

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.318

О.С. Бешта¹, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.,
В.С. Федорейко², д-р техн. наук, проф.,
О.В. Балахонцев¹, канд. техн. наук, доц.,
С.С. Худолій¹

1 – Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: sergeich@ukr.net

2 – Тернопільський національний педагогічний університет, м. Тернопіль, Україна

ЗАЛЕЖНІСТЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВІД ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО РЕЖИМУ

O.S. Beshta¹, Corresponding Member of the National Academy of Science of Ukraine, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.S. Fedoreiko², Dr. Sci. (Tech.), Professor,
O.V. Balakhontsev¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, **S.S. Khudolii¹**

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: sergeich@ukr.net

2 – Ternopil National Pedagogical University, Ternopil, Ukraine

DEPENDENCE OF ELECTRIC DRIVE'S THERMAL STATE ON ITS OPERATION MODE

Мета. Встановити залежності між параметрами робочого циклу та тепловим станом асинхронного двигуна й перетворювача в частотно-керованому електроприводі.

Методика. Під час проведення наукових досліджень використовувалися методи опосередкованого визначення температур у вузлах частотно-керованого електропривода. Для оцінки теплового стану системи частотно-керованого електропривода та встановлення шуканих залежностей використовувалися динамічні теплові моделі системи електропривода. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження залежностей змінних стану теплової моделі від режимів роботи електропривода з урахуванням різних систем охолодження двигуна, а також закономірностей, що визначають взаємозв'язок між тривалістю роботи системи частотно-керованого електропривода та його навантажувальною здатністю.

Результати. Отримані залежності максимальної температури конструктивних частин від тривалості включення. Встановлено характер даних залежностей: для двигуна із самоохолодженням залежність має параболічний характер, для двигуна з незалежним охолодженням – лінійний. Визначені закономірності зміни максимальної температури конструктивних частин від тривалості включення для двигуна з різними системами охолодження дозволяють сформулювати закони керування частотно-керованим електроприводом за принципом максимальної перевантажувальної здатності відповідно до системи охолодження двигунів.

Наукова новизна. Уперше отримані залежності параметрів робочого циклу (навантаження, тривалість включення) від параметрів теплової моделі та навантажувальної здатності регульованого асинхронного електропривода.

Практична значимість. Отримані залежності можуть використовуватися на етапі попереднього вибору потужності та системи вентиляції асинхронного електродвигуна й частотного перетворювача для механізмів з повторно-короткочасним режимом роботи.

Ключові слова: частотно-керований електропривод, тепла модель електропривода, допустиме перевантаження електропривода, граничні криві

Постановка проблеми. Однією з головних задач при проектуванні системи частотно-керованого асинхронного електропривода (ЧКАЕ) є коректний вибір електродвигуна та перетворювача за навантажуваль-

ною здатністю. Компоненти обираються за двома головними критеріями: 1) забезпечення необхідного зусилля на валу робочої машини; 2) здатність виконати роботу відповідно до навантажувальної діаграми механізму без перевищення температури ізоляції електричного двигуна та силових ключів перетворювача. Перевищення допустимого рівня температури нагріву

призводить до передчасного руйнування ізоляції та скорочення строку експлуатації двигуна. Поява термічних дефектів пов'язана з порушенням нормального теплообміну в електричній машині, основними причинами виникнення термічних дефектів є зміна режимів роботи й параметрів живлення. Практика свідчить про гострий характер проблеми оцінки теплової навантажувальної здатності асинхронного двигуна (АД) та системи ЧКАЕ в цілому [1]. Невірна її оцінка призводить до некоректного вибору електродвигуна та неефективної експлуатації системи ЧКАЕ, а також до зниження надійності промислових механізмів.

Виділення невирішеної проблеми. Відомо, що нагрівання обмоток залежить від величини навантаження на валу електричної машини, величини втрат у перехідних режимах, теплових характеристик матеріалів частин електричної машини та способу її охолодження. Головною задачею теплових розрахунків електричних машин є визначення величин температур активних частин для перевірки відповідності діючим нормам. Розрахунок температурного стану електричної машини здійснюється для режиму роботи з номінальним навантаженням при сталому нагріві. При наявності навантажувальних діаграм роботи виробничих механізмів можливо побудувати часові графіки температури двигуна й порівняти максимальне значення температури в електричній машині з допустимим. Для цього використовують спрощені методи еквівалентизації навантажувальної діаграми. Серед яких найбільш точним вважається метод середніх (еквівалентних) втрат. Метод оснований на припущенні, що температура двигуна пропорційна середньому значенню втрат

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} \int \frac{\Delta P}{A} \cdot dt = \frac{\Delta P_{\text{ср}}}{A}, \quad (1)$$

де $\tau_{\text{ср}}$ – середнє усталене перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища; ΔP – втрати в циклі; $T_{\text{ц}}$ – час циклу; $\Delta P_{\text{ср}}$ – середні втрати за цикл; A – коефіцієнт тепловіддачі двигуна.

Отже, за даними про втрати на кожній ділянці діаграми навантаження розраховують середнє їх значення. Умовою коректного вибору двигуна вважається нерівність $\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}$, де $\Delta P_{\text{ном}}$ – втрати в електродвигуні при номінальному навантаженні та номінальній швидкості обертання. Номінальні втрати розраховуються за формулою $\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$, де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний ККД двигуна, $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна.

Недоліком такого підходу в контексті інженерних розрахунків є необхідність визначення втрат на кожній ділянці робочої діаграми. Відмітимо також, що за цим підходом не враховуються локальні перегріву ізоляції. Крім того, такий підхід є непрацездатним у регульованому електроприводі із двигунами із самовентиляцією, оскільки при цьому порушується умова (1).

На сьогоднішній день для оцінки навантажувальної здатності електропривода користуються методами ек-

вівалентного моменту ($M_{\text{екв}}$) та струму ($I_{\text{екв}}$) [2]. Основним припущенням при застосуванні цих методів є розподіл втрат в електродвигуні на постійні та змінні

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пост}} + P_{\text{зм}}.$$

До постійних втрат, зазвичай, відносять втрати у сталі та на тертя, до змінних, тобто тих, що залежать від навантаження – електричні втрати в обмотках статора й ротора. Умовою розрахунку еквівалентного навантаження є [2]

$$\Delta P_{\text{пост}} + I_{\text{екв}}^2 R = \Delta P_{\text{пост}} + \frac{I_1^2 \Delta t_1 + I_2^2 \Delta t_2 + I_3^2 \Delta t_3 + \dots}{T_{\text{ц}}}.$$

Звідки можливо визначити величину еквівалентного навантаження

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \sum_k (M_k^2 \cdot \Delta t_k)}; \quad I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \sum_k (I_k^2 \cdot \Delta t_k)};$$

$$P_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \sum_k (P_k^2 \cdot \Delta t_k)},$$

де $P_{\text{екв}}$ – еквівалентне значення потужності; M_k , I_k , P_k – момент, струм і потужність, що двигун розвиває на ділянці Δt_k за час циклу $T_{\text{ц}}$. Оцінка допустимого перевантаження за цими методами здійснюється шляхом порівняння номінальних даних двигуна та розрахункових значень еквівалентного навантаження. При цьому вважається, що температура двигуна не перевищить нормоване значення, якщо еквівалентні значення не будуть перевищувати номінальні параметри.

Метод еквівалентної потужності може бути використаний лише для механізмів з постійною швидкістю обертання, що приблизно дорівнює номінальній.

Цими методами користуються майже в усіх випадках, між тим, жоден з цих методів не може бути застосований для систем частотно-керованого асинхронного електропривода із самовентиляцією. Це, поперше, пов'язано зі змінами умов охолодження під час регулювання швидкості, та, по-друге, з несталістю „постійних“ втрат, тобто втрат у сталі.

Це пов'язано з тим, що у випадку частотно-керованого електропривода порушується пропорційність між еквівалентним моментом, струмом або потужністю та середнім значенням втрат. Ураховуючи також зміну умов охолодження при регулюванні частоти обертання, ще більше порушується пропорційність еквівалентних величин середньому значенню температури електродвигуна в циклі

$$\tau_{\text{ср}} \neq I_{\text{екв}} \neq M_{\text{екв}} \neq P_{\text{екв}}.$$

Отже, жоден із спрощених методів розрахунку еквівалентного навантаження не є працездатним для задач оцінки навантажувальної здатності частотно-керованого асинхронного електропривода.

Формулювання мети роботи. Аналіз практики експлуатації асинхронного електропривода виявив гостру проблему неефективної роботи та великої кількості відмов. Ця проблема обумовлена неадекватною оцінкою навантажувальної здатності асинхронного двигуна та перетворювача в задачах проектування, захисту й керування електроприводом.

Традиційні методи вибору двигуна за потужністю, а також методи захисту від теплового перевантаження мають низьку ефективність, а у випадку частотно-керованого електропривода взагалі є непрацездатними. Для підвищення ефективності експлуатації асинхронного електропривода та скорочення кількості відмов необхідно встановити залежності між параметрами робочого циклу й тепловим станом асинхронного двигуна та перетворювача в частотно-керованому електроприводі.

Виклад основного матеріалу. Визначення реальної теплової навантажувальної здатності системи ЧКАЕ можливе при наявності даних режиму роботи та величини поточних втрат. Для регульованого електропривода змінного струму з частотним керуванням необхідно враховувати нестационарність складових втрат та характеристики режимів роботи [1]. Згідно з діючими стандартами розрізняють режими роботи (навантажувальні діаграми), що відображають характеристики нагріву та охолодження електричних двигунів з урахуванням часових факторів. Зведення реальної навантажувальної діаграми до стандартної виконується в задачах розрахунку необхідної потужності й вибору електродвигуна, налагодження систем захисту.

Для вибору електродвигуна за потужністю розроблені методи зведення реальної навантажувальної діаграми до стандартної [2]. Усі методи основані на визначенні еквівалентного теплового стану двигуна. Ключовим аспектом нагріву є теплові втрати, що залежать від параметрів робочого режиму та параметрів електропривода. Розрахунок температурного стану електричної машини здійснюється для режиму роботи з номінальним навантаженням при сталому нагріві. При наявності навантажувальних діаграм роботи виробничих механізмів можливо побудувати часові графіки температури нагріву двигуна й порівняння максимального значення температури з допустимим.

У класичній теорії електропривода вважається, що найбільш точним методом прогнозу теплового стану електродвигуна є безпосереднє вирішення рівнянь нагріву та охолодження. У процесі експлуатації електропривода можливі режими роботи, що не нормовані стандартами [1]. Для регульованого електропривода змінного струму характерним є режим із швидкозмінним навантаженням. Цей режим визначається періодичними перевантаженнями з поступовим переходом до зони номінальних навантажень або нижчих за номінал. У випадках, коли електричний двигун працює у тривалому режимі, але зі змінним навантаженням, спостерігається нестационарний (перехідний) тепловий процес, що характеризується нестационарністю складових у структурі теплових втрат як наслідок того, що для різних інтервалів часу вини-

кають різні втрати потужності (енергії), що призводять до різних теплових втрат.

Електродвигун при нестационарному навантаженні характеризується нерівномірним нагрівом окремих частин електричної машини. Унаслідок теплової інерції двигуна коливання температури у вузлах мають менший розмах, тому при достатньо малому періоді зміни навантаження такий режим можна розглядати як довготривалий з практично сталим навантаженням. Але у випадках, коли асинхронний двигун постійно знаходиться в перехідному режимі, коливання температури значно зростають. Двигун, який працює з навантаженням, що менше за номінальне, може перегріватися за рахунок частих пусків. Перевантаження електродвигуна з періодичним збільшенням моменту на валу супроводжуються короткочасними викидами струму. У випадку невизначеного робочого циклу проблеми оцінки навантажувальної здатності ще більше загострюються. Для врахування впливу параметрів живлення електропривода, способів охолодження та параметрів робочого режиму на нагрівання електропривода необхідно встановити відповідні залежності. Для цього використані способи та методика опосередкованого контролю теплового стану електропривода змінного струму, що представлені в роботі [1].

За допомогою розроблених теплових моделей було отримане матричне рівняння, що відображає залежність температур у вузлах електромеханічної системи від параметрів робочого циклу: величини перевантаження, тривалості навантаження та пауз [1]. Також у цьому рівнянні враховується величина швидкості в режимах навантаження й паузи, що визначає інтенсивність тепловіддачі в навколишнє середовище. Шляхом математичного моделювання вдалося отримати дані залежності та встановити характер їх зміни (рис. 1). При повторно-короткочасному режимі роботи, коли час циклу не перевищує чотирьох сталих часу навантаження ($4 T_H$), залежність максимальної температури конструктивних частин від тривалості включення (TB) для двигуна із самоохолодженням має параболічний характер, для двигуна із незалежним охолодженням – лінійний:

$$\max[T(TB)] \sim TB^{\frac{1}{2}} \text{ (самоохолодження);}$$

$$\max[T(TB)] \sim TB^1 \text{ (примусове охолодження).}$$

Отриману залежність можна використати іншим чином – для пошуку допустимого перевантаження k_m на ділянці $t_{наг}$ такої величини, за якої не трапляється перевищення температури статора АД (рис. 2). Ця величина є функцією TB та часу циклу. Наявність паузи в циклі роботи забезпечує можливість перевантаження двигуна.

Величина допустимого перевантаження залежить від часу циклу, тривалості вмикання та режиму охолодження двигуна під час паузи. Наприклад, коли час циклу дорівнює $2 \cdot T_H$, при $TB = 40\%$, допустиме навантаження двигуна із самоохолодженням дорівнює 160% номінального, для двигуна із примусовим охолодженням – 185% .

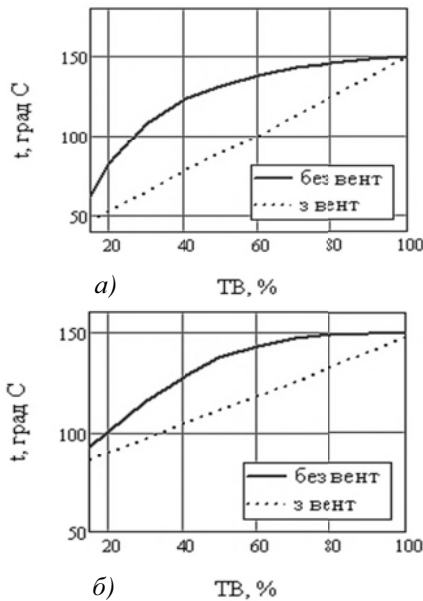


Рис. 1. Максимальна температура в обмотці статора при різних величинах $T_{циклу}$: а) час циклу = $1 \cdot T_H$ (10 хв); б) час циклу = $4 \cdot T_H$ (40 хв)

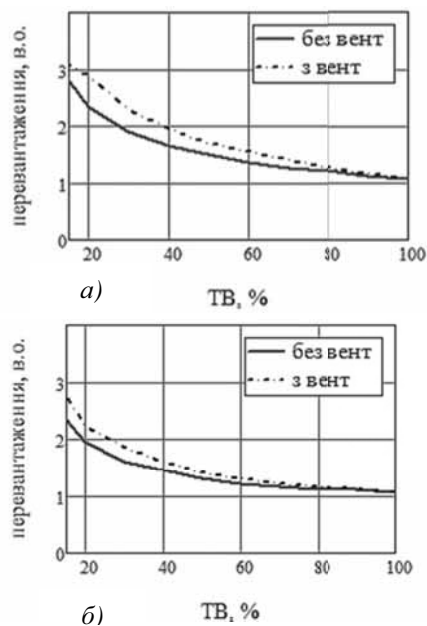


Рис.2. Допустиме перевантаження в залежності від тривалості вмикання при різних величинах $T_{циклу}$: а) час циклу = $1 \cdot T_H$ (10 хв); б) час циклу = $4 \cdot T_H$ (40 хв)

Залежність перевантажувальної здатності від ТВ для двигунів як із самоохолодженням, так і з примусовим охолодженням має параболічний характер. Тобто, для попереднього нормування еквівалентного моменту до каталожного значення можна використовувати традиційну формулу [2]

$$M_{кат} = M_{екв} \sqrt{\frac{TB_{дійсн}}{TB_{кат}}}$$

Встановлення незалежного вентилятора охолодження електродвигуна забезпечує додатковий запас за перевантажувальною здатністю (моментом). Величина додатково допустимого навантаження (моменту) залежить лінійно від тривалості включення та зменшується зі збільшенням часу циклу.

Наведений підхід дозволяє інженерам оцінювати доцільність встановлення вентилятора примусового охолодження електродвигуна для різних технологічних режимів роботи. На етапі попереднього конфігурування системи електропривода це допомагає зіставити техніко-економічні показники двох варіантів – вентилятора або двигуна із самоохолодженням, але більшої потужності.

Для попередження виходу електродвигуна з ладу, необхідно адекватно налагодити систему теплового захисту. Система захисту повинна вчасно реагувати на перевантаження, не допускаючи перевищення допустимої температури ізоляції статора, але й також виключати хибне спрацювання, коли температура знаходиться в межах допустимих значень. „Перестрахування“ в налагодженій системі захисту призводить до зайвих відключень із зупинкою технологічного процесу та відповідних витрат.

Для оцінки залежності сумарних втрат від швидкості прийнято, що напруга (U) і частота (f) АД визначаються лінійною вольт-частотною характеристикою. Такий вид характеристики відповідає найбільш поширеному для загальнопромислових механізмів закону керування $U/f = const$.

При зниженні швидкості обертання знижуються сумарні втрати, що гріють та погіршують умови охолодження. При зниженні швидкості (n) АД навантажувальна здатність змінюється неоднозначним чином. У результаті сумарні втрати залежать від перевантаження k_m і частоти обертання n так, як це показано на рис. 3.

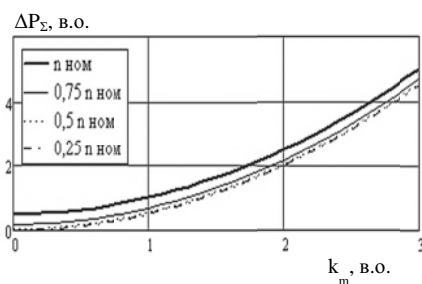


Рис. 3. Залежність сумарних втрат від перевантаження: k_m – коефіцієнт перевантаження; ΔP_{Σ} – сумарні втрати

Крива, представлена на рис.4, побудована у відносних одиницях, відображає час допустимої роботи з перевантаженням при регулюванні швидкості, масштабований за сталою часу нагріву двигуна.

Представлені результати свідчать про складну залежність між навантажувальною здатністю електропривода з частотним керуванням та його режимом роботи й інтенсивністю охолодження. При зниженні швидкості на 25%, співвідношення результуючих втрат та інтен-

сивності охолодження забезпечує збільшення навантажувальної здатності привода. Допустимий тривалий момент зростає на 7%. При перевантаженні до 1,5 номінального значення, допустимий час роботи привода довший, ніж при номінальній швидкості.

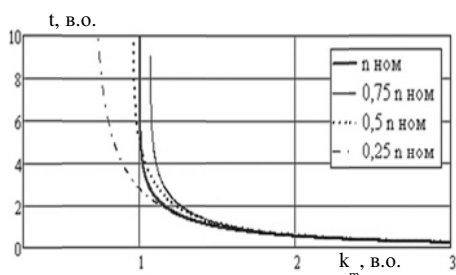


Рис. 4. Залежність допустимого часу роботи електродвигунів із самовентиляцією від перевантаження при різних швидкостях: k_m – коефіцієнт перевантаження; t – час

При швидкостях, нижчих за 0,75 номінальної швидкості, допустимий час роботи зменшується у всьому діапазоні навантажень.

Відмітимо, що представлений підхід може бути також застосований для розрахунку допустимого навантаження для тривалого режиму роботи з різними швидкостями. Зниження допустимого тривалого навантаження при зменшенні швидкості обертання двигуна повинно бути враховане під час вибору електродвигуна та перетворювача.

Висновки. Визначені закономірності зміни максимальної температури конструктивних частин від ТВ для двигуна з різними системами охолодження, що дозволяють сформулювати закони керування частотно-керованим електроприводом за принципом максимальної перевантажувальної здатності відповідно до системи охолодження двигунів.

Отримані залежності можуть бути використані для вирішення таких задач:

- попередній вибір електродвигуна та перетворювача для механізму повторно-короткочасного режиму роботи;
- техніко-економічне обґрунтування доцільності встановлення вентилятора для примусового охолодження;
- розрахунок такого циклу роботи, в якому електромеханічна система досягає максимальної температури, але не перевищує її.

Список літератури / References

1. Спостерігач теплового стану асинхронного електропривода в контексті стратегії максимального використання його навантажувальної здатності / Є. Нолле, Н. Нойбергер, О.С. Бешта [та ін.] // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 20–24.

Nolle, Ye., Neuberger, N., Beshta, O.S., Khudolii, S.S., and Balakhontsev, O.V. (2012), “Thermal state observer for induction motor in the context of maximal load utilization strategy”, *Elektromekhanichni ta enerhozberihaiuchi systemy*, no. 4/2012(20), pp. 20–24.

2. Колб А.А. Теорія електроприводу / А.А. Колб, А.А. Колб – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.

Kolb, A.A., Kolb, A.A. (2006), *Teoriia elektroprivodu* [Fundamentals of Electric Drive], Dnipropetrovsk, Ukraine.

Цель. Определить зависимости между параметрами рабочего цикла и тепловым состоянием асинхронного двигателя и преобразователя в частотно-управляемом электроприводе.

Методика. Во время проведения научных исследований использовались методы опосредованного определения температур в узлах частотно-управляемого электропривода. Для оценки теплового состояния системы частотно-управляемого электропривода и определения искомых зависимостей использовались динамические тепловые модели системы электропривода. Проведены теоретические и экспериментальные исследования зависимостей переменных состояний тепловой модели от режимов работы электропривода с учетом различных систем охлаждения двигателя, а также закономерностей, которые определяют взаимосвязь между длительностью работы системы частотно-управляемого электропривода и его нагрузочной способностью.

Результаты. Получены зависимости максимальной температуры конструктивных частей от длительности включений. Определен характер данных зависимостей: для двигателя с самоохлаждением зависимость имеет параболический характер, для двигателя с независимым охлаждением – линейный. Полученные закономерности изменения максимальной температуры конструктивных частей от длительности включения для двигателя с разными системами охлаждения позволяют сформировать законы управления частотно-управляемым электроприводом по принципу максимальной перегрузочной способности в соответствии с системой охлаждения двигателей.

Научная новизна. Впервые получены зависимости параметров рабочего цикла (нагрузка, длительность включений) от параметров тепловой модели и нагрузочной способности регулируемого асинхронного электропривода.

Практическая значимость. Полученные зависимости могут использоваться на этапе предварительного выбора мощности и системы вентиляции асинхронного электродвигателя, а также частотного преобразователя для механизмов с повторно-кратковременным режимом работы.

Ключевые слова: частотно-управляемый электропривод, тепловая модель электропривода, допустимая перегрузка электропривода, граничные кривые

Purpose. To estimate dependences between the operation mode parameters and the thermal state of induction motor and frequency converter in the variable frequency drive.

Methodology. The research implied application of indirect evaluation of temperatures in the nodes of variable frequency drive. The thermal models were applied for estimation of the drive’s thermal state and dependencies

in question. The correlation between the operational mode's parameters and the drive's thermal state, and dependencies between the drive's overload capacity and the mechanism's duty cycle were theoretically grounded and verified experimentally. The variation of cooling intensity due to speed regulation was taken into account.

Findings. The dependencies of maximal motor nodes' temperatures and the load duty cycle were obtained. We have proved that the motors with self-cooling systems have parabolic dependency meanwhile the motors with independent cooling have linear dependency. The regularities estimated can be used to employ the special maximal productivity strategy for the variable frequency drives with various cooling systems.

Originality. New dependencies between the operational mode's parameters (load rate, duty cycle), parameters of thermal model and load capacity of the variable frequency electric drive have been obtained.

Practical value. The dependencies obtained can be used for preliminary dimensioning of induction motor with corresponding cooling type and frequency drive for the mechanisms with S3 load pattern (variable load).

Keywords: *variable frequency drive, electric drives' thermal model, maximal overload for electric drive, limit curves*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
В.С. Хіловим. Дата надходження рукопису 21.03.13.*

УДК 621.318

**Е.И. Байда, канд. техн. наук, доц.,
С.В. Выровец**

Национальный технический Университет Украины „Харьковский политехнический институт“, г. Харьков, Украина, e-mail: baida_kpi@i.ua; vsv_2007@ukr.net

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОГАНИЯ МОНОСТАБИЛЬНОГО АКТУАТОРА

**Ye.I. Bayda, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
S.V. Vyrovets**

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Instructor of the Department of Electrical Apparatus, Kharkov, Ukraine, e-mail: baida_kpi@i.ua, vsv_2007@ukr.net

CHARACTERISTIC OF MONOSTABLE ACTUATOR STARTING

Цель. Апробация математической модели по расчету нестационарного электромагнитного поля в нелинейной, неоднородной, проводящей среде с учетом движения якоря поляризованного моностабильного актуатора с постоянными магнитами, а также исследование параметров трогания поляризованного моностабильного актуатора в зависимости от величины напряжения накопительного конденсатора.

Методика. Математическое моделирование электромагнитного поля в неоднородной, нелинейной, проводящей, движущейся среде с учетом уравнений электрического поля катушки и динамики движения подвижных элементов, а также сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на макетном образце поляризованного моностабильного актуатора.

Результаты. Разработана математическая модель расчета нестационарного электромагнитного поля в поляризованном бистабильном актуаторе с учетом уравнения электрической цепи катушек включения-отключения и уравнения движения приведенной массы якоря, получены динамические характеристики моностабильного актуатора вакуумного выключателя среднего напряжения, позволяющие на базе полученной математической модели исследовать параметры срабатывания выключателя и проектировать актуаторы в соответствии с техническим заданием, а также выбирать оптимальные параметры конструкции и существенно уменьшить время и расходы на создание макетных образцов.

Научная новизна. Впервые осуществлено комплексное исследование моностабильного актуатора с постоянными магнитами на основе расчета системы уравнений электромагнитного поля в неоднородной, нелинейной проводящей среде с учетом перемещения якоря, уравнений электрической цепи, а также уравнения движения.

Практическая значимость. На основании проведенных расчетов были изготовлены макетные образцы актуатора и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие адекватность математической модели, что позволяет проектировать подобные актуаторы для новых конструкций выключателей и модернизировать имеющиеся.

Ключевые слова: *поляризованный актуатор, математическая модель, высококоэрцитивный постоянный магнит, время трогания, вихревой ток, динамическая характеристика актуатора*

Постановка проблемы. В настоящее время одним из наиболее перспективных видов актуаторов

являются поляризованные актуаторы на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов [1–7]. Такие актуаторы характеризуются: значительными электромагнитными силами в стабильных состояниях; минимальными затратами энергии (стабильные состоя-