

**Голощанов С.С.**

Херсонська державна морська академія

**Колібанов О.К.**

Херсонська державна морська академія

## ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

*В сучасних судах широко використовуються асинхронні двигуни різного призначення і працюють в різних режимах. Для насосів і вентиляторів застосовуються електродвигуни, призначені для роботи в тривалому (S1) режимі, для якірно-швартових пристроїв – двигуни, що працюють в короткочасному (S2) режимі, для вантажно-розвантажувальних механізмів – двигуни, що працюють в повторно-короткочасному (S3) режимі. При цьому промисловістю випускаються електродвигуни цільового призначення, призначені для роботи тільки в одному із зазначених режимів. Однак на практиці часто виникає питання, які навантаження допускає двигун, спроектований, наприклад, для тривалого режиму, при експлуатації в режимах короткочасному і повторно-короткочасному. Актуальною може бути і зворотна задача: розрахунок допустимої потужності двигуна, спроектованого для короткочасного або повторно-короткочасного режиму при його використанні в тривалому режимі. У цій статті наведено спроба встановлення кількісної взаємозв'язку між зазначеними режимами і методика перерахунку режимів роботи електродвигуна одного в інший. Розрахунок режимів двигуна проводиться на підставі роботи його теплової моделі. При цьому в якості вихідних даних використовуються тільки дані каталогу: потужність, струм, к.к.д, вага, клас ізоляції, кратність максимального моменту. Розрахункова задача розділена на кілька підзадач: визначення потужності двигуна в тривалому режимі, призначеного для роботи в повторно-короткочасному режимі (завдання пряма і зворотня); розрахунок потужності двигуна в тривалому режимі роботи по відомим його параметрам для короткочасного режиму і визначення допустимої потужності для короткочасного режиму по відомим параметрам тривалого режиму з урахуванням максимально можливої перевантажувальної здатності двигуна по моменту.*

**Ключові слова:** *двигун, температура, тепловий баланс, потужність, навантаження, втрати, постійна часу нагріву.*

**Постановка задачі.** Стандартами встановлюються 10 режимів S1-S10 роботи електродвигунів, залежно від умов експлуатації. Основні їх три: S1 – тривалий, S2 – короткочасний, S3 – повторно-короткочасний. Інші 7 режимів враховують, в основному, часті пуски, гальмування, реверси, перемежований режим роботи [1].

Основним режимом двигунів, що виробляються промисловістю, є режим S1. Для експлуатації в режимах S2 і S3 випускаються електродвигуни, переважно спеціального застосування. Зокрема, для короткочасного режиму S2 випускаються електродвигуни якірно-швартових пристроїв, призначені для роботи в відносно невеликому проміжку часу. Для повторно-короткочасного режиму S3 застосовуються двигуни вантажно-розвантажувальних механізмів: лебідок, кранів тощо. І, якщо при застосуванні для зазначених режимів двигунів постійного струму в них зміцнюється колекторний вузол, то при використанні найбільш

застосовуваних в даний час асинхронних двигунів в останніх помітні відмінні конструктивні особливості не передбачаються.

**Аналіз останніх тематичних досягнень.** В даний час для аналізу теплових процесів, що відбуваються в двигуні при різних режимах навантаження в літературі розглядається питання розрахунку потужності в одному із зазначених режимів [2 С. 155, 161, 163, 3 С. 370, 377, 380] або питання перевірки двигунів по нагріву в цих режимах [4. С. 386, 395, 397].

Однак при проектуванні та (або) експлуатації двигунів часто виникає питання, як поведеться двигун, призначений для режиму роботи S1 при його використанні в режимах S2 та S3? І хоча ці питання частково вже вирішені, зокрема, застосування режиму S2 і S3 у двигуні, спроектованого для роботи в режимі S1 [5], актуальною часто є зворотне завдання, до якої потужності можна навантажувати двигун у тривалому режимі, який

спроєктований для роботи у короткочасному та повторно-короткочасних режимах  $S2$  та  $S3$ ?

**Мета досліджень.** Метою досліджень було вирішення питань кількісного взаємозв'язку режимів роботи двигуна з урахуванням його теплової моделі. При цьому як джерело інформації про параметри двигуна є лише його каталожні дані.

**Основна частина.** Найбільш просто завдання вирішується для взаємозв'язку режимів  $S1$  та  $S3$ . При цьому повторно короткочасний режим  $S3$  характеризується відносною тривалістю включення або тривалістю включення  $ПВ$ ,

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_n}, \quad ПВ = \varepsilon \cdot 100\%,$$

де  $t_p$  – час роботи,

$t_n$  – час паузи.

Скористаємося відомим співвідношенням [3, с. 385]

$$P = P_{0,25} \sqrt{(a_{0,25} + 1) \cdot \frac{0,25}{\varepsilon - a_{0,25}}}$$

де  $P$  – потужність двигуна в режимі, що відповідає дійсному режиму навантаження двигуна, який характеризується розрахунковим значенням  $ПВ$  (або  $\varepsilon$ ) двигуна за циклограмою навантаження,

$P_{0,25}$  – значення потужності двигуна при  $\varepsilon = 0,25$ ,

$a_{0,25}$  – коефіцієнт змінних втрат при навантаженні  $P_{0,25}$ ,  $a_{0,25} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{v0,25}}$ ,

$\Delta P_{\kappa}$  – загальні втрати двигуна;

$\Delta P_{v0,25}$  – змінні втрати двигуна при  $P_{0,25}$ .

Поширюючи наведений вираз на режим  $\varepsilon = 0,4$ , отримаємо

$$P = P_{0,4} \sqrt{(a_{0,4} + 1) \cdot \frac{0,4}{\varepsilon - a_{0,4}}},$$

де  $P_{0,4}$  – значення потужності двигуна при  $\varepsilon = 0,4$ ,

$a_{0,4}$  – коефіцієнт змінних втрат при навантаженні  $P_{0,4}$ ,  $a_{0,4} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{v0,4}}$ ,

$\Delta P_{v0,4}$  – змінні втрати двигуна при  $P_{0,4}$ .

Без урахування постійних втрат формула набуде вигляду

$$P = P_{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon_{ном}}{\varepsilon}},$$

де  $\varepsilon_{ном} = 0,4$  – нормативне значення  $\varepsilon$  по каталогу  $P_t = P_{0,4}$  – значення потужності двигуна, що відповідає  $\varepsilon_{ном}$ .

Приблизне значення потужності двигуна в тривалому режимі роботи за даними каталогу для двигуна, призначеного для роботи в повторно-короткочасному режимі без урахування постійних втрат, можна визначити, прийнявши  $\varepsilon = 100\%$ :

$$P = P_{\varepsilon} \sqrt{\varepsilon_{ном}},$$

що при  $\varepsilon_{ном} = 0,4$  дає  $P \approx 0,6 P_{\varepsilon}$ .

Слід зазначити, що наведена залежність носить досить наближений характер, проте вона все ж таки дозволяє орієнтовно визначити потужність двигуна при тривалому навантаженні за відомою  $P_{\varepsilon}$  і  $\varepsilon_{ном}$ . Аналогічно можна вирішити обернену задачу: для двигуна, призначеного для роботи у тривалому режимі, визначити, яку потужність він зможе віддавати при його використанні із заданим значенням  $\varepsilon$ .

Дещо складніше ситуація зі зв'язком режимів  $S1$  та  $S2$ .

Для з'ясування зв'язку режимів  $S1$  та  $S2$  необхідно на додаток до даних каталогу знати загальну масу двигуна  $M_{\delta\delta}$  та його клас ізоляції.

Припустимо, що потрібно розрахувати потужність двигуна в довготривалому режимі роботи  $S1$  за відомими параметрами для короткочасного режиму роботи  $S2$ .

По масі двигуна можна визначити його загальну теплоємність  $C$  як

$$C = c \cdot M_{\delta\delta},$$

де  $c = 490$  Дж/кг – питома теплоємність сталі за нормальної температури  $400^{\circ}\text{K}$ .

При цьому вважаємо, що маса двигуна визначається в основному масою активної та конструкційної сталі.

За класом ізоляції можна приблизно визначити середню максимально можливу температуру двигуна. Так, у двигунах морського виконання використовується, в основному, клас ізоляції  $H$  з максимальною температурою  $\tau_{iz} = 180^{\circ}$ . Враховуючи, що окремі елементи конструкції двигуна, зокрема обмотки, можуть нагріватися дещо більше, визначаємо середню температуру  $\tau_{сер}$  двигуна як

$$\tau_{сер} = \tau_{iz} - 30^{\circ}$$

де  $30^{\circ}$  – запас на перегрів окремих частин двигуна.

Заданою максимальною температурою доквілля  $40^{\circ}\text{C}$ . Тоді граничне значення перегріву  $\tau_{ep}$  двигуна дорівнюватиме

$$\tau_{ep} = \tau_{сер} - 40^{\circ},$$

що для класу ізоляції  $H$  складе

$$\tau_{ep} = 180 - 30 - 40 = 110^{\circ}\text{C}.$$

По к.к.д. двигуна та його потужності визначаються його втрати як

$$\Sigma P = P_2 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right),$$

де  $P_2$  – потужність на валу двигуна.

При розрахованих втратах номінального режиму та вказаному перегріві тепловіддача складає

$$A = \frac{\Sigma P}{\tau_y} \text{ Вт}/^{\circ}\text{C}, \quad (1)$$

де  $\tau_y$  – значення температури двигуна, що встановилося в режимі *S1*

Постійна часу нагріву визначиться як

$$T = \frac{C}{A} \text{ с.} \quad (2)$$

Сумарні втрати  $\Sigma P$  поділяємо на постійні  $P_{\text{пост}}$  (не залежні від навантаження) і змінні  $P_{\text{зм}}$  (залежні від навантаження). До постійних втрат, перш за все, слід віднести втрати у сталі, до змінних – втрати в обмотках двигуна.

Тоді коефіцієнт змінних втрат  $a_1$  при номінальному навантаженні визначиться як

$$a_1 = \frac{\Sigma P}{P_{\text{зм}}}$$

Постійні втрати  $P_{\text{пост}}$  будуть дорівнювати

$$P_{\text{пост}} = \Sigma P - \frac{\Sigma P}{a_1} = \Sigma P \left( 1 - \frac{1}{a_1} \right)$$

Якщо при короткочасному режимі роботи основна складова втрат двигуна визначається втратами в обмотках, постійними втратами у першому наближенні можна знехтувати.

У разі відсутності даних про співвідношення постійних та змінних втрат у номінальному режимі, враховуючи, що к.к.д двигуна близький до свого максимального значення при приблизно 80% навантаженні, можна прийняти, що в цьому режимі змінні втрати дорівнюють постійним, тобто

$$P_{\text{зм}} = P_{\text{пост}}$$

Враховуючи, що при 80% навантаженні струм двигуна також приблизно дорівнює 80% від номінального, втрати в обмотках дорівнюватимуть  $0,8^2 = 0,64$  від номінальних і дорівнюватимуть постійним втратам. Тоді останні в номінальному режимі складуть приблизно 1/3 від загальних втрат двигуна, тобто можна вважати, що в номінальному режимі

$$P_{\text{зм}} \approx 2P_{\text{пост}} \approx \frac{2}{3} \Sigma P \quad (3)$$

Очевидно, що в цьому випадку  $a_1 \approx 1,5$ .

З урахуванням (1) і (2) маємо

$$T = \frac{C \tau_y}{\Sigma P}$$

Враховуючи, що в двигуні в режимі *S2* його робоча температура обмежена параметром  $\tau_{ep}$ , рівняння теплового балансу набуде вигляду

$$\tau_{ep} = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t \cdot \Sigma P}{C \tau_y}} \right)$$

Після перетворень одержимо

$$\ln \left( 1 - \frac{\tau_{ep}}{\tau_y} \right) = -\frac{t \cdot \Sigma P}{C \tau_y}$$

Дане рівняння найпростіше вирішити графічно, побудувавши криві  $\ln \left( 1 - \frac{\tau_{ep}}{\tau_y} \right) = f(\tau_y)$  і  $-\frac{t \cdot \Sigma P}{C \tau_y} = f(\tau_y)$ , точка перетину яких дасть значення  $\tau_y$  – значення температури, до якої нагрівся би двигун, призначений для роботи з номінальним навантаженням в короткочасному режимі *S2*, якщо він використовувався би в тривалому режимі *S1*. Очевидно, що в цьому випадку  $\tau_y > \tau_{ep}$ .

Щоб вийти на режим  $\tau_y = \tau_{ep}$ , сумарні втрати повинні зменшитися в  $k_t = \frac{\tau_y}{\tau_{ep}}$  разів за рахунок зменшення лише змінних втрат або з урахуванням співвідношення (3) змінні втрати повинні зменшитися до значення

$$P_{\text{неп}}^1 = \frac{\Sigma P}{k_t} - \Sigma P \left( 1 - \frac{1}{a_1} \right) = \Sigma P \left( \frac{\tau_{ep}}{\tau_y} - 1 + \frac{1}{a_1} \right)$$

Відповідно струм (і потужність) повинні зменшитися в

$$k_I = \sqrt{\frac{P_{\text{зм}}}{P_{\text{неп}}^1}} = \sqrt{\frac{1}{a_1 \left( \frac{\tau_{ep}}{\tau_y} - 1 + \frac{1}{a_1} \right)}} \text{ раз,}$$

що при  $a_1 = 1,5$  складе

$$k_I = \frac{0,82}{\sqrt{\frac{\tau_{ep}}{\tau_y} - \frac{1}{3}}}$$

З отриманого виразу видно, що при  $\tau_{ep} < 3\tau_y$  тривалий режим двигуна неможливий навіть на холостому ходу, тобто тільки одних втрат у сталі може бути достатньо для того, щоб порушити тепловий режим двигуна при тривалій роботі. Це може статися, якщо час роботи для режиму *S2* невеликий (обчислюється хвилинами).

Слід зазначити, що при проектуванні наведений випадок використання двигуна, призначеного для роботи в режимі *S2*, в довготривалому режимі *S1* не є типовим, тому що номенклатура двигунів, призначених для роботи в довгостроковому режимі, незрівнянно більше номенклатури двигунів для короткочасного режиму. Однак слід пам'ятати, що при експлуатації за малого дозволеного часу для режиму *S2* використання двигуна в довготривалому режимі навіть при малому навантаженні може порушити його тепловий режим.

*Розрахунок теплових параметрів двигуна у режимі S2 за відомими параметрами режиму S1.*

Припустимо, що потрібно розрахувати час  $t$ , протягом якого двигун, призначений для роботи в тривалому режимі *S1* потужністю  $P_{\text{ном}}$  може розвивати задану потужність  $P_{\text{макс}}$  в короткочасному режимі *S2*.

Якщо це асинхронний двигун, насамперед потрібно зіставити задану потужність із мак-

симально можливими параметрами двигуна, зокрема, із кратністю максимального моменту

$$k_m = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}},$$

де  $M_{\max}$  і  $M_{\text{ном}}$  – максимальний та номінальний моменти двигуна відповідно, що відповідають максимальній та номінальній потужності.

У разі, якщо задане перевантаження перевищує зазначену кратність по моменту (а, отже, і потужності), двигун просто може «не потягнути», і робота у вказаному режимі буде неможлива не тільки через теплові обмеження. Якщо задане навантаження не перевищує граничних параметрів двигуна, час, протягом якого двигун може розвивати задану потужність, можна визначити наступним чином.

Через коефіцієнт змінних втрат  $a_1$  постійні втрати у двигуні становитимуть

$$P_{\text{пост}} = \Sigma P - P_{\text{зм}} = P_{\text{зм}} (a_1 - 1).$$

При заданому навантаженні (за потужністю, моментом або струмом), яке по відношенню до номінального навантаження визначиться як  $\frac{P}{P_{\text{ном}}}$ , струм в обмотках зросте в зазначене число разів, втрати в міді збільшаться в  $\left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right)^2$  разів, сумарні втрати в двигуні зростуть до значення

$$\Sigma P^1 = P_{\text{пост}} + P_{\text{зм}} \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right)^2 = P_{\text{зм}} \left[ a_1 - 1 + \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right)^2 \right]$$

Нове значення перегріву, що встановилося, складе

$$\tau_y^1 = \frac{\Sigma P^1}{A} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тоді рівняння теплового балансу набуде вигляду

$$\tau_{\text{сп}} = \tau_y^1 (1 - e^{-t/T}), \quad (4)$$

рішення якого щодо  $t$  дає:

$$t = -T \ln \left( 1 - \frac{\tau_{\text{сп}}}{\tau_y^1} \right).$$

Зворотне завдання можна сформулювати так: яку потужність може віддати двигун протягом заданого часу  $t$ ?

З рівняння теплового балансу (4) для  $t$ -хвилинної потужності, допустимому перегріву  $\tau$  та постійній часу нагрівання  $T$  випливає:

$$\tau_y^1 = \frac{\tau_{\text{сп}}}{1 - e^{-t/T}}.$$

Щоб досягти такої температури в сталому режимі, сумарні втрати повинні збільшитися і скласти

$$\Sigma P^{11} = \tau_y^1 \cdot A.$$

Змінні втрати при цьому повинні збільшитися в  $k = \frac{\Sigma P^{11} - P_{\text{пост}}}{P_{\text{зм}}}$  разів.

Струм двигуна, а отже, момент і потужність повинні зрости в  $\sqrt{k}$  разів, а  $t$ -хвилинна потужність  $P_t$  і момент  $M_t$  складуть:

$$P_t = P_2 \cdot \sqrt{k}, \quad M_t = M_{\text{ном}} \cdot \sqrt{k}.$$

Проте, як і попередньому випадку, розраховане значення  $P_t$  має місце, коли момент і потужність двигуна не обмежені максимальними параметрами його, зокрема, кратністю максимального моменту.

Якщо ж розрахований за параметром  $k$  перевантажувальний момент перевищує кратність моменту  $k_m$ , то за розрахунковий максимально можливий момент слід брати  $M_{\max}$  двигуна, взятий з каталогу. Крім того, слід враховувати можливе зниження  $M_{\max}$  при дозволеному стандартом 10% зниженні напруги живлення. Тому реальне обмеження за максимальним моментом (і потужністю) становить

$$0,9^2 M_{\max} \approx 0,8 M_{\max}.$$

**Висновки.** Наведені аналітичні зв'язки основних режимів роботи на основі теплової моделі асинхронного електропривода дозволяють оперативно вирішити питання взаємозаміни двигунів, а наведену методику розрахунку можна використовувати не тільки для основних S1-S3, але й для усіх S1-S10 режимів роботи.

#### Список літератури:

1. Онлайн-журнал «Толковый электрик». Режимы работы электродвигателей. URL: <http://electric-tolk.ru/rezhimy-raboty-elektrodvigatelj/> (дата звернення: 09.03.23).
2. Кацман М.М. Электрический привод. Москва, 2011. 384 с.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. Москва, 1981. 576 с.
4. Красовский А.Б. Основы электропривода. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2015. 405 с.
5. Школа для электрика. Режимы работы электродвигателей. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/365-rezhimy-raboty-jelektrodvigatelj.html> (дата звернення: 09.03.23).

#### Gouoschapov S.S., Kolebanov O.K. INTERCONNECTION OF THE LOADING MODES OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

*In modern ships, asynchronous motors for various purposes and operating in various modes are widely used. For pumps and fans, electric motors are used that are designed to operate in a continuous (S1) mode, for anchor and mooring devices – motors operating in a short-term (S2) mode, for loading and unloading mechanisms – motors operating in a repeated-short-term (S3) mode. At the same time, the industry produces special-purpose electric motors designed to operate only in one of the specified modes. However, in practice, the question often*

*arises as to what loads the engine is designed, for example, for continuous operation, during operation in short-term and intermittent-short-term modes. The inverse problem may also be relevant: calculating the permissible power of an engine designed for a short-term or intermittent mode when used in a continuous mode. In this article, an attempt is made to establish a quantitative relationship between the indicated modes and a technique for recalculating the operating modes of an electric motor from one to another. The calculation of engine modes is based on the operation of its thermal model. In this case, only the catalog data are used as initial data: power, current, efficiency, weight, insulation class, for asynchronous motors the multiplicity of the maximum torque. The computational problem is subdivided into several subtasks: determination of the engine power in continuous mode, intended for operation in intermittent mode (direct and inverse problems); calculation of engine power in continuous operation according to its known parameters for short-term operation and determination of permissible power for short-term operation according to known parameters of continuous operation, taking into account the maximum possible overload capacity of the motor by torque.*

**Key words:** *engine, temperature, heat balance, power, load, loss, constant heating time.*