [Текст] / Берент В. Я. – М.: Интекст. 2005. – 408 с.
8. Купцов, Ю. Е. Беседы о токоосеме, его надежности, экономичности и о путях совершенствования [Текст] / Купцов Ю. Е. – М.: Модерн-А, 2001. – 256 с.
9. Подольский, В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкция, эксплуатация, диагностика [Текст] / Подольский В. И. – М.: Интекст. 2007. – 152 с.
10. Семёнов, Ю. Г. Основы контроля дуговых нарушений токоосема в электротяговых сетях [Текст] : Монография. / Ю.Г. Семенов; М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 139 с.
11. Галкин, А. Г. Теория и методы расчета процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Галкин Александр Геннадьевич. – Екатеринбург, 2002. – 370 с.
12. Матусевич, О.О. Развитие научных основ усовершенствования системы технического обслуживания и ремонту тяговых подстанций электрического транспорта [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Матусевич Александр Александрович. – Харків, 2016. – 334 с.

13. Доманський, В. Т. Концепція технічного обслуговування пристроїв електропостачання залізниць за станом на базі їх діагностики і моніторингу [Текст] / В. Т. Доманський, К. В. Переверзев // Українська залізниця. – 2019. № 3(69). – С. 9–13.
14. Доманський, В. Т. Моделювання та експериментальні дослідження взаємодії контактної мережі і струмоприймачів [Текст] / В. Т. Доманський, Переверзев К. В. // Комунальне господарство міст. 2019. вип. 1(147). – С. 146–157.
15. Корниенко, В. В. Критерии качества токосъема, определяющие ресурсосбережение [Текст] / В. В. Корниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 18–21.
16. Доманський, І. В. Ресурсозберігаюча система експлуатації контактної мережі по стану [Текст] / І. В. Доманський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2009. – № 5/6 (41). – С. 51–56.
17. Доманський, І. В. Експлуатація контактної мережі по стану і мінімуму витрат [Текст] / І. В. Доманський // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 2/1. – С. 12–15.
18. Доманський, І. В. Переход к обслуговуванню по стану в господарстві електрифікації і електроснабження [Текст] / В. Ф. Максимчук, І. В. Доманський // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 3/4. – С. 33–37.
19. Корниенко, А. В. Сучасне електротехнічне обладнання електрифікованих залізниць (розробка, проектування, виробництво, сервісне обслуговування) [Текст] / А. В. Корниенко, І. В. Доманський // Українська залізниця. – 2017. № 3–4. – С. 18–23.

References

1. Daleka, V.KH., Budnichenko, V.B., Khvorost, M.V., Isaev, L.O. (2014). Rules of operation of urban electric transport: textbook. manual. *O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*, 447.
2. Mikheev, V.P. (2003). Contact networks and power lines. *M.: Route*, 416. - (Textbook for high schools of railway transport).
3. Vologin, V.A. (2006). Interaction of current collectors and contact network. *Moskva. Intekst*, 256.
4. Efimov, A.V., Galkin, A.G. Reliability and Diagnostics of Railway Power Supply Systems (2000). *Moskva. UMK MPS of Russia*, 512.
5. Domanskiy, I. B. (2016). Fundamentals of energy efficiency of electrical systems with traction navantazhennymi: monograph *NTU “KhPI”. Kharkiv: "Center for Information Transport of Ukraine"*, 224.
6. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schmieder, E. (2009). Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. *Second Edition, Berlin and Munich. Siemens*. 994.
7. Berent, V. Ya. (2005). Materials and properties of electrical contacts in the conditions of railway transport. *M. : Intekst*. 408.
8. Kuptsov, Yu. E. (2001). Conversations about current collection, its reliability, efficiency and ways to improve. *M. : Modern-A*, 256.

9. Podolsky, V.I. (2007). Reinforced concrete supports of the contact network. Design, operation, diagnostics. *M. : Intext*, 152.
10. Semenov, Yu. G. (2010). Fundamentals of control of arc faults in current collection in electric traction networks: Monograph. *M. : GOU "Educational-methodical center for education in railway transport"*, 139.
11. Galkin, A. G. (2002). Theory and methods for calculating the processes of design and maintenance of a contact network: dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.22.07. *Yekaterinburg*, 370.
12. Matusevich, O.O. (2016). Development of scientific foundations of a more comprehensive system of technical servicing and repair of traction and electrical transport: dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.22.09. *Kharkiv*, 334.
13. Domanskiy, V.T., Pereverzev, K.V. (2019). Concept device electrical maintenance of railways as on the basis of their diagnosis and monitoring, *Ukrainian Railway*, 3 (69), 9–13.
14. Domanskiy, V.T., Pereverzev, K.V. (2019). Modeling and experimental studies of the interaction of the contact network and current collectors. *Municipal Economy of Cities*, 1 (147), 146–157.
15. Kornienko, V.V., Domanskiy, I.V. (2010). Current collection quality criteria determining resource saving. *Zaliznichny transport of Ukraine*, 5, 18–21.
16. Domanskiy, I.V. (2009). Resource-saving system of operation of the contact network by state. *Scheduled-European Journal of Advanced Technologies*. *Kharkiv*, 5/6 (41), 51–56.
17. Domanskiy, I.V. (2009). Operation of the contact network according to the state and minimum costs. *Zaliznichny transport of Ukraine*, 2/1, 12–15.
18. Domanskiy I.V., Maksymchuk, V.F. (2012). Transition to service as in the electrification and power supply economy. *Zaliznichny transport Ukrainy*, 3/4, 33–37.
19. Kornienko, A.V. & Domanskiy, I.V. (2017). Modern electrotechnical equipment of electrified railways (development, design, production, service). *Ukrainian Railway*, 3–4, 18–23.
- Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Х. Далека, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна
- Автор:** ХВОРОСТ Микола Васильович
доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – i.domanskiy@dakenergo.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2606-8228>
- Автор:** ДОМАНСЬКИЙ Ілля Валерійович
доктор технічних наук, доцент кафедри електричного транспорту
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – i.domanskiy@dakenergo.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8819-410X>
- Автор:** ВАСЕНКО Владислав Олександрович
директор
Комунальне підприємство
«Міськелектротранссервіс»
E-mail – i.domanskiy@dakenergo.com

TECHNOLOGY OF OPERATION OF CITY ELECTRICAL SYSTEMS WITH TRACTION LOADS BASED ON ENERGY AND RESOURCES SAVING

M. Khvorost¹, I. Domanskiy¹, V. Vasenko²

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

²Communal company "MISKELEKTROTRANSSEKSPERVIS", Ukraine

The scientifically substantiated principles of development of technology of operation of electric systems with traction loads by condition and minimum expenses during their life cycle for urban electric transport are developed. Saving quality criteria that determine resource conservation are generalized. It is proposed to expand the functions of tram wagon laboratories to measure the basic quality criteria. The scheme of expert system for analysis of the state of power supply devices and development of control effects in the analytical centers of control systems is developed.

The scientifically grounded principles of the development of the technology of operation of electric systems with traction loads on the state and minimum expenses in the course of their life cycle, in particular the concept of maintenance of power supply devices on the basis of their diagnostics and monitoring, a complex automated system of diagnostics of the contact network and current collectors, means of improving quality scratching and reducing the wear of the contact wire, which collectively solves the problem of resource conservation and allows reducing operating costs 1.5–2 times.

Generalized current quality criteria that determine resource conservation. It is established and experimentally confirmed that the basic criteria for the state of the contact network are contact pressing and the coefficients of reliability and economy of current flow. It is proposed to expand the functions in the field of measuring the basic criteria for servicing the contact network by state. The information technologies of an estimation of a condition of power supply devices during their operation on the basis of synthesis of two sources of information are offered: real-time diagnostics and simulation modeling. A generalized scheme of the expert system for analysis of the status of power supply devices and development of control effects in the analytical centers of control systems has been developed.

Keywords: electric transport, traction substations, traction networks, diagnostics and operation, technologies, energy efficiency, resource saving.