

Е.Л. ПИРОТТИ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

В.Є. КРИВОНОСОВ

Приазовський державний технічний університет

Л.Г. КОВАЛЬ, М.І. ПАЛАМАРЧУК

Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ФАКТОРІВ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ НАДІЙНІСТЬ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ (СЕТО) (ЗА ДАНИМИ ЛІТЕРАТУРНОГО КОНТЕНТУ)

У статті розглянуто основні причини, що впливають на якість електричних мереж, а саме: недостатній рівень надійності електропостачання для СЕТО; збільшення відносних втрат електроенергії в електромережах; невідповідність якості електроенергії вимогам реального сектора економіки; невідповідність сучасним технологічним реаліям системи управління енергопостачанням; погіршення технічного стану розподільчого електромережевого комплексу; відсутність накопичених статистичних даних; технологічний та електромагнітний збитки. Наведено статистичні дані поломок і аварій електротехнічного та медичного обладнання.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, електричні мережі, поломки обладнання, провали напруги.

E. L. PIROTTI

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

V. YE. KRIVONOSOV

Pryazovskiy State Technical University

L. G. KOVAL, M. I. PALAMARCHUK

Vinnitsia National Technical University

ANALYSIS OF SOURCES OF NEGATIVE INFLUENCING FACTORS ON PERFORMANCE OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENT (SETO) (LITERATURE CONTENT DATA)

Modern electrical engineering systems and complexes are complex technical devices that contain electrical elements, mechanical units, electronic and microprocessor blocks, which operate on low voltage and high voltage voltages, with a power from CW and above. ESCs are installed, as a rule, in enclosed spaces, receive power supply on separate lines and have independent units of relay protection of uninterruptible power supply units. This results in operational failures and malfunctions caused by unpredictable changes in the network power supply parameters. Exit PAYE beyond the norm leads to the complication of troubleshooting and troubleshooting, as well as increasing financial and time costs. The lack of an integrated approach to considering the dichotomy "electrical equipment + power supply system" as a whole is one of the causes of unpredictable deviations in the normal operation of equipment, which leads to the receipt of inaccurate data about its technical condition. The solution of the problems raised is possible by improving the existing and developing new methods and tools that allow to introduce a system of diagnostics, forecasting and protection in the form of a single complex, which will increase the reliability and trouble-free operation of the ESC. Modern systems of transmission and distribution of energy are projected with a level of availability from 99.9 to 99.99%. This value strongly depends on the level of network redundancy, which differs depending on the geographical location and the voltage level (in the high-voltage network, the level of readiness is higher). In some remote regions, the readiness of transmission and distribution systems can be reduced to 99%. At the same time, even at 99.99%, the equivalent interruption time is 52 minutes. for a year. The article considers the main reasons influencing the quality of electric networks, namely: insufficient level of reliability of power supply for SETO; increase of relative electric power losses in electric grids; Electricity quality mismatch requirements of the real sector of the economy; inconsistency with modern technological realities of power supply management system; deterioration of the technical condition of the distribution electrical system complex; lack of accumulated statistical data; technological and electromagnetic losses. The statistics of breakdowns and accidents of electrical and medical equipment are presented.

Keywords: electrical equipment, electric networks, equipment breakdowns, voltage failures.

Вступ

Сучасні електротехнічні системи і комплекси є складними технічними пристроями, що містять електричні елементи, механічні вузли, електронні та мікропроцесорні блоки, які працюють на низьковольтній і високовольтній напругах, мають потужність від 30 кВт і вище. Встановлюються ЕСіК, як правило, в закритих приміщеннях, отримують електроживлення по окремих лініях і мають самостійні вузли релейного захисту блоків безперебійного живлення. Практика експлуатації ЕСіК показує, що вони досить чутливі до якості електроенергії українських 2- і 3-фазних мереж. Показник якості електроенергії (ПЯЕ) не враховується в процесі експлуатації обладнання, хоча в умовах поставки, він обумовлений. Це призводить до виникнення експлуатаційних відмов і несправностей, причинами яких є непрогнозовані зміни параметрів мережевої напруги живлення. Вихід ПЯЕ за межі норми, встановленої ГОСТ. 13109-97 призводить до ускладнення пошуку та діагностики несправності та її усунення, а також до збільшення фінансових і часових витрат.

Проведений нами і підтверджений колегами в Україні і за кордоном аналіз виникнення аварійних ситуацій і причин виходу ЕСіК з ладу, дозволяє розділити їх на [1]:

– внутрішні пошкодження, які викликані поломкою блоків через механічну зношеність елементів і вузлів; зниженням діелектричної міцності ізоляції, несвоєчасним проведенням технічного обслуговування;

помилками експлуатаційного персоналу і т. д;

– зовнішні пошкодження у вигляді поломок і збоїв в системі електропостачання – відмова комутаційної апаратури; зниження рівня ізоляції струмоведучих кабельних ліній; ослаблення контактних з'єднань струмопроводу і роз'ємів; неповнофазний режим мережі живлення; несанкціоновані відключення живлення; низька якість електроенергії та інші, що призводять до додаткових теплових втрат в елементах електропостачання;

– пошкодження, що виникають всередині ЕСіК через відхилення параметрів в системі електропостачання від значень, нормованих за ГОСТ 13109-97, несанкціонованих відключень напруги живлення, виникнення випадкових провалів напруги, що призводять до розвитку внутрішніх аварійних ситуацій і поломки ЕСіК.

Проблема

Відсутність комплексного підходу до розгляду дихотомії «електрообладнання + система електропостачання» як єдиного цілого є однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі обладнання, що призводить до отримання недостовірних даних про його технічний стан.

Рішення поставлених проблем можливе за рахунок удосконалення Існуючих та розроблення нових методів і засобів, що дозволяють представити систему діагностування, прогнозування та захисту у вигляді єдиного комплексу «ЕСіК + система електропостачання», який підвищить надійність і безаварійність роботи ЕСіК.

Основний зміст статті

Сучасні системи передачі і розподілу енергії проектується з рівнем доступності від 99,9 до 99,99%. Це значення сильно залежить від рівня резервування мережі, що відрізняється залежно від географічного положення і рівня напруги (в мережі високої напруги рівень готовності вище). У деяких віддалених регіонах готовність систем передачі й розподілу може опускатися до 99%. При цьому навіть при рівні 99,99% еквівалентний час переривання складає 52 хв на рік.

Для забезпечення належної роботи найвимогливіших процесів в сучасній «цифровій» економіці необхідно енергопостачання з рівнем готовності 99,9999999% (9 дев'яток). З 1992 по 2000 р EPRI проводив дослідження в США за визначенням середньої тривалості порушень.

Аварії, комутаційні перемикання і пошкодження в мережі живлення можуть бути причиною виникнення внутрішньої поломки обладнання або привести до порушення технологічного процесу, а для медичних закладів – отримання недостовірного результату обстеження хворого. Статистичні дані причин відключення, простою і припинення роботи СЕТО приведені в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1

Статистичні дані поломок і аварій електротехнічного обладнання

№	Вид пошкодження	Кількість виходу із строю, %	Причина пошкодження
1	Електродвигуни потужністю 0,25 кВт	57	Неповнофазний режим мережі, заклинювання підшипників, ненормативне навантаження, теплове та механічне зношування ізоляції
2	Нагрівальні пристрої	17	Підвищена напруга, природне зношування
3	Пошкодження кабельних і струмоведучих ліній	8	Зношування ізоляції, механічне пошкодження
4	Послаблення болтових струмоведучих з'єднань	3	Не пов'язані з мережею живлення
5	Інверторно-випрямляючі пристрої	5	Перенапруження, провали напруги

Дані, наведені в табл. 2, показують, що до 14% причин виникнення аварій і непрацездатності медичного обладнання пов'язані з аварійними, технологічними, профілактичними та іншими відключеннями в мережі живлення, що приводять до неповнофазного режиму мережі, появи комутаційних перенапруг, несиметричних режимів і появою короткочасних провалів напруги.

Вимоги, що пред'являються до надійності і безпеки електропостачання медичних лабораторій, досліджені в [2]. Однак в роботі [2] недостатньо розглянуті питання захисту медичного обладнання при виникненні пошкоджень режимів в мережі живлення і струмоведучих з'єднань. Однією з причин простою обладнання є ослаблення струмоведучого з'єднання [3], що призводить до його перегріву, вигорання з'єднання, пошкодження комутаційної апаратури і коротких замикань в системі електропостачання. У роботах [4, 5] досліджені причини перегріву контактних з'єднань, запропоновані методи і пристрої контролю контактних з'єднань струмоведучих частин.

Головні струмоведучі провідники електрообладнання, в тому числі вимикачів, можуть перегріватися в будь-якій електроустановці, особливо в місцях контактних з'єднань. Ця ситуація потребує особливої уваги як з точки зору пожежної безпеки і цілісності обладнання, так і з точки зору безпеки обслуговуючого персоналу.

Статистичні дані поломок і аварій медичного обладнання

№	Вид пошкодження	Кількість виходу зі строю, %	Причина пошкодження
1	Відсутність напруги живлення	3–5	Пошкодження силового і комутаційного обладнання, планові і аварійні перемикання мережі
2	Відсутність струму в одній із фаз живлення	5–7	Неповнофазний режим мережі живлення, обрив струмоведучого з'єднання, послаблення контакту струмоведучого з'єднання
3	Аварійне відключення і поломка інвентарю	3–4	Провал напруги в мережі живлення протягом більше 0,1 с
4	Внутрішні поломки і аварії	80–84	Не пов'язані з мережею живлення

Серед основних причин перегріву можна виділити підвищений перехідний опір внаслідок поганого контактного з'єднання. Точки нагріву можуть виникнути через нещільне з'єднання, окислення чи корозії, несправності компонентів. Такими точками частіше всього являються роз'ємні і нероз'ємні контактні з'єднання, затискачі в струмопроводі, головні струмоведучі контакти в комутаційних електроапаратах, точки болтового приєднання головних шин до вимикача [6].

При цьому потужність теплових втрат в струмопроводі визначається формулою [6]:

$$P = I^2 \rho \frac{l}{q} K_D, \quad (1)$$

де I^2 – струм, який протікає в провіднику;
 ρ – питомий опір матеріалу провідника;
 l – довжина провідника;
 q – переріз провідника;

K_D – коефіцієнт додаткових втрат, що враховує явище поверхневого ефекту і ефекту близькості.

Із (1) слідує, що великий вплив на потужність теплових втрат має активний опір, який виражається через співвідношення питомого опору, довжини і перерізу $R = \rho * l / q$.

Електричні контакти є слабкою ланкою в будь-яких системах розподілу енергії, управління промисловими процесами та машинами у всіх областях людської діяльності від енергетики до космічної техніки. Тому забезпечення їх надійності та моніторингу приділяється все більша увага [7–10].

Термін служби пристроїв електропостачання, діагностика стану яких ускладнена, значно менший нормативного. Одне зі слабких місць діагностики і контролю пристроїв електропостачання – це місця необґрунтованого підвищеного нагріву, зокрема контактні з'єднання (КЗ).

Для зібрання в електричний ланцюг шин, проводів і кабелів з струмопровідними жилами з міді, алюмінію і його сплавів використовуються з'єднання. Такі сполуки мають високу несучу здатність і надійність, прості при монтажі, демонтажі і заміні деталей. Різьблення мають понад 60% деталей, що входять до складу електроустановок. Застосування різьбових з'єднань дозволяє забезпечувати задані розрахункові зусилля стиснення контакт-деталей. Основним недоліком таких з'єднань є локальна концентрація механічних напружень на ділянках різьблення малої площі, що з часом призводить до ослаблення зусилля контактного натискання, особливо при вібраціях, коливаннях температури і при впливі циклічних механічних навантажень, характерних для умов експлуатації СЕТО. За даними [11], аварійність в електричних мережах через порушення роботи контактних з'єднань становить 10% загального числа аварій.

Основним методом неруйнівного контролю визначень цілісності КЗ є тепловий – контактне і безконтактне вимірювання температури КЗ і електричний – вимірювання омичного опору КЗ. Ці вимірювання в більшості випадків проводяться в рамках системи оглядів і планово-попереджувального ремонту електрообладнання [12–14].

Довговічність і надійність роботи електрообладнання залежить від збереження властивостей електричної ізоляції. Причинами зміни властивостей ізоляції при її експлуатації являється зміна фізико-хімічних властивостей складових її матеріалів і вплив комплексу зовнішніх і внутрішніх факторів. У кінцевому підсумку відмову ізоляції можна кваліфікувати як результат поступового або раптового погіршення фізико-хімічних властивостей матеріалу до рівня, при досягненні якого подальша надійна експлуатація ізоляції або обладнання стає неможливою [2].

Розрізняють об'ємну провідність ізоляції G_v , чисельно визначальну провідність через товщину ізоляції і поверхневу провідність ізоляції G_s , що характеризує наявність шару підвищеної електропровідності на поверхні розділу твердої ізоляції з навколишнім газоподібним чи рідким середовищем. Відповідно вводяться поняття об'ємного струму витоку I_v і поверхневого струму витоку I_s , а також об'ємного опору ізоляції R_v і поверхневого опору ізоляції R_s . Питомий опір твердих діелектриків залежить від багатьох факторів: температури, вологості, прикладеної напруги і напруженості електричного

поля. При підвищенні температури питомий опір електроізоляційних матеріалів, як правило, істотно зменшується. Так, при підвищенні температури ізоляції від 15°C до 50°C струми витoku збільшуються в 10–15 разів. Вплив температури на термін служби ізоляції від температури, при якій вона працює широко досліджений [4, 5], де за основу аналізу прийнятий емпіричний закон Вант Гоффа-Арреніуса. Відповідно до цього закону, підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення терміну служби ізоляції вдвічі. Емпіричний закон Вант Гоффа-Арреніуса пов'язує константу швидкості хімічної реакції з температурою процесу при вивченні закономірностей термічного старіння ізоляції.

Причинами провалів напруги є короткі замикання, які в свою чергу обумовлюються низкою об'єктивних і суб'єктивних причин: удари блискавки, забруднення ізоляції, механічні пошкодження опор, спрацьовування релейного захисту, дотик проводів сторонніми предметами, помилкові дії оперативного та ремонтного персоналу тощо. Згідно зі статистикою, 70% пошкоджень в повітряних мережах 110 кВ доводиться на однофазні короткі замикання (ОКЗ), 20% – на двофазні або двофазні на землю і 10% – трифазні. При визначенні значень показників провалів напруги згідно з [2] використовують допоміжні параметри електричної енергії, але нормується тільки один – тривалість провалу напруги, гранично допустиме значення якої в електричних мережах напругою до 20 кВ не повинно перевищувати 30 с.

У табл. 3 наведено рівні і час провалів напруги в системах електропостачання [15]. Відчутний вплив провалів напруги надають на безперервні технологічні процеси в хімії, нафтохімії, нафтопереробки металургії тощо галузях, такі технологічні процеси при зупинці і здійснення пуску вимагають тривалого часу – від кількох годин до кількох діб при суворому дотриманні технологічного регламенту.

Таблиця 3

Провали і переривання напруги в електричних мережах

Амплітуда, % $U_{ном}$	Кількість провалів і переривань в рік				
	Всього	В тому числі тривалістю, с			
		Від 0,01 до < 0,10	Від 0,10 до < 0,50	Від 0,50 до < 1	Від 1 до < 3
від 10 до 30	145	61	66	12	6
від 30 до 60	49	8	36	4	1
від 60 до 100	24	2	17	3	2
100	41	0	12	24	5
	259	71	131	43	14
	100%	27,4%	50,6%	16,6%	5,4%

З особливою увагою варто підходити до захисту дорогого діагностичного обладнання, наприклад, магнітно-резонансних і комп'ютерних томографів. Складне обладнання високої точності дуже чутливо до будь-яких перешкод в мережі живлення, навіть мінімальні відхилення напруги можуть привести до серйозних збоїв в роботі. Ці дорогі системи потребують особливо суворого дотримання стандартів забезпечення електроживлення і висувають високі вимоги до джерел безперебійного живлення [16–18].

Висновки

Проведений аналіз літературних джерел показав, що до основних причин, що впливають на якість електричних мереж слід віднести недостатній рівень надійності електропостачання для СЕТО; збільшення відносних втрат електроенергії в електромережах; невідповідність якості електроенергії вимогам реального сектора економіки; невідповідність сучасним технологічним реаліям системи управління енергопостачанням; погіршення технічного стану розподільного електромережевого комплексу; відсутність накопичених статистичних даних; технологічний та електромагнітний збитки.

Література

1. Коверникова Л. И. О комплексном подходе к управлению качеством электрической энергии / Л. И. Коверникова // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление : сб. статей всероссийской конференции. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 256–264.
2. Экономические аспекты качества электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ldiomovelectro.ru/articles/ekonomicheskie-aspekty-kachestva-elektro-energii.html>
3. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: Recognition and Avoidance // Radio Graphics. – 2004. – Vol. 24. – P. 1679–1691.
4. Bhattacharjee S. A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction / S. Bhattacharjee // IAEME Intl. J. Elec. Engg. Tech. – 2012. – Vol. 3, Issue 2. – P. 394–04.
5. Braunovic M. Performance of Utility Power Connectors in a Saline Environment / M. Braunovic, B. Johnson // IEEE TDCE. – 2001. – Vol. 2. – P. 781–786.

6. Kirtley J. L. 6.685 Electric Machines / Massachusetts Institute of Technology / J. L. Kirtley. – MIT OpenCourseWare, 2005.
7. Балаков Ю. Н. Исследование электрических характеристик неподвижных контактных соединений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04 / Балаков Ю. Н. – М., 1978. – 18 с.
8. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения / Л. М. Бернштейн. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 376 с.
9. Брон О. Б. Прогнозирование поведения замкнутых контактов при длительной эксплуатации в различных средах / О. Б. Брон, Б. Э. Фридман, М. Е. Евсеев // Электротехника. – 1978. – № 2. – С. 5–7.
10. Брон О. Б. Тепловое сопротивление контактов. Нагревание несимметричных контактов / О. Б. Брон, М. Е. Евсеев // Электрические контакты. – М. : Наука, 1965. – С. 128–131.
11. Braunovic M. A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts / M. Braunovic, V.V. Izmailov, M.V. Novoselova // Proceedings of the 51 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Chicago, Sept. 2005. – P. 217–223.
12. Mutic S., Palta J.R., Butker E.K., Das I.J., Huq M.S., Loo L.N., Salter B.J., McCollough C.H., Van Dyk J.: отчет ААРМ Целевая группа Комитета по лучевой терапии Quality Assurance for Computed Tomography Simulators and the Computed Tomography Simulation Process: AAPM Report Task Force on the Radiotherapy Committee № 66. Med Phys. 2003 окт., 30 (10): 2762–92.
13. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. М. Л. Мамиконянца. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
14. Щапов П. Ф. Теоретичні та практичні засаби систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів : монографія / П. Ф. Щапов, Р. П. Мігушенко, О. Ю. Кропачек. – Харків : Вид-во «Підручник НТУ "ХПГ"», 2015. – 244 с.
15. Classification of Visual and Mechanical Defects for Equipment Electronic. Wire and other Defects (Non Electronic) MIL-STD-252V(1Z) 1970.
16. Mathur R. M. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems / R. M. Mathur, R. K. Varma. – IEEE Press, Piscataway, 2002. – 518 p.
17. Najjar M., Heydt G. T. A hybrid nonlinear least squares estimation of harmonic signal levels in power systems // IEEE Trans. Power Delivery. – 1991. – Vol. 6, no. 1. – P. 282–288.
18. А.с. № 1367106 СССР МПК H02K15/2. Устройство защиты изоляции обмоток электродвигателей от увлажнения / Жежеленко И. В., Липский А. М., Кривоносов В. Е. – опуб. 1988.

References

1. Kovernikova L. I. O kompleksnom podhode k upravleniju kachestvom elektricheskoy energii / L. I. Kovernikova // Jenergetika Rossii v XXI veke. Innovacionnoe razvitie i upravlenie : sb. statej vsersosijskoj konferencii. – Irkutsk : ISJeM SO RAN, 2015. – S. 256–264.
2. Jekonomicheskie aspekty kachestva jelektrojenergii [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://idiomovelectro.ru/articles/ekonomicheskie-aspekty-kachestva-elektro-energii.html>
3. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: Recognition and Avoidance // Radio Graphics. – 2004. – Vol. 24. – P. 1679–1691.
4. Bhattacharjee S. A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction / S. Bhattacharjee // IAEME Intl. J. Elec. Eng. Tech. – 2012. – Vol. 3, Issue 2. – P. 394–04.
5. Braunovic M. Performance of Utility Power Connectors in a Saline Environment / M. Braunovic, B. Johnson // IEEE TDCE. – 2001. – Vol. 2. – R. 781–786.
6. Kirtley J. L. 6.685 Electric Machines / Massachusetts Institute of Technology / J. L. Kirtley. – MIT OpenCourseWare, 2005.
7. Balakov Ju. N. Issledovanie jelektricheskix harakteristik nepodviznyh kontaktnykh soedinenij : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk : 05.02.04 / Balakov Ju. N. – М., 1978. – 18 с.
8. Bernshtejn L. M. Izoljacija jelektricheskix mashin obshhego naznachenija / L. M. Beryshtejn. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Jenergoatomizdat, 1981. – 376 с.
9. Bron O. B. Prognozirovanie povedenija zamknytyh kontaktov pri dlitel'noj jekspluatcii v razlichnyh sredah / O. B. Bron, B. Je. Fridman, M. E. Evseev // Jelektrotehnika. – 1978. – № 2. – S. 5–7.
10. Bron O. B. Teplovoe soprotivlenie kontaktov. Nagrevanie nesimmetrichnyh kontaktov / O. B. Bron, M. E. Evseev // Jelektricheskie kontakty. – М. : Nauka, 1965. – S. 128–131.
11. Braunovic M. A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts / M. Braunovic, V.V. Izmailov, M.V. Novoselova // Proceedings of the 51 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Chicago, Sept. 2005. – P. 217–223.
12. Mutic S., Palta J.R., Butker E.K., Das I.J., Huq M.S., Loo L.N., Salter V.J., McCollough C.H., Van Dyk J.: отчет ААРМ Целевая группа Комитета по лучевой терапии Quality Assurance for Computed Tomography Simulators and the Computed Tomography Simulation Process: AAPM Report Task Force on the Radiotherapy Committee № 66. Med Phys. 2003 окт., 30 (10): 2762–92.
13. Syromjatnikov I. A. Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelej / pod red. M. L. Mamikonjanca. – М. : Jenergoatomizdat, 1984. – 240 с.
14. Shhapov P. F. Teoretichni ta praktichni zasabi sistem kontrolju ta diagnostuvannja skladnih promislovykh ob'ektiv : monografija / P. F. Shhapov, R. P. Migushhenko, O. Ju. Kropachek. – Harkiv : Vid-vo «Pidruchnik NTU "HPG"», 2015. – 244 с.
15. Classification of Visual and Mechanical Defects for Equipment Electronic. Wire and other Defects (Non Electronic) MIL-STD-252V(1Z) 1970.
16. Mathur R. M. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems / R. M. Mathur, R. K. Varma. – IEEE Press, Piscataway, 2002. – 518 p.
17. Najjar M., Heydt G. T. A hybrid nonlinear least squares estimation of harmonic signal levels in power systems // IEEE Trans. Power Delivery. – 1991. – Vol. 6, no. 1. – P. 282–288.
18. А.с. № 1367106 СССР МПК H02K15/2. Устройство zashhity izoljicii obmotok jelektrodvigatelej ot uvlazhnenija / Zhezhenenko I. V., Lipskij A. M., Krivonosov V. E. – opub. 1988 г.

Рецензія/Peer review : 24.1.2019 р.

Надрукована/Printed : 16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.