

Goodness – of – Fit Test for Two-Parameter Weibull or Extreme – Value Distribution [Text] / N. R. Mann, K. W. Fertig, E. M. Scheuer. – Aerospace Research Laboratories, Wright Patterson Air Force Base, Ohio, ARL 71 – 0077, Contact No, AF 33 (615) – 70 – C – 1216, 1971. 6. Канур, К. Надежность и проектирование систем [Текст] / К. Канур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lehtman, I. I., Koval'ov, O. P., Ochkur, M. M., Bilousenko, I. V. (21.04.2011). Patent na vinahid, MPK (2006.01), F16K 17/04. Pristrij zahistu dlja zabezpechennja vibuhobezpeki primishhen', jaki ekspluatujut' pobutovij gaz. № a 201105092; Reshenie o vydache ot 17.05.12. 2. TU 3742-024-00158824-99 Sertifikat sootvetstvija № ROSS RU.AJa04.V02541. Klapan-otsekatel' dlja zashhity skvazhin i shlejfov v sluchajah avarijnogo povyshenija ili ponizhenija davlenija. 3. Svetushenko, S. G., Mokeev, M. Ju., Smirnov, Ju. A. (10.10.2006). Patent na izobrenenie 2285180 RF, MPK8, F16 K17/04 Klapan-otsekatel, 7. 4. Ancharova, T. V., Avetjan, A. G. (2006). Analiz vzaimozamenjaemosti avtomaticheskikh vykljuchatelej v osvetitel'nyh setjah. Promyshlennaja jenergetika, 1, 9–14. 5. Mann, N. R., Fertig, K. W., Scheuer, E. M. (1971). Tolerance Bounds a New Goodness – of – Fit Test for Two-Parameter Weibull or Extreme – Value Distribution. Aerospace Research Laboratories, Wright Patterson Air Force Base, Ohio, ARL 71 – 0077, Contact No, AF 33 (615) – 70 – C – 1216. 6. Kanur, K., Lamberson, L. (1980). Nadezhnost' i proektirovanie sistem. Mir, 604.

*Поступила (received) 22.05.2014*

## УДК 621.313

**Д. В. ПОЛКОВНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецьк;  
**І. І. МОСКВІНА**, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецьк

### УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Виконано аналіз шляхів переходу від планово-попереджувальних ремонтів до системи обслуговування за фактичним станом короткозамкнених асинхронних двигунів за рахунок застосування методів діагностики, що дозволяють оцінити їх технічний стан в робочих режим. З цією метою запропоновано використовувати комплексний критерій справності, який визначається на підставі контролю несиметрії фазних струмів статора і кута нахилу механічної характеристики.

**Ключові слова:** асинхронні електродвигуни, технічне обслуговування, обслуговування за фактичним станом, діагностика, критерій.

**Постановка проблеми.** Найважливішим завданням в сучасній промисловості є питання забезпечення максимального виробничого ефекту (отримання максимального прибутку). Вирішення даного завдання в електричних системах багато в чому залежить від надійності роботи та від раціональності системи технічного обслуговування і ремонтів (ТОіР) електроустаткування.

У теперішній час для підтримки електроустаткування в працездатному стані використовуються ряд технічних заходів, обсяг і періодичність виконання яких нормується системою планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Однак в сучасних економічних умовах ефективність виконання заходів, що регламентовані цією системою, є дуже низькою [1]. Технічне обслуговування й ремонт електроустаткування часто проводиться несвоєчасно. Це викликано тим,

© Д. В. ПОЛКОВНИЧЕНКО, І. І. МОСКВІНА, 2014

що виконання ТОіР у СРСР регламентувалося системою державних і галузевих нормативів, які визначали плани – як, коли, у якому обсязі й ким повинні здійснюватися відповідні роботи. Ця система ППР носила витратний характер, не мала достатню гнучкість, але забезпечувала експлуатацію устаткування відповідно до галузевих норм і стандартів безпеки. Однак, при переході від планової економіки до ринку, підприємства не змогли мати втрати на ТОіР у колишньому обсязі, що привело в багатьох галузях до постійного невиконання планів ремонтів, до втрати надійності устаткування й збільшенню ресурсів, необхідних для підтримки його працездатності в майбутньому [2].

За даними, що наведені в [3], витрати на технічне обслуговування устаткування в енергетичному секторі в країнах ЄС складають \$18 на кінську силу (к.с.)– при роботі до виходу із ладу, \$13 на к.с.– за системою ППР та \$9 на к.с. – при системі обслуговування за фактичним станом (ОФС).

До того ж порівнюючи системи ППР і ОФС можна виділити основні переваги другого підходу [4]:

- при ППР біля 50% робіт виконується без фактичної на то необхідності;
- при ППР спостерігається зниження надійності устаткування відразу після проведення ремонту;
- при ППР виконується заміна деталей з великим залишковим ресурсом;
- при ОФС завжди відомий фактичний стан устаткування;
- при ОФС підвищується ефективність ремонту за рахунок післяремонтного діагностування;
- при ОФС вірогідно визначаються строки необхідних робіт із профілактики та ремонту устаткування.

Хоча ОФС й вимагає додаткових витрат на оснащення устаткування системами моніторингу і діагностики, але як показує практика ці витрати швидко окупаються та приносять додатковий прибуток.

Метою системи ОФС є підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат. Згідно до основної концепції системи ОФС для ухвалення рішення про необхідність виконання яких-небудь відбудовних і ремонтних робіт треба мати оперативну інформацію про технічний стан вузлів або електроустаткування в цілому. Тому одним з основних є завдання вибору методу діагностики для одержання інформації про технічний стан із заданою вірогідністю.

Таким чином, для підвищення економічної ефективності виробництва і конкурентоздатності підприємства актуальним питанням є впровадження та використання системи обслуговування і ремонтів електроустаткування за фактичним станом.

Короткозамкнені асинхронні електродвигуни (АД) - найпоширеніші приводи сучасних технологічних машин. Однак оптимальному використанню таких електродвигунів перешкоджає їх висока пошкоджуваність (щорічно пошкоджуються 20-25% від загальної кількості встановлених електродвигунів). Залежно від виду та ступеня пошкодження ремонт електродвигуна здійснюється або власними силами (у межах підприємства, що експлуатує електродвигуни), або спеціалізованими організаціями (електроремонтними заводами або цехами). При цьому для більшості електродвигунів після ремонту з розбиранням і заміною

деталей надійність роботи часто знижується. Важко також виявити під час ремонту приховані дефекти, такі, наприклад, як дефекти стрижнів короткозамкненого ротора або порушення ізоляції обмотки статора, що призводить до виткових замикань. У зв'язку з цим розробка і вдосконалення методів діагностики, післяремонтної оцінки технічного стану електродвигунів, перевірки їх працездатності та відповідності нормативним вимогам основних параметрів є актуальним завданням. Вирішення всіх цих завдань дозволяє перейти до обслуговування електродвигунів за фактичним технічним станом.

Метою проведених досліджень був аналіз шляхів переходу до ОФС короткозамкнених АД за рахунок застосування методів діагностики, що дозволяють оцінити їх технічний стан в робочих режимах.

Основним завданням технічного діагностування є одержання достовірної інформації про технічний стан електродвигунів в процесі експлуатації. Воно вирішується на основі виміру, контролю, аналізу й обробки кількісних та якісних значень параметрів електродвигунів.

Технічна діагностика електроустаткування, в тому числі електродвигунів, містить у собі два головних напрямки - оперативну і ремонтну діагностику. До основних завдань оперативної діагностики відносяться:

- раннє виявлення дефектів на працюючому або виведеному з роботи для обстеження (але не розібраному) устаткуванні;
- прогнозування розвитку дефектів, оцінка їх небезпеки та загального стану устаткування.

В [5] запропонована блок-схема процесу прийняття рішення про проведення ремонту електродвигуна, що наведена на рис.1.

Надійність діагностики вимагає збільшення кількості методів і періодичності, а, з іншого боку, економічний аспект змушує зменшувати обсяг робіт. В останні роки пропонується підхід, який отримав назву

"багатопараметричної діагностики" (БПД). Згідно БПД визначається оптимальний набір методів діагностики залежно від виду електроустаткування.

При використанні БПД виникає необхідність оцінки результатів діагностики технічного стану устаткування. Нормовані показники кожного методу різні, немає можливості зіставляти "прямо" отримані за різними методиками дані. Із

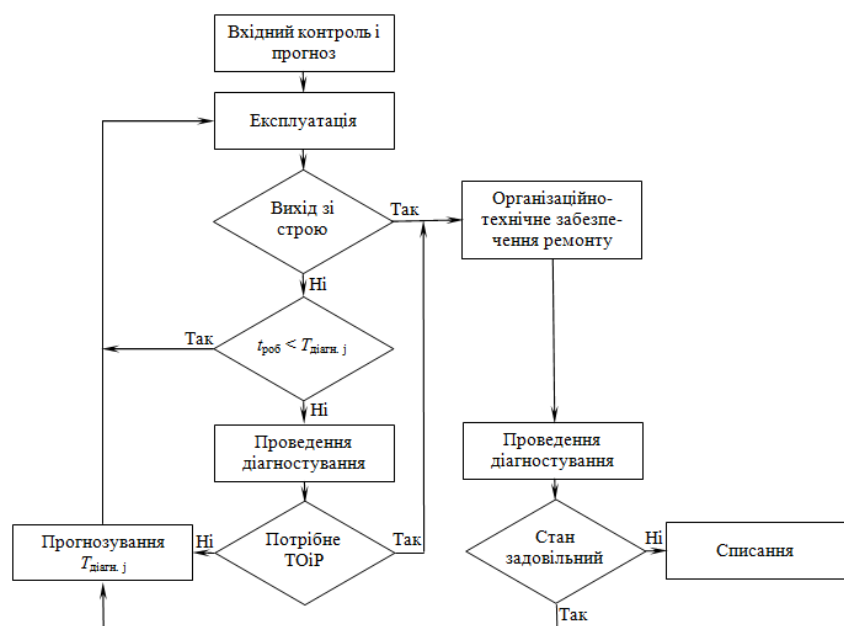


Рис.1 – Пропонована блок-схема процесу прийняття рішення про проведення ремонту електродвигуна

цієї причини була прийнята нова процедура "класифікації", що дозволяє розділити технічний стан устаткування на кілька класів залежно від рівня отриманої характеристики. Деякі системи класифікацій наведені в табл.1 [6].

Таблиця 1 – Системи класифікації технічного стану електрообладнання

1	Дворівнева класифікація	«Успішно – неуспішно» (так – ні)
2	Трирівнева класифікація	- Норма (так) - Погіршене - Предаварійне (ні)
3	П'ятирівнева класифікація	- Норма (так) - Норма з відхиленнями - Норма зі значними відхиленнями - Погіршене (ні) - Предаварійне

Більш докладно п'ятирівнева система класифікації з визначенням особливостей дефекту і обсягом рекомендацій наведена в табл.2 [6].

Таблиця 2 – П'ятирівневасистема класифікації технічного стану

Технічний стан ізоляції		Ступінь розвитку дефекту ізоляції	Ремонтно-профілактичні заходи
Предаварійне		Неприпустимий дефект, необхідно відключення	Демонтаж із заміною обладнання на нове
Погіршене		Небезпечний дефект, експлуатація можлива при прискореному контролі	Підготовка і планування капітального ремонту
Норма	зі значними відхиленнями	Розвинутий дефект; характеризується прискореним темпом розвитку	Експлуатація з наступним (планованим) ремонтом. Можливий ремонт на місці
	зі слабкими відхиленнями	Отримана характеристика дефекту перевищує рівень шумів	Експлуатація при дотриманні профілактичних заходів
	без зауважень (сигнал на рівні шумів)	Характеристики на рівні шумів	Експлуатація без обмежень

Коли виконано обстеження технічного стану, для висновку за результатами діагностики (при використанні декількох методів) розумно використовувати "песимістичну оцінку", у даній ситуації в цілому по об'єкту приймається гірший діагноз.

Як було вже сказано вище, використання системи ОФС дозволяє також контролювати якість проведення ремонтних та монтажних-налагоджувальних робіт, що значно впливає на надійність роботи устаткування.

Таким чином, виконаний аналіз дозволив сформувати область застосування технічних засобів діагностики при використанні системи ОФС (рис. 2) [7].

Основним завданням для переходу до ОФС електродвигунів є розробка достовірних методів діагностики технічного стану.



До

основних вимог, яким повинен

Рис. 2 – Область застосування технічних засобів діагностики при використанні ОФС

відповідати «ідеальний» сучасний метод діагностування стану електродвигунів, можна віднести [8]:

- висока достовірність і точність виявлення несправностей і пошкоджень електродвигуна;
- можливість виявлення всіх або значної частини електричних і механічних пошкоджень електродвигуна і пов'язаних з ним механічних пристроїв;
- можливість проведення діагностичних вимірів дистанційно, що актуально в тих випадках, коли доступ до устаткування ускладнено;
- низька трудомісткість діагностичних робіт (вимірювань) і простота проведення вимірювань;
- можливість проведення аналітичної обробки отриманих результатів вимірювань за короткий час – із застосуванням обчислювальних і програмних засобів.

У роботах [9,10] оцінка післяремонтної працездатності електродвигунів проводиться шляхом визначення їх робочих параметрів (індуктивних і активних опорів, втрат у сталі, симетрії конструкції і т.д.).

Виявлення пошкоджених стрижнів ротора в асинхронній машині з короткозамкненою кліткою ротора розглядається в роботі [11]. Представлений Віденський метод моніторингу заснований на двох підходах до моделювання. У випадку ідеально симетричної машини обидві моделі дадуть однакові результати розрахунку параметрів стану машини. Якщо ротор має один або більше пошкоджених стрижнів, то лінійні напруги і струми будуть спотворюватися.

Кілька методів виявлення виткових коротких замикань і дефектів стрижнів ротора АД порівнюються в роботі [12]. Робиться висновок, що деякі гармоніки електромагнітного моменту виявляють їх ефективність при встановленні розглянутого виду ушкодження з великим ступенем чутливості, ніж гармоніки аксіального потоку розсіювання.

В роботі [13] показано, що спектральні лінії при частотах  $(1 \pm 2s)f$  струму однієї з фаз є найбільш ефективними сигналами для цілей суворого діагностування розриву стрижнів короткозамкненого ротора АД.

Для виявлення можливих методів оцінки технічного стану короткозамкнених

АД були проведені експериментальні дослідження з використанням спеціальних стендів.

Вимірювання режимних параметрів виконувались за допомогою інформаційно-вимірювального комплексу, що складається з ПЕОМ та пристрою зв'язку ПЕОМ із зовнішніми об'єктами.

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень запропоновано для оцінки післяремонтного стану обмоток статора і ротора короткозамкнутого АД використовувати узагальнений параметр – коефіцієнт його справного стану, який визначається як

$$k_{\partial} = \frac{c_i k_i + c_p k_p}{c_i + c_p},$$

де  $c_i, c_p$  – вагові коефіцієнти, які дорівнюють  $1 \div 3$ , вони можуть бути уточнені на підставі досвіду експлуатації електродвигуна;  $k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1}$  – коефіцієнт несиметрії струмів;  $I_1, I_2$  – діючі або амплітудні значення складових струму відповідно прямої та зворотної послідовностей;  $k_p$  – критерій, що характеризує крутизну механічної характеристики АД в області робочих ковзань і визначається за виразом

$$k_p = \frac{P/P_{ном}}{s/s_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U}\right)^2,$$

де  $P_{ном}, s_{ном}, U_{ном}$  – номінальні значення відповідно споживаної АД активної потужності, ковзання і напруги статора АД;  $P, s, U$  – відповідно споживана АД активна потужність, ковзання і напруга статора АД, що визначаються за результатами контролю.

Для справного двигуна  $k_{\partial}=1$ . Відхилення цього параметра в бік зниження від одиниці свідчить про наявність дефектів обмоток короткозамкнутого АД.

З використанням математичної моделі [14] проведений розрахунок залежностей критерія  $k_{\partial}$  від кількості обірваних стрижнів  $n_{об.ст.}$  для АД типу АВ-8000, що має наступні каталожні дані:  $P_{ном} = 8000$  кВт;  $U_{ном} = 6$  кВ;  $I_{ном} = 875$  А;  $s_{ном} = 0,0167$ ;  $n_{ном} = 2950$  об/хв;  $\eta = 0,963$ ;  $\cos\varphi_{ном} = 0,9$ ;  $K_{пуск} = 5,8$ ;  $M_{пуск} = 0,8$ ;  $M_{макс} = 2$ ; кількість стрижнів ротора – 38.

За каталожними даними розраховано параметри заступної схеми АД:  $X_m = 3,9244$  у.о.;  $X_{\sigma s} = 0,0575$  у.о.;  $R_{r1} = 0,017$  у.о.;  $R_{r2} = 0,1198$  у.о.;  $X_{\sigma r1} = 0,1786$  у.о.;  $X_{\sigma r2} = 0,3133$  у.о.

Результати розрахунків наведено в табл. 3

Як видно з даних, наведених у табл. 3, величина діагностичних параметрів залежить як від кількості обірваних стрижнів короткозамкнутого ротора АД, так і від їх місця розташування і ступеня пошкодження стрижнів. Найбільша величина несиметрії має місце при обриві сусідніх стрижнів, а найменша - при неповному обриві стрижнів, що відповідає порушенню паяних і зварних з'єднань в роторі.

Таблиця 3–Результати розрахунків параметрів заступної схеми АД

$n_{об.ст.}, шт.$	$k_i, у.о.$	$k_p, у.о.$	$k_d, у.о.$
0	1	1	1
№ 1– неповний обрив	0,983	0,976	0,979
№ 1 – повний обрив	0,975	0,959	0,967
№ 1,2 – неповний обрив	0,966	0,941	0,954
№ 1,19 – повний обрив	0,959	0,931	0,945
№ 1,2 – повний обрив	0,956	0,918	0,937
№ 1,2,3 – неповний обрив	0,949	0,906	0,927
№ 1,13,26 – повний обрив	0,944	0,899	0,922
№ 1,2,3 – повний обрив	0,938	0,887	0,913

Для дослідження залежності запропонованого критерію справності при наявності виткових замикань в обмотці статора АД використана методика, що наведена в роботі [15]. Методика заснована на визначенні власних і взаємних

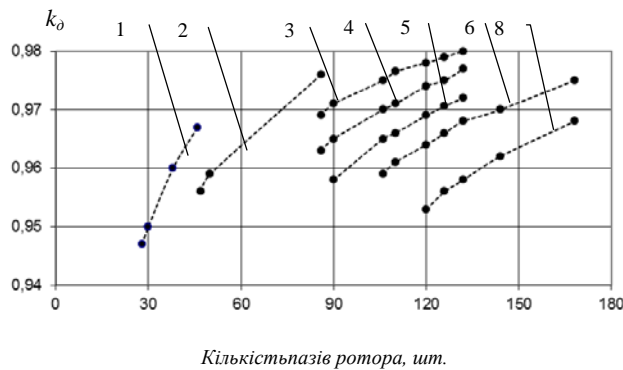


Рис. 3 – Узагальнені залежності критерію справності  $k_d$  при обриві одного стрижня від кількості пазів ротора для АД з різною кількістю пар полюсів  $p$

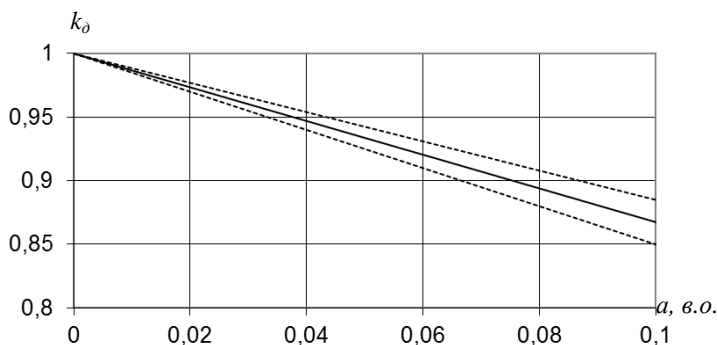


Рис. 4 – Узагальнена залежність критерію справності  $k_d$  від кількості витків, що замкнулися, обмотки статора АД  $a$ , а також діапазон її відхилення (пунктирні лінії)

статора (рис.4) отримана шляхом усереднення для АД наступних серій і типів: ДАЗО2 16-го і 18-го габаритів, ДАЗО4, АТД2, АТД4, А і АЗ 12-го і 13-го

індуктивностей контурів обмотки статора. Це пов'язано з тим, що при замиканні невеликої кількості витків обидві частини обмотки статора розташовані в одних і тих же пазах, тому їх взаємодукції велика. Індуктивність замкнутих витків мала, і при відносно невеликому струмі в решті частині обмотки струм в пошкоджених витках може досягти більших значень. На підставі результатів математичного моделювання усталених режимів роботи короткозамкнених АД різних типів отримано узагальнені залежності комплексного критерію справності  $k_d$  від ступеня розвитку дефектів (рис.3-4).

Узагальнена залежність  $k_d$  від кількості витків, що замкнулися, обмотки

габаритів, АВ і АВК і справедлива на початковій стадії розвитку виткового замикання.

Величину критерію справності в діапазоні «справний двигун» ( $k_d=1$ ) і «пошкоджений двигун» ( $0,98 < k_d < 1$ ) можна вважати конструктивною несиметрією і використовувати при діагностуванні даного електродвигуна в експлуатаційних режимах для підвищення достовірності постановки діагнозу.

Однією із загальних проблем асинхронних машин є ексцентриситет. У роботах [16, 17] показано, що при збільшенні рівня динамічного і статичного ексцентриситету збільшуються середні значення власних індуктивностей. Це призводить до зміни коефіцієнта потужності електродвигуна. Так для справного двигуна на холостому ходу коефіцієнт потужності має величину 0,263, а при наявності статичного ексцентриситету (приблизно 70%) – 0,493 [17]. Цей факт дозволяє на підставі контролю коефіцієнта потужності контролювати стан механічної частини електродвигуна.

**Висновки.** Для оцінки технічного стану короткозамкнених асинхронних електродвигунів запропоновано використовувати комплексний критерій справності, який визначається на підставі контролю несиметрії фазних струмів статора і кута нахилу механічної характеристики. Ефективність використання цього критерію підтверджується результатами експериментальних досліджень і математичного моделювання. Використання запропонованого методу, поряд з іншими відомими методами діагностування технічного стану короткозамкнених АД, дозволить перейти до їх обслуговування по фактичному технічному стану.

**Список літератури:** 1. Техническое обслуживание по фактическому состоянию [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.systematic.ru/tehnicheskoe\\_obs\\_luzhivanie\\_po\\_fakticheskomu\\_sostoyaniyu.html](http://www.systematic.ru/tehnicheskoe_obs_luzhivanie_po_fakticheskomu_sostoyaniyu.html). – Загл. с экрана 2. Хомутов, С. О. Прогнозирование вероятности безотказной работы электродвигателей на основе количественной оценки степени влияния воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2006. – № 2. – С. 4–8. 3. Технология обслуживания по фактическому состоянию [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.vdmk.com/information/tofs.htm>. – Загл. с экрана . 4. Холоденин, А. А. Сравнение стратегий технического обслуживания электрооборудования [Текст] : матер. X регион. науч.-тех. конф. / А. А. Холоденин // Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону. СевКавГТУ, 2006. – Режим доступа : <http://www.ncstu.ru>. 5. Хомутов, С. О. Комплекс мероприятий по повышению надежности электрических двигателей в сельском хозяйстве на основе достоверных методов диагностики и эффективных технологий восстановления изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. –2010. – № 4/2. – С. 70–76. 6. Радченко, В. В. Диагностика изоляции статорных обмоток высоковольтных двигателей нефтеперекачивающих станций на рабочем напряжении [Текст] / А. П. Горских, А. Г. Кошель, Ю. П. Аксенов // Трубопроводный транспорт. – 1999. – № 3. 7. Хомутов, С. О. Новые методы и технические средства диагностики электродвигателей в агропромышленном комплексе [Текст] / С. О. Хомутов, Ю. А. Тонких, В. С. Дронов // Ползуновский вестник. –2009. – № 4. – С. 109–115. 8. Петухов, В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка напряжения и тока. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/49/10.php>. – Загл. с экрана 9. Бешта, А. С. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по переходному процессу в обмотке статора [Текст] : тр. КПИ / А. С. Бешта, Ю. В. Куваев, Т. А. Желдак, Ю. А. Макуха, А. В. Балахонцев // Проблемы создания новых машин и технологий. – 1999. – Вып. 1. – С. 112–115. 10. Родькин, Д. И. К определению



послеремонтной работоспособности асинхронных двигателей [Текст] : тр. КГПИ / Д. И. Родькин, А. П. Черный // Проблемы создания новых машин и технологий. – 2001. – Вып. 2. – С. 40–47. **11.** Kral, C. Vienna monitoring method – detection of faulty rotor bars by means of a por table measure ment system [Text] / C. Kral, F. Pirker //International conference on electrical machines (ICEM-2000). –Helsenki University of technology, Espoo, Finland, 2000. – P. 873–877. **12.** Delmotte, C. Comparison of two modeling method for induction machine study: application to diagnosis [Text] : inter. conf. / C. Delmotte, H. Henaо, G. Ekwe, P. Brochet, G.-A. Capolino // Electrical machines (ICEM-2002). – Old St. Jan Conference Center, Brugge, Belgium. – Conference Record, 2002. **13.** Bellini, A. Towards a correct quantification of induction machines broken bars through input electric signals [Text] : inter. conf. / A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni // Electrical machines (ICEM-2000). –Helsenki University of technology, Espoo, Finland, 2000. – P. 781–785. **14.** Нури, Абделбассет Диагностика короткозамкнутых роторов асинхронных электроприводов электротехнических комплексов [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук / Нури Абделбассет. – ДонНТУ. – Донецк, 1997. **15.** Ипатов, П. М. Витковыезамыкания в петлевых обмотках асинхронных машин [Текст] / П. М. Ипатов, В. В. Домбровский, Ю. Л. Цирлин // Вестникэлектропромышленности. – 1962. – № 7. – С. 36–43. **16.** Meshgin, H. Effectsofair-gаресcentri city on the power factor of squirrel cage in ducti on machines [Text] : inter. conf. / H. Meshgin, J. Milimonfared // Electrical machines (ICEM-2002). – OldSt. Jan Conference Center, Brugge, Belgium. – ConferenceRecord, 2000. **17.** Rogozin, G. G. Vliyaniye neravnomernosti vozdušno gozazorana elektromagnitnyye parametry i perekhodnyye protsessy rotora pri otklyuchenii asinkhronnykh dvigateley [Text] / G. G. Rogozin // Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. Seriya: elektrotehnika i energetika. – 2000. – № 17. – P. 158–164.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Technical maintenance according to real state. Available at: [http://www.systematic.ru/tehnicheskoe\\_obslyuzhivanie\\_po\\_fakticheskomu\\_sostoyaniyu.html](http://www.systematic.ru/tehnicheskoe_obslyuzhivanie_po_fakticheskomu_sostoyaniyu.html). **2.** Homytov, S. O., Kobozev, E. V. (2006). Prognostication of probability of survival electric motors on basis of the quantitative estimate of influencing factor level. VestnikAltGTUim. I.I. Polzunova, 2, 4–8. **3.** Technology of the maintenance according to real state. Available at: <http://www.vdmk.com/information/tofs.htm>. **4.** Holodenin, A. A. (2012). Technical maintenance strategy comparison of the electric equipment. X regionalnaykonferentsiya «Vuzovskayanauka - Severo-Kavkazkomuregionu». Available at: <http://www.ncstu.ru> **5.** Homytov, S. O. (2010). Complex actions on increasing of reliability of the electric motors in agriculture on base of the reliable diagnostics methods and efficient technology of the insulation restoration. Polzunovskiyvestnik, 4/2, 70-76. **6.** Radchenko, V. V. (1999). Diagnostika izolyatsii statornykh obmotok vysokovol'tnykh dvigateley nefteperekachivayushchikh stantsiy na rabochem napryazhenii. Truboprovodnyy transport, 3, 40-45. **7.** Homytov, S. O. (2010). Complex actions on increasing of reliability of the electric motors in agriculture on base of the reliable diagnostics methods and efficient technology of the insulation restoration. Polzunovskiyvestnik, 4/2, 70-76. **8.** Petukhov, V. S. (2008). Diagnostika elektrodvigateley. Spektral'nyy analiz moduley vektorov Parka napryazheniyai toka. Available at :<http://www.news.elteh.ru/arh/2008/49/10.php> **9.** Beshta, A. S., Kuvayev, YU. V., Zheldak, T. A., Makukha, YU. A., Balakhontsev, A. V. (1999). Opredeleniye parametrov skhemy zameshcheniy aasinkhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom poperekhodnomu protsessu v obmotke statora. Trudy KGPI "Problemy sozdaniya novykh mashin I tekhnologiy", 1, 112–115. **10.** Rod'kin, D. I., Chernyy, A. P. (2001). K opredeleniyuposleremontnoyrabotosposobnostiasinkhronnykhdvigateley, 2, 40-47. **11.** Kral, C., Pirker, F. (2000). Viennam onitoringmethod – detection of faulty rotor barsbymeansofapor tablemea surement system. International conference on electrical machines (ICEM-2000). Helsenki University of technology, Espoo, Finland, 873–877. **12.** Delmotte, C., Henaо, H., Ekwe, G., Brochet, P., Capolino, G.-A. (2000). Comparison of two modeling method for induction machine study: application to diagnosis. International conference on electrical machines (ICEM-2002). Old St. Jan Conference Center, Brugge, Belgium. Conference Record. **13.** Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. (2000). Towards a correct quantification of induction machines broken bars through input electric signals. International conference on electrical machines (ICEM-2000). Helsenki University of technology, Espoo, Finland, 781-785. **14.** Nuri, Abdelbasset (1997). Diagnostika

korotkozamknutykh rotorov asinkhronnykh elektroprivodov elektrotekhnicheskikh kompleksov. DonNTU, Donetsk. **15.** Ipatov, P. M., Dombrovskiy, V. V., Tsirlin, YU. L. (1962). Vitkovyye zamykaniya v petlevykh obmotkakh asinkhronnykh mashin. Vestnik elektropromyshlennosti, 7, 36–43. **16.** Meshgin, H., Milimonfared, J. (2002). Effect of air-gap eccentricity on the power factor of squirrel cage induction machines. International conference on electrical machines. OldSt. Jan Conference Center, Brugge, Belgium. Conference Record. **17.** Rogozin, G. G., Mironenko, I. A. (2000). Vliyaniye neravnomernosti vozdušnogo zazora na elektromagnitnyye parametry i perekhodnyye protsessy rotora pri otklyuchenii asinkhronnykh dvigateley. Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. Seriya: elektrotehnika i energetika, 17, 158–164.

*Надійшла (received) 25.05.2014*

**УДК 64.04:658.52**

**О. В. ГОНДЛЯХ**, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Київ;

**В. Ю. ОНОПРИЄНКО**, студент, НТУУ «КПІ», Київ;

**Р. Є. НІКІТІН**, студент, НТУУ «КПІ», Київ

## **ЕВОЛЮЦІЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ АЕС З УРАХУВАННЯМ ЗОН РУЙНУВАННЯ ВІД ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

На базі системи розрахунку на міцність АПРОКС розроблена математична модель та проведено чисельне моделювання процесів руйнування захисної оболонки АЕС в тривимірній постановці, враховуючи шари бетону з армоканатами, від впливу сейсмічних навантажень. Приведено результати чисельного моделювання зміни напружено-деформованого стану в захисній оболонці АЕС з урахуванням розриву попередньо напружених армоканатів.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, захисна оболонка АЕС, сейсмічне навантаження, армоканати, напружено-деформований стан.

**Вступ.** Надійність експлуатації АЕС, її дієздатність в нормальних, перехідних і аварійних режимах, працездатність допоміжного обладнання, що охолоджується, безпосередньо залежать від ступеня захисту АЕС в цілому. Захист виконується від усіх можливих зовнішніх факторів, таких як: землетрус, падіння літака на АЕС, ударна хвиля від вибуху, повінь, цунамі та ін. Захисна оболонка (ЗО) АЕС захищає навколишнє середовище від радіоактивного випромінювання, пожежі, вибухів які можуть виникати в наслідок аварії. Особлива увага при проектуванні контейментів приділяється питанням надійності, від чого безпосередньо залежить безпека функціонування АЕС. Це вимагає ретельного аналізу і врахування конструктивних особливостей, всебічного дослідження поведінки ЗО в аварійних ситуаціях, імовірність виникнення яких особливо збільшується при особливих динамічних впливах на споруди та обладнання станції. Напруження та деформації в оболонці в умовах аварії визначаються: внутрішнім тиском, нерівномірним полем температур при стаціонарних та аварійних режимах роботи, можливих сейсмічних впливів, як на конструкцію в цілому так і на окремі частини обладнання.

Експериментальний підхід (моделювання на маломасштабних моделях, натурні випробування на стендах) мають декілька суттєвих недоліків. По-перше контейменти АЕС та випробувальні стенди для них є унікальними і витратними

© О. В. ГОНДЛЯХ, В. Ю. ОНОПРИЄНКО, Р. Є. НІКІТІН, 2014