

ПАРАМЕТРИ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ

Розглянуто методи визначення параметрів силового трансформаторного та перетворювально-го обладнання системи навантаження двигунів постійного струму. Проведено порівняльний розрахунок параметрів без урахування та з урахуванням динамічного режиму роботи обладнання в режимі навантаження. Проаналізовано основу методики для розрахунку та вибору силового обладнання станції навантаження двигунів постійного струму.

Вступ

У роботах [1, 2] показано, що під час діагностики електричних машин, які пройшли стадію ремонту, перспективним видом випробувального устаткування є система динамічного навантаження.

Оскільки навантаження здійснюється за рахунок формування знакозмінного електромагнітного моменту, що забезпечує необхідне струмове навантаження, то знакозмінна потужність, що виникає в системі, вимагає встановлення силового устаткування (перетворювачів, трансформаторів) достатньо великої потужності.

За умови динамічного навантаження виникають специфічні питання, щодо вибору джерела живлення [3]. Це пов'язано з тим, що навантаження змінюється в часі, в зв'язку з чим в системі між її складовими циркулює потужність, яка, в основному, визначає встановлену потужність устаткування.

При цьому встановлена потужність обладнання станції навантаження повинна бути більшою максимального значення потужності випробовуваної електричної машини.

Слід враховувати й те, що залежно від типу випробовуваної машини, особливостей її конструкції задаються певні вимоги.

До найістотніших вимог відносять:

- потужність джерела живлення має бути мінімальною;
- джерело живлення має бути економічним;
- джерело живлення має бути легкокерованим.

Існуючі методики [4—5] базуються на розрахунку встановленої потужності силового електромеханічного обладнання, виходячи із середніх значень струмів навантаження. При цьому вважається, що процеси в системі навантаження є незмінними у часі.

Оскільки ж в системі динамічного навантаження параметри випробовуваного двигуна змінюються у часі, то існує необхідність розрахунку параметрів обладнання з урахуванням динамічного режиму роботи.

Отже, метою роботи є розроблення методики визначення параметрів силового електромеханічного обладнання системи динамічного навантаження.

Матеріал і результати дослідження

У роботі [6] пропонується спосіб визначення струмів та потужностей силового перетворювача та трансформатора, виходячи з характеру зміни струму навантаження.

Визначимо значення встановленої потужності силового електромеханічного обладнання за методиками, наведеними в [4—5], та за методикою, яка враховує динамічний режим роботи випробовуваної електричної машини [6] за умови, що для розрахунку береться постійне значення випрямленої напруги тиристорного перетворювача (ТП), а пульсації змінної складової напруги фільтруються за допомогою дроселя.

Розглянемо алгоритм розрахунку силового обладнання, наведений в [4—5]. Для тиристорних електроприводів середньої та великої потужності застосовуються трифазні схеми випрямлення. При цьому для найповнішого використання двигуна за струмом на усіх швидкостях обертання тиристори включають за трифазною мостовою схемою.

Вибір тиристорів здійснюється на підставі середнього значення струму та максимального значення зворотної напруги вентилів.

Середнє значення струму вентилів, вважаючи $I_d = I_H$:

$$I_{a \text{ сеп}} = (1,8 \dots 2,0) \frac{I_d}{3} \approx (0,6 \dots 0,7) I_d, \quad (1)$$

де I_H — номінальний струм двигуна.

Максимальне значення зворотної напруги, яке прикладається до вентилів, за умови $U_{d0} + 1,5 \cdot I_H \cdot R_H$:

$$U_{b \text{ max}} = (1,3 \dots 1,5) \cdot 1,05 \cdot U_{d0} = (1,36 \dots 1,57) U_{d0}. \quad (2)$$

Розрахунок трансформатора виконують таким чином. Оскільки дані обмоток трансформатора є невідомими, то визначається теоретичне значення фазної напруги вторинної обмотки

$$U_{2\phi} = k_u k_c k_R U_d, \quad (3)$$

де k_u — коефіцієнт схеми, що характеризує співвідношення напруг $U_{2\phi}/U_{d0}$ в ідеальному випрямлячі; k_c — коефіцієнт запасу за напругою; k_R — коефіцієнт запасу, що враховує падіння напруги у вентилях, обмотках трансформатора і за рахунок перекриття анодів.

Діюче значення струму вторинної обмотки:

$$I_2 = k_I k_i I_d, \quad (4)$$

де k_I — коефіцієнт схеми; k_i — коефіцієнт, що враховує відхилення форми анодного струму вентилів від прямокутної.

Діюче значення струму первинної обмотки

$$I_1 = I_2 / k_{TP}, \quad (5)$$

де k_{TP} — коефіцієнт трансформації напруги.

Типова потужність трансформатора:

$$S_{TP} = k_S k_c k_i k_R U_d I_d \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

де k_S — коефіцієнт схеми, що характеризує співвідношення потужностей S_{TP}/P_d в ідеальному випрямлячі.

Обирають конкретний тип трансформатора [7], після чого виконують уточнювальний розрахунок параметрів, за якими вибираються вентилялі, виходячи з номінальних параметрів трансформатора.

Номінальні значення напруги та струму вторинної обмотки

$$U_{2\phi, H} = \frac{U_{2\phi}}{\sqrt{3}}; \quad I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2\phi}}. \quad (7)$$

Активний та індуктивний опори трансформатора, зведені до вторинної обмотки,

$$R_m = \frac{\Delta P_{кз}}{m_{mp} I_{1H}^2 k_{mp}^2}; \quad x_T = \frac{u_k \% \cdot U_{1\phi}}{100 \cdot I_{1H} k_{mp}^2}. \quad (8)$$

Активний опір згладжувального дроселя

$$r_{др} \approx \frac{R_T}{m_{TP}}. \quad (9)$$

Опір перетворювача

$$R_n = R_m + r_{др} + \frac{x_m m}{2\pi}. \quad (10)$$

Середнє значення випрямленої напруги за повністю відкритих тиристорів (кут $\alpha = 0$) та навантаженні двигуна струмом $I_d = 1,5 I_H$

$$U_{d0} = U_H + 1,5 I_H R_H. \quad (11)$$

Необхідна величина напруги вторинної обмотки трансформатора з урахуванням можливого

зниження напруги мережі U_M на 15 %

$$U_{2\phi} = 1,15 \frac{U_{d0}}{2,34}. \quad (12)$$

Параметри керованих вентилів визначаються з формул:

$$I_{сер} = k_{зс} \frac{I_{дн}}{m_{тр}}; \quad U_{b\max} = k_{зн} \cdot 1,05U_{d0}. \quad (13)$$

Розглянемо визначення параметрів силового устаткування з урахуванням навантажувального режиму відповідно до методики, наведеної в [6].

Силовий трансформатор з фізичної точки зору є складним неоднорідним тілом. В процесі його нагрівання відбувається теплообмін між обмотками, магнітопроводом і навколишнім середовищем. Якщо температура трансформатора відрізняється на ± 20 % від номінальної, то процес його нагрівання визначається експонентою і трансформатор можна розглядати як однорідне тіло з постійною часу нагрівання $\tau = 2...3,5$ год. Рівняння теплового балансу для трансформатора з коефіцієнтом теплообміну $p = 1$ має вигляд

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + (1 - \lambda\alpha_0 I^2)\theta = \lambda I^2 + \frac{\lambda P_{н.х.}}{R}, \quad (14)$$

де $P_{н.х.}$ — втрати неробочого ходу трансформатора, кВт; θ — перевищення середньої температури трансформатора над температурою навколишнього середовища, °С; α — температурний коефіцієнт опору обмотки трансформатора, $1/^\circ\text{C}$; $I = I(t)$ — струм навантаження трансформатора; $R = P_{к.з.}/I_{ном.}^2$ — опір трансформатора, пов'язаний із втратами короткого замикання при номінальному струмі $P_{к.з.}$ і квадратом номінального струму $I_{ном.}^2$; $\lambda = R \cdot \tau/C$ — коефіцієнт, що залежить від опору трансформатора R , постійної часу τ і його теплоємності C .

Розв'яжемо рівняння (14) за таких припущень:

— струм навантаження $I(t)$ є випадковим стаціонарним процесом із математичним очікуванням m_I ;

— постійна часу нагрівання трансформатора $\tau = \text{const}$ й не залежить від його струму навантаження.

Для визначення математичного очікування температури перегріву трансформатора m_θ проінтегруємо рівняння (14), замінивши випадкові функції їхніми математичними очікуваннями:

$$m_\theta = \lambda (m_{I^2} + D_I + P_{н.х.}/R) / \delta, \quad (15)$$

де D_I — дисперсія струму; m_{I^2} — математичне очікування струму трансформатора; коефіцієнт δ визначається за формулою $\delta = 1 - \lambda\alpha_0 m_{I^2}$.

Дисперсія температури перегріву трансформатора для $\alpha_0 \ll 1/\tau$ має вигляд

$$D_\theta = 4\lambda^2 \delta^{-4} D_I m_I^2. \quad (16)$$

Еквівалентна за тепловим зношуванням ізоляції температура перегріву трансформатора

$$\theta_E = \frac{1}{\gamma} \cdot \ln \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T e^{\gamma \cdot \theta(t)} dt \right],$$

де γ — коефіцієнт старіння.

У випадку нормального закону розподілу температури перегріву (за різко змінних навантажень)

$$f(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_\theta}} \cdot \exp \left[-\frac{(\theta - m_\theta)}{2D_\theta} \right], \quad (17)$$

вираз для еквівалентної температури перегріву матиме вигляд

$$\theta_{E1} = m_\theta + \frac{\gamma}{2} D_\theta$$

або

$$\theta_{E1} = \lambda \delta^{-1} m_I^2 \left[1 + V_I^2 + 2\lambda \delta^{-1} \gamma D_I \right] + \frac{\lambda P_{н.х.}}{\lambda P_{к.з.}} I_{НОМ}^2, \tag{18}$$

де V_I — коефіцієнт варіації струму навантаження.

Для щільності розподілу (16)

$$\theta_{E2} = \frac{\lambda \delta^{-1} (1 + P_{н.х.}/P_{к.з.}) m_I^2}{1 - 2\gamma \delta^{-1} \lambda (1 + P_{н.х.}/P_{к.з.}) D_I}. \tag{19}$$

Значенням температури (18)—(19) відповідають такі значення еквівалентного струму:

$$I_{E1} = m_I \sqrt{(1 + V_I^2) \left(0,5 + 0,5 \sqrt{1 + 8\gamma \theta_{НОМ} V_I^2} \right)}; \tag{20}$$

$$I_{E2} = m_I \sqrt{1 + 2\gamma \theta_{НОМ} V_I^2}.$$

Оскільки коефіцієнт старіння ізоляції для трансформаторів $\gamma = 0,1155 \text{ град}^{-1}$, а номінальний перегрів за температури навколишнього середовища $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\theta_{НОМ} = 98 - 20 = 78 \text{ }^\circ\text{C}$, то вираз (20) матиме вигляд

$$I_{E1} = m_I \sqrt{(1 + V_I^2) \left(0,5 + 0,5 \sqrt{1 + 72,1 V_I^2} \right)}; \tag{21}$$

$$I_{E2} = m_I \sqrt{1 + 18 V_I^2}.$$

За умови, що навантаження здійснюється протягом тривалого часу, закон розподілу температури перебуває між нормальним розподілом і розподілом (16). Значення еквівалентної температури нагрівання, розраховані за виразами (18) і (19), відрізняються одне від одного на 3...4 % і еквівалентну температуру знаходять як середнє значення цих двох граничних випадків. Тоді еквівалентний струм визначається з виразу

$$I_{E1} = \begin{cases} m_I \sqrt{1 + 17,4 V_I^2}, & V_I \leq 0,1; \\ m_I \sqrt{0,91 + 1,58 V_I + 10,5 V_I^2}, & V_I > 0,1. \end{cases} \tag{22}$$

За значеннями еквівалентного струму знаходять розрахункову потужність трансформатора:

$$S_p = \sqrt{3} U_{2\phi} I_{E1}, \tag{23}$$

де $U_{2\phi}$ — вторинна напруга трансформатора.

На основі математичної моделі, розглянутій в [3], проведено моделювання режиму навантаження випробуваного двигуна типу ПЗ1-М з такими паспортними даними:

$P_n = 1,4 \text{ кВт}; U_n = 220 \text{ В}; I_n = 8,7 \text{ А}; n_n = 1500 \text{ об./хв.}; \eta_n = 91 \%; R_{\text{я}} = 2,781 \text{ Ом};$

$L_{\text{я}} = 0,094 \text{ Гн}; U_3 = 220 \text{ В}; R_3 = 314 \text{ Ом}; L_3 = 32 \text{ Гн}.$

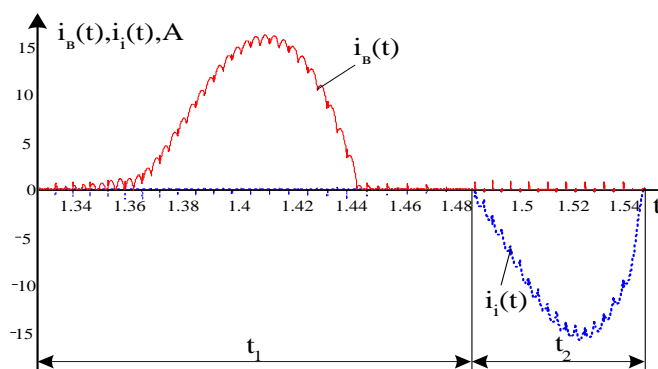
Отримані залежності струмів тиристорного перетворювача в режимах випрямлення й інвертування показані на рисунку.

Для досліджуваного електричного двигуна визначимо параметри силового перетворювача й трансформатора за описаними методиками.

Відповідно до виразів (3), (6) визначимо параметри трансформатора:

$$U_{2\phi} = 119,112 \text{ В}; S_{\text{тр}} = 2,669 \text{ кВА}.$$

За розрахованими параметрами оби-



Графіки струмів тиристорного перетворювача в режимі навантаження

рається [7] трансформатор з такими параметрами: $S_n = 3,000$ кВА; $I_n = 7,5$ А; $U_n = 380/220$ В; $U_{кз} = 2,8$ %; $\Delta P_{кз} = 240,25$ Вт.

За виразами (7)—(13) визначаємо параметри вентилів перетворювача:

$$U_{2ф.н} = 127,017 \text{ В}; I_{2н} = 7,873 \text{ А}; R_m = 0,477 \text{ Ом}; x_T = 0,275 \text{ Ом};$$

$$r_{др} \approx 0,159 \text{ Ом}; R_n = 0,899 \text{ Ом}; U_{d0} = 231,734 \text{ В}; U_{2ф} = 113,886 \text{ В};$$

$$I_2 = 7,463 \text{ А}; I_{сер} = 5,8 \text{ А}; U_{b\max} = 365 \text{ В}.$$

За середнім значенням струму вентиля й максимальним значенням зворотної напруги вибирають [7] тиристри ТС2–10 з параметрами: $I_{сер} = 10$ А; $U_{b\max} = 100\dots1100$ В.

Визначимо параметри силового перетворювача й трансформатора відповідно до методики, запропонованої в [6]. Оскільки струм вентиля (див. рис. 1) має максимальну амплітуду протягом половини періоду, то для вибору вентиля береться половина максимального значення амплітуди струму: $I_{сер} = 5$ (А).

Максимальна напруга вентиля згідно з (13)

$$U_{b\max} = 365 \text{ В}.$$

За розрахунковими параметрами вибирають [7] тиристри ТС2–10 з параметрами: $I_{сер} = 10$ А; $U_{b\max} = 100\dots1100$ В.

Вибір силового трансформатора в ході теплового розрахунку, як і за відомими методиками, відбувається за двома параметрами — розрахунковою повною потужністю та розрахунковим значенням фазної напруги вторинної обмотки. Тепловий розрахунок параметрів трансформатора відбувається з урахування струму вентиля перетворювача в навантажувальному режимі.

Математичне очікування струму

$$m_I = \frac{1}{n} \cdot \sum I(i\Delta t),$$

де $I(i\Delta t)$ — струм навантаження на заданому інтервалі часу, А; Δt — інтервал часу, протягом якого струм навантаження залишається незмінним, с; n — тривалість циклу навантаження, с.

$$m_I = \frac{1}{n_n} \cdot \sum I_n(i\Delta t) + \frac{1}{n_H} \cdot \sum I_H(i\Delta t) + \frac{1}{n'_n} \cdot \sum I'_n(i\Delta t) = 1,365 \text{ А}.$$

Дисперсія струму

$$D_I = \left(\frac{1}{n_n} \cdot \sum I_n^2(i\Delta t) + \frac{1}{n_H} \cdot \sum I_H^2(i\Delta t) + \frac{1}{n'_n} \cdot \sum I'^2_n(i\Delta t) \right) - m_I^2 = 5,261 \text{ А}^2.$$

Середньоквадратичне відхилення струму

$$\sigma_I = \sqrt{D_I} = 2,294 \text{ А}.$$

Коефіцієнт варіації струму

$$V_I = \frac{\sigma_I}{m_I} = 1,68.$$

Для графіків струму (див. рис.), з урахуванням коефіцієнта варіації з виразу (22) еквівалентний струм

$$I_E = m_I \sqrt{0,91 + 1,58 \cdot V_I + 10,5 \cdot V_I^2} = 7,867 \text{ А}.$$

Розрахункова потужність трансформатора

$$S_p = 1,586 \text{ кВА}.$$

Розрахункове значення фазної напруги вторинної обмотки

$$U_{2ф} = 119,112 \text{ В}.$$

За розрахованими параметрами вибрано [7] трансформатор з номінальною потужністю 1600 ВА.

Висновки

Результати розрахунку показали, що використання способу визначення параметрів силового електромеханічного устаткування системи навантаження, який враховує його динамічний режим роботи, дозволяє зменшити розрахункові значення встановленої потужності трансформатора й тиристорного перетворювача. Це дозволить знизити витрати на встановлене силове устаткування під час проектування систем навантаження електричних машин постійного струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д. И. Родькин. — М. : Недра, 1991. — 240 с.
2. Ломонос А. И. Параметры оборудования систем динамического нагружения с накопителями-компенсаторами / А. И. Ломонос, А. В. Бялобржеский, С. М. Горбань // Вісник КДПУ : Наукові праці КДПУ. — Кременчук : КДПУ. — 2004. — № 2 (25). — С. 126—130.
3. Ломонос А. І. Дослідження впливу режиму навантаження електричних машин постійного струму на мережу живлення та параметрів мережі на режим навантаження / А. І. Ломонос, І. М. Кармазин // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. — Кременчук : КДПУ. — 2009. — № 4 (57), ч. 1. — С. 172—175.
4. Преображенский В. И. Выбор полупроводниковых вентилях для электроприводов / В. И. Преображенский. — М. : Энергия, 1971. — 80 с.
5. Ривкин Г. А. Преобразовательные устройства / Г. А. Ривкин. — М. : Энергия, 1970. — 544 с.
6. Давыдов П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов / П. Д. Давыдов. — М. : Энергия, 1967. — 144 с.
7. Комплектные тиристорные электроприводы : справочник / [И. Х. Евзеров, Б. И. Мошкович, В. М. Перельмутер, Л. А. Яновский] — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 319 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 1.07.11

Рекомендована до друку 30.08.11

Ломонос Андрій Іванович — старший викладач.

Кафедра систем автоматичного управління та електропривода, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Кременчук