УДК 621.311.001.57 (063)

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

О. О. Закладний, асп. (НТУУ «КПІ»)

Рассмотрены вопросы моделирования текущей температуры асинхронного электропривода, оценки его срока службы с учетом влияния загрузки и показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: тепловая модель, температура, остаточный ресурс, классы изоляции, отклонения напряжения, несимметрия напряжений.

Розглянуто питання моделювання поточної температури асинхронного електроприводу, оцінки його залишкового ресурсу з урахуванням впливу навантаження і показників якості електроенергії.

Ключові слова: теплова модель, температура, залишковий ресурс, класи ізоляції, відхилення напруги, несиметрія напруг.

The modeling of the instant temperature of the asynchronous drive, assessment of its service life with consideration for the influence of driven load and power quality index.

Key words: thermal model, temperature, residual life, isolation classes, voltage fluctuation, voltage asymmetry.

Вступ. Асинхронні двигуни (АД), як правило, розраховані на строк служби 15…20 років без капітального ремонту за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією двигуна розуміється його робота відповідно до номінальних параметрів, вказаних у паспорті. На практиці має місце значне відхилення режимів експлуатації АД від номінальних.

На цей час понад 70 % експлуатованого парку АД складають машини, які хоч би один раз побували в капітальному ремонті [1, 2]. У переважній більшості випадків (85…95 %) відмови АД потужністю понад 5 кВт пов’язані з пошкодженням ізоляції обмоток двигуна і розподіляються таким чином: міжвиткові замикання – 93 %, пробій міжвиткової ізоляції – 2 %. Решта відмов у роботі викликана механічними пошкодженнями [3]. Таким чином, строк служби асинхронного електродвигуна визначається в основному якістю ізоляції його обмоток.

Аналіз стану проблеми. Строк служби – показник довговічності, а його прогнозування зводиться до розрахунку надійності електричної машини [4]. Треба зазначити, що головним чинником, який впливає на строк служби ізоляції, є її робоча температура.

На цей час надійність електродвигунів у всіх галузях промисловості дуже низька. Щорічно виходять з ладу і потребують ремонту до 30 % парку машин. Переважна більшість їх після ремонту повертається на підприємство і експлуатується до наступного виходу з ладу. Машина може ремонтуватися 3–4 рази, а тривалість напрацювання на відмову складає 0,5...1,5 року.

Метою роботи є розрахунок температури обмотки та оцінка залишкового ресурсу АД з урахуванням всіх нагріваючих втрат, а також показників якості електроенергії.

Викладення основного матеріалу досліджень. Найчастіше перегрівання обмоток АД виникає при загальмованому роторі (заклинюванні), обриві фази статора, відхиленні напруги мережі від нормованих значень, несиметрії живильної напруги [5].

Одним з основних методів дослідження теплових процесів у АД є метод еквівалентних теплових схем заміщення [6]. Система диференціальних рівнянь, яка описує теплові процеси в АД, має вигляд

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta\tau_1}{dt} = \dfrac{1}{C_1}\left[\Delta P_1 - A_1\Delta\tau_1 - A_{12}(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)\right]; \\ \dfrac{d\Delta\tau_2}{dt} = \dfrac{1}{C_2}\left[\Delta P_2 - A_2\Delta\tau_2 - A_{12}(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)\right], \end{cases} \quad (1)$$

де $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$ – перевищення температури міді й сталі над температурою довкілля; ΔP_1, ΔP_2 – потужність втрат енергії в міді й сталі; C_1, C_2 – теплоємність міді й сталі; A_1, A_2 – тепловіддача від міді й сталі; A_{12} – теплопередача між міддю і сталлю [7].

У практичних розрахунках найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення електродвигуна одним тілом нагрівання або диференціальним рівнянням першого порядку (рівняння теплового стану)

$$\frac{d\Delta\tau}{dt} = \frac{1}{C}\left[\Delta P - A\Delta\tau\right], \quad (2)$$

де $\Delta\tau$ – перевищення температури двигуна над температурою довкілля; t – час; ΔP – потужність втрат енергії в двигуні; C – сумарна теплоємність двигуна; A – сумарна тепловіддача.

Криві нагрівання, отримані за рівняннями (1) і (2), зображені на рис. 1.

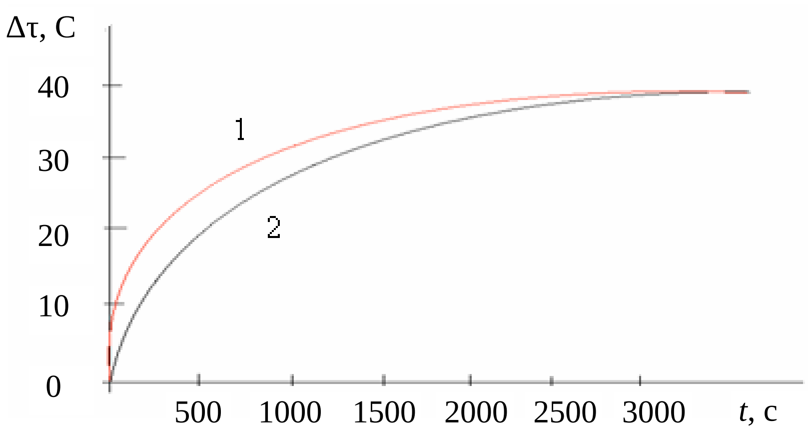

Рис. 1. Криві нагрівання АД за рівняннями (1) і (2)

За постійних втрат загальноприйняте розв’язання рівняння (2)

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{\text{уст}}(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}) + \Delta\tau_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}},$$

де $\Delta\tau_{\text{уст}}$ – усталене перевищення температури; $\Delta\tau_{\text{поч}}$ – початкове перевищення температури.

Дійсні криві нагрівання обмоток електричних машин, отримані дослідним шляхом, відрізняються від експоненти. У реальних умовах внаслідок тепловіддачі двигуна за час $T_{\text{н}}$ перевищення його температури досягне значення $\tau = 0{,}632\tau_{\text{уст}}$. Таким чином, на початку процесу нагрівання підвищення температури двигуна відбувається швидше, ніж за теоретичною кривою, і лише починаючи з $\tau = (0{,}5...0{,}6)\tau_{\text{уст}}$ до $\tau = \tau_{\text{уст}}$ дійсна крива наближається до експоненціальної.

Усталена температура обмотки АД з урахуванням можливого перевантаження спрощено визначається формулою [8]

$$\Delta\tau_{\text{уст}} = \Delta\tau_{\text{ном}} \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2, \tag{3}$$

де $\Delta\tau_{\text{ном}}$ – перевищення температури обмотки над температурою довкілля за номінального струму.

В. В. Овчаровим запропонована формула для розрахунку усталеної температури обмотки з урахуванням втрат в електродвигуні і зміни параметрів матеріалу провідника [9]

$$\Delta\tau_{\text{уст}} = \Delta\tau_{\text{ном}} \frac{a + k^2}{1 + a - \alpha\Delta\tau_{\text{ном}}(k^2 - 1)}, \tag{4}$$

де $a = \dfrac{\Delta P_{\text{с.н}}}{\Delta P_{\text{м.н.}}}$ – коефіцієнт номінальних втрат в електродвигуні; α = 0,0043 1/°С – температурний коефіцієнт опору міді; $k = \dfrac{I}{I_{\text{ном}}}$ – кратність робочого струму по відношенню до номінального. Під номінальним розуміється струм, який викликає номінальне нагрівання обмотки АД.

У різницевій формі, придатній для реалізації на цифровому пристрої, рівняння (2) виглядає так [7]:

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{C}\left(\Delta P - A\Delta\tau_{k-1}\right), \tag{5}$$

де $\Delta\tau_k$ – перевищення температури в k-й момент часу; $\Delta\tau_{k-1}$ – перевищення температури в (k-1)-ий момент часу; Δh – крок розрахунку.

У формулі (5) $\Delta P = V_1 + V_2 + \Delta P_{дн} + \Delta P_{дт}$, де V_1, V_2 – втрати в обмотках статора і ротора, $\Delta P_{дн}$, $\Delta P_{дт}$ – додані і додаткові втрати в АД. Таким чином, на відміну від моделей (3), (4), в (5) ураховуються всі нагріваючі втрати, включаючи втрати від відхилення напруги, її несиметрії і несинусоїдальності.

Зважаючи, що рівняння (5) можна переписати як

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{T_н}\left(\frac{(V_1 + V_2 + \Delta P_{дн} + \Delta P_{дт})\Delta\tau_{из}}{\Delta P_н} - \Delta\tau_{k-1}\right). \qquad (6)$$

На рис. 2 наведено результати моделювання кривих нагрівання і охолоджування за рівнянням (6), а також експериментальна крива з [10].

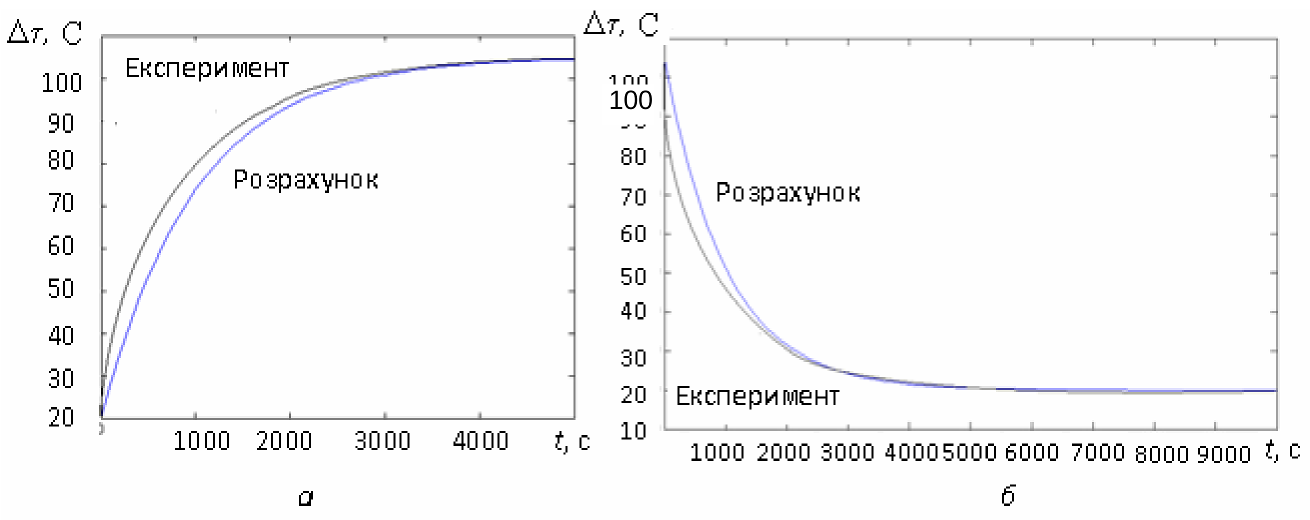

Рис. 2. Експериментальні та розрахункові криві нагрівання (*а*) та охолодження (*б*) АД

У випадках, коли двигун працює з незмінною температурою ізоляції, оцінити швидкість процесу її старіння або залишковий ресурс машини порівняно нескладно.

В результаті досліджень для ізоляції класу А було сформульовано правило «восьми градусів» (правило Монтзігера). Відповідно до цього правила підвищення температури на кожні 8 °С понад гранично припустиму скорочує строк служби вдвічі [4, 11].

Строк придатності ізоляції визначається за емпіричною формулою

$$Z = Ce^{-b\tau}, \qquad (7)$$

де C і b – сталі коефіцієнти для даного виду ізоляції, τ – температура ізоляції.

Використовуючи формулу (7), можна отримати відносне значення строку придатності ізоляції (рис. 3) при температурі, відмінній від номінальної

$$z = \frac{Z}{Z_н} = \frac{Ce^{-b\tau}}{Ce^{-b\tau_н}} = e^{-b\Delta\tau}, \qquad (8)$$

де $Z_н$ – строк придатності ізоляції при номінальній температурі.

Формула (7) є наближеною, але вона дозволяє вірно здійснити оцінку конструкцій електричних машин і режимів їх експлуатації, особливо в техніко-економічних розрахунках.

Більш строгий підхід до дослідження явища старіння ізоляції під впливом температури пов'язаний із застосуванням загальних законів кінетики хімічних реакцій.

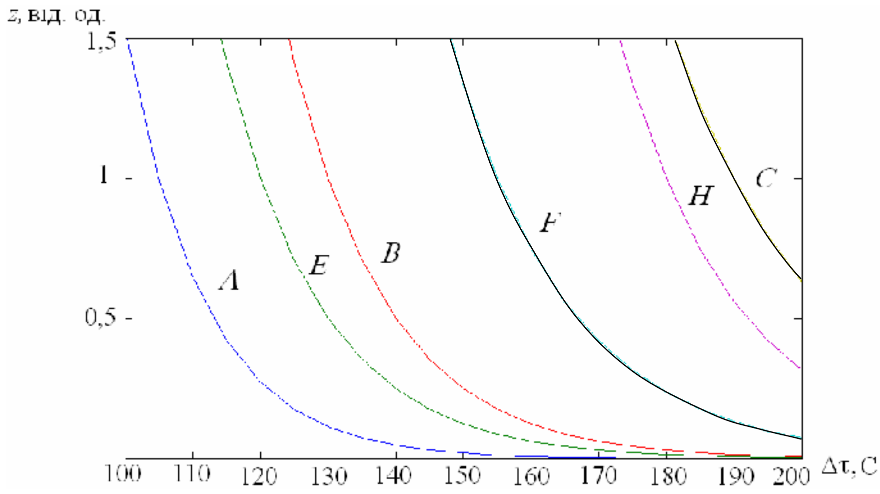

Рис. 3. Залежність відносного значення тривалості життя ізоляції від її температури для різних типів ізоляції

Так, знаючи строк придатності ізоляції Z_1 при температурі τ_1, можна визначити її строк придатності Z_2 при температурі τ_2 з рівняння

$$Z_2 = Z_1 \exp\left[-B\left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}\right)\right] .$$

Експериментальне значення B для класу ізоляції А згідно [3] складає $0{,}95 \cdot 10^{-4}$ К, для класу В – $1{,}02 \cdot 10^{-4}$ К.

Оскільки такий розрахунокураховує лише теплове старіння, а під час роботи машини ізоляція зазнає ще й електричного і механічного впливу, то можна припустити, що насправді її руйнування внаслідок пробою відбудеться значно раніше.

Істотний вплив на строк служби АД спричиняє якість напруги живлення, регламентована ГОСТ 13109-97.

При несиметрії цієї напруги відбувається зростання температури всіх вузлів АД, проте найбільших теплових навантажень зазнає лобова частина найбільш завантаженої фази статора. При несиметрії напруги 2 % строк служби АД скорочується на 10,8 %. Несиметрія напруги 4 %, так само як і зменшення її на 10 %, скорочує строк служби АД вдвічі. Опір зворотної послідовності АД в 5…8 разів менший, ніж опір прямої послідовності. Таким чином, двигуни мають фільтрувальні властивості по відношенню до струмів зворотної послідовності, тому навіть незначна несиметрія напруги (1 %) створює значну несиметрію струмів (7...9 %) в обмотках. Струми зворотної послідовності викликають додаткове нагрівання, що призводить до істотного зниження строку служби АД.

У [11] наведена формула для розрахунку температури обмоток τ_ε АД у функції несиметрії напруги

$$\tau_\varepsilon = \tau[1 + 2(\varepsilon_u\,\%)^2],$$

де τ – температура обмоток при симетричній напрузі мережі; ε_u – коефіцієнт несиметрії напруги, що дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності до номінальної.

З цього виразу видно, що при $\varepsilon_u = 3{,}5\,\%$ температура обмоток двигуна підвищується на 25 %.

На рис. 4, *а* зображена крива нагрівання для випадків: *1* – симетрична напруга; *2* – несиметрія 2 %, нормально допустима згідно ГОСТ 13109-97; *3* – несиметрія 4 %, граничне допустиме значення. На рис. 4, *б* зображена залежність строку життя для ізоляції класу А від коефіцієнта несиметрії напруги і температури ізоляції.

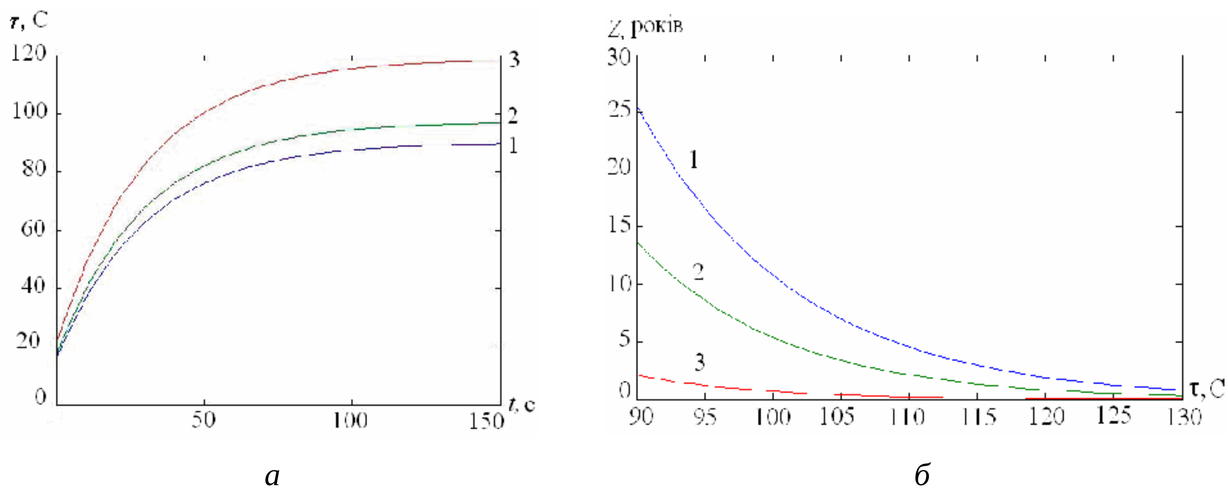

Рис. 4. Графіки кривих нагрівання (*а*) та залежності строку життя ізоляції від температури (*б*)

Якщо АД тривалий час працює на зниженій напрузі, то через прискорене зношування строк служби його зменшується (див. рис. 4). Приблизно строк служби ізоляції Z можна визначити за формулою [12]

$$Z = \frac{Z_{\text{ном}}}{R},$$

де $Z_{\text{ном}}$ – строк служби ізоляції двигуна при номінальній напрузі і навантаженні; R – коефіцієнт, залежний від значення і знаку відхилення напруги, а також від коефіцієнта завантаження двигуна:

$$R = \left(47\delta U^2 - 7{,}55\delta U + 1\right)k_з^2 \text{ при } -0{,}2 < \delta U < 0; \quad R = k_з^2 \text{ при } 0{,}2 \ge \delta U > 0,$$

де δU – відхилення напруги; $k_з$ – коефіцієнт завантаження АД. Тому з погляду нагрівання АД в даних межах негативні відхилення напруги є більш небезпечними.

На рис. 5 зображено залежності строку придатності ізоляції обмоток АД при різних коефіцієнтах завантаження і різних значеннях негативного відхилення напруги.

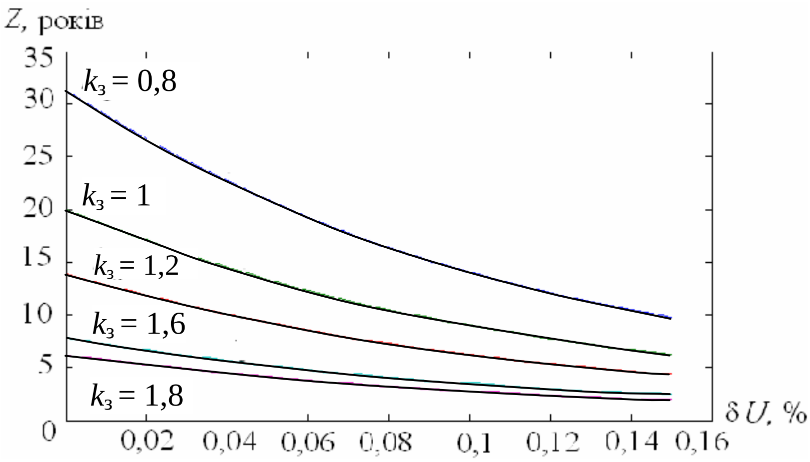

Рис. 5. Графіки залежності строку життя ізоляції від коефіцієнта завантаження та негативного відхилення напруги

При змінній у часі t температурі τ (рис. 6), тобто при навантаженні, що змінюється, строк придатності ізоляції визначається формулою

$$Z = C\int_{0}^{t} e^{-b\tau} \ . \qquad (9)$$

Поточна температура за k-ий проміжок часу визначається згідно з рівнянням (6).

На рис. 6 показано експериментально зняту криву споживаної потужності АД насосного агрегату станції другого підйому одного з українських міст та криву зміни температури.

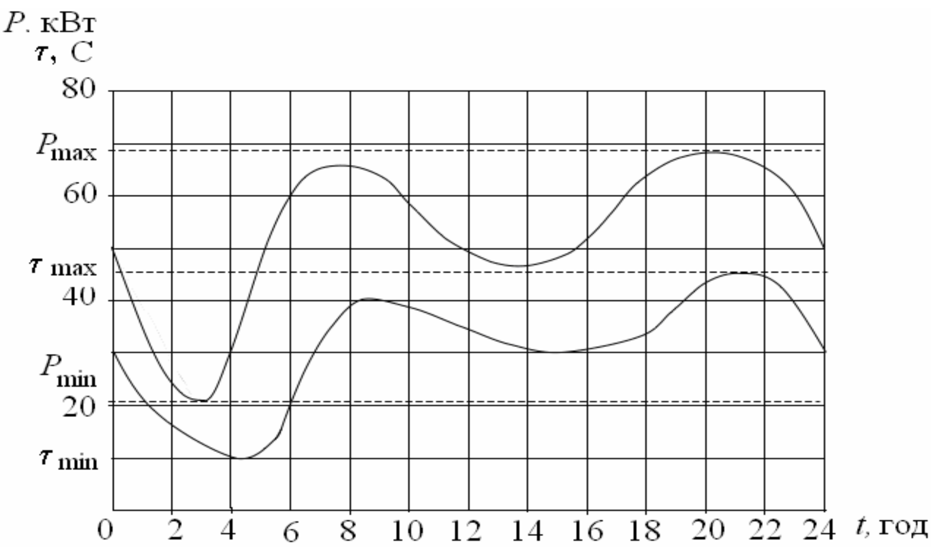

Рис. 6. Графіки зміни навантаження і кривої температури

Загальна тривалість часу t, за який слід визначати строк служби ізоляції, розбивається на ряд інтервалів Δt таким чином, щоб втрати в кожному інтервалі могли бути прийняті постійними. Далі визначається температура обмоток на кожному інтервалі, й за формулою (9) визначається строк служби за час t.

За результатами спостережень можна визначити середнє арифметичне строку служби

$$\overline{Z} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i ,$$

де n – кількість циклів, протягом яких здійснюється оцінка строку служби АД.

Знаходимо також незсунену оцінку дисперсії

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \overline{Z})^2} .$$

Визначивши значення $t_{\alpha,n-1}$ за таблицями розподілу Стьюдента, можна записати інтервальні оцінки строку служби

$$\overline{Z} - t_{\alpha,n-1}\frac{s}{\sqrt{n-1}} < Z < \overline{Z} + t_{\alpha,n-1}\frac{s}{\sqrt{n-1}} .$$

Приймаючи, згідно з [3], експонентний закон розподілу часу безвідмовної роботи АД (рис. 7), можна розрахувати ймовірність безвідмовної роботи для будь-якого розрахункового часу роботи $t_р \le Z$

$$P(Z) = \exp(-t_p / \overline{Z}) .$$

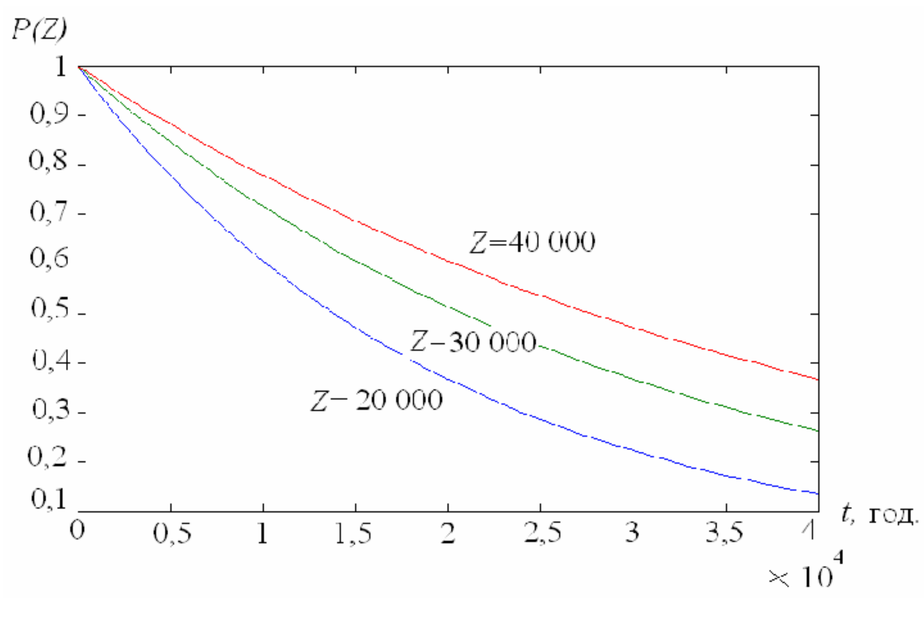

Рис. 7. Ймовірність безвідмовної роботи АД

Висновки

У наведених матеріалах розглянуто методи визначення температури обмотки АД. Запропоновано використовувати в системі моніторингу енергетичного стану АД модель вигляду (6), у якій необхідно враховувати всі нагріваючі втрати, включаючи втрати від несиметрії і несинусоїдальності напруги.

Розглянуто також вплив відхилень показників якості електроенергії на тривалість строку служби АД, наведена формула для розрахунку цього строку як в сталому режимі роботи, так і при навантаженні, яке довільно змінюється в часі.

1. *Бешта А. С.* Определение потерь в стали асинхронного двигателя по методике холостого хода / А. С. Бешта, Т. А. Желдак // Проблемы создания новых машин и технологий. – 1998. – Вып. 1. – С. 54–56.
2. *Слоним Н. М.* Испытания асинхронных двигателей / Слоним Н. М. – М., Энергия, 1980. – 80 с.
3. *Котеленец Н. Ф.* Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М., Высшая школа, 1988. – 232 с.
4. *Воробьев В. Е.* Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
5. *Ковалев А. П.* Оценка пожарной опасности электродвигателей, эксплуатирующихся на промышленных предприятиях Украины / [А. П. Ковалев, О. А. Шевченко, В. В. Якимшина, О. Г. Пинчук] // Вісник Кременчуцького ДПУ. – 2004. – Вип. 2/2004 (25). – 64 с.
6. *Бурковский А. Н.* Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения / А. Н. Бурковский, Е. Б. Ковалев, В. К. Коробов. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.
7. *Синчук О. Н.* Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О. Н. Синчук, В. В. Чумак, С. Л. Михайлов // Электротехника, 2003. – № 3. – С. 61–66.
8. *Корогодский В. И.* Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В. И. Корогодский, С. Л. Кужеков, Л. Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
9. *Овчаров В. В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В. В. Овчаров. – К.: Изд-во УСХА, 1990. – 110 с.
10. *Петров И. И.* Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И. И. Петров, А. М. Мейстель. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.
11. *Шидловский А. К.* Повышение качества энергии в электрических сетях/ А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
12. *Суднова В. В.* Качество электрической энергии / Суднова В. В. – http://www.test-electro.ru.