

## Лекція №27. Нагрівання і охолодження двигунів при тривалому режимі роботи з постійним навантаженням.

### 27.1. Загальні положення.

Умови нагрівання окремих частин машини, що мають ізоляцію, різні. Більшому нагрівання піддаються ті частини обмотки, які знаходяться у внутрішніх областях машини. Виділення тепла і напрямки теплових потоків усередині її змінюється при переході від режиму навантаження до режиму холостого ходу, оскільки двигун є неоднорідним тілом. Ці обставини дуже ускладнюють теплові розрахунки, якщо не прийняти деяких припущень. Тому двигун вважають тілом однорідним з нескінченною теплопровідністю, передача тепла в ньому і навколишнє середовище відбувається головним чином за рахунок теплопровідності.

Для отримання закону зміни температури перегріву двигуна, складемо рівняння теплового балансу.

Позначимо:  $Q$  – кількість тепла, що виділяється в двигуні в одиницю часу;  $A$  - тепловіддача в навколишнє середовище, тобто кількість тепла, що віддається двигуном навколишнє середовище;  $C$  - теплоємність двигуна як однорідного тіла, тобто кількість тепла, необхідне для підвищення його температури на  $1^\circ\text{C}$ .

**Рівняння теплового балансу має вигляд**

$$Q \cdot dt = A \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\tau.$$

Разділивши змінні, знаходимо:

$$(Q - A\tau)dt = C \cdot d\tau; \quad dt = \frac{C \cdot d\tau}{Q - A\tau}; \quad t = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau) + K.$$

При  $t = 0$  в загальному двигун міг мати перегрів  $\tau_0$ ,

$$0 = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_0) + K; \quad K = \frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_0);$$

Звідси

$$t = -\frac{C}{A} [\ln(Q - A\tau) - \ln(Q - A\tau_0)] = -\frac{C}{A} \ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0};$$

$$e^{\frac{A}{C}t} = \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0}; \quad \tau = \frac{Q}{A} \left( 1 - e^{-\frac{A}{C}t} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{A}{C}t} \text{ або}$$

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_H}},$$

де  $\tau_y = \frac{Q}{A}$  - встановлена температура перегріву, яке досягається при  $t = \infty$ ,

$T_H = \frac{C}{A}$  - постійна нагріву, тобто час, протягом якого двигун нагрівся б до сталої температури  $\tau_y$ , якби не було тепловіддачі в навколишнє середовище. Дійсно, при  $A = 0$  рівняння теплового балансу набуває вигляду:

$$Q \cdot dt = C \cdot d\tau,$$

звідки

$$t = \frac{C}{Q} \cdot \tau = \frac{C}{Q} \cdot \tau_y = \frac{C}{Q} \cdot \frac{Q}{A} = \frac{C}{A} = T_H.$$

Якщо двигун нагрівається від температури навколишнього середовища, тобто  $\tau_0=0$ , то закон зміни  $\tau$  такий

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right).$$

На основі цього і попереднього рівнянь на рис.3.1 побудовані відповідні криві.

У реальних умовах, тобто при наявності тепловіддачі температура перегріву двигуна за час  $T_H$  досягне лише значення  $\tau=0,632\tau_y$ . Для визначення  $T_H$ , якщо відома крива  $\tau = f(t)$ , на цій кривій знаходиться точка, відповідна  $\tau = 0,632\tau_y$ , з якої проводиться перпендикуляр на вісь абсцис (див. рис.27.2). Величину  $T_H$  можна знайти графічно провівши дотичну до експоненти  $\tau = f(t)$  в будь-якій точці, наприклад, з початку координат, що так само показано на рис.27.2.

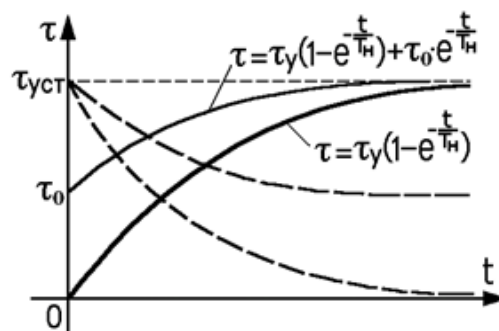


Рис.27.1.

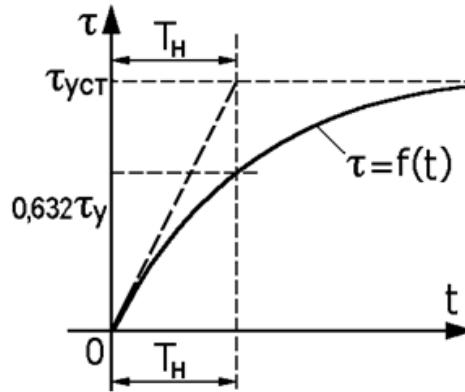


Рис.27.2.

Реальна крива нагріву відрізняється від теоретичної, тобто експоненти, тим, що на початку процесу нагрівання двигун нагрівається швидше, ніж за законом експоненти. І лише починаючи з  $\tau=(0,5\div 0,6)\tau_y$  дійсна крива наближається до теоретичної. Тому при необхідності визначення  $T_H$  за реальною кривою проводяться дотичні до неї на початку координат, при  $\tau=0,5\tau_y$  і  $\tau=(0,8\div 0,9)\tau_y$ .  $T_H$  знаходиться як середнє значення з трьох, отриманих методом дотичних.

Для отримання залежності  $\tau=f(t)$  при охолодженні двигуна від  $\tau_{y1}$  до  $\tau_{y2}$ , можна скористатися раніше отриманим рівнянням, підставивши в нього замість  $\tau_y-\tau_{y2}$ , а замість  $\tau_0-\tau_1$ . Тоді закон зміни  $\tau$  при охолодженні двигуна запишеться у вигляді

$$\tau = \tau_{y2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{y1} \cdot e^{-\frac{t}{T_H}} .$$

При охолодженні до температури навколишнього середовища  $\tau_{y2} = 0$  і рівняння набуває вигляду

$$\tau = \tau_{y1} \cdot e^{-\frac{t}{T_H}} .$$

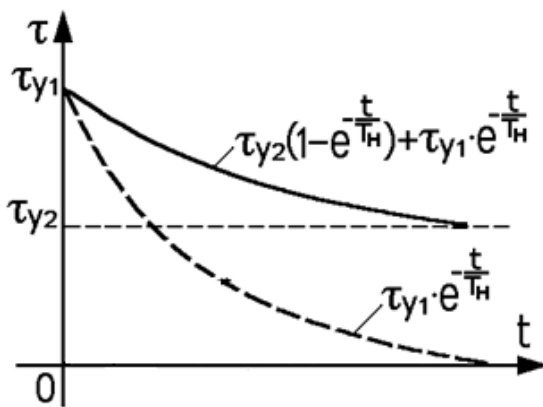


Рис.27.2.

Наведені рівняння справедливі лише в разі, якщо двигун охолоджується стороннім вентилятором, тобто має незалежне охолодження. Якщо ж він охолоджується природним шляхом в рівняння необхідно підставляти замість  $T_H$  величину  $T_0$ , яка в 2-3 рази більша за  $T_H$ .

Чисельне значення постійної  $T_H$  15-20 хв для двигунів невеликої потужності. Для великих двигунів  $T_H$  може бути значно більше 1 години.

Слід зазначити, що  $T_H$  не залежить від навантаження двигуна. При різних навантаженнях його нагрівання буде відбуватися за різними кривими (рис.27.2). Стала ж температура перегріву буде тим вищою, чим більше завантажений двигун, тому що більшому навантаженню відповідають великі втрати.

## 27.2. Нагрівання двигунів при короткочасному режимі роботи з постійним навантаженням.

Механізми, що працюють в короткочасному режимі випускається мало. Тому, найчастіше для роботи в короткочасному режимі доводиться використувувати двигуни режиму S1. Але якщо такий двигун навантажити номінальною потужністю, то максимальна температура, яку він матиме в кінці робочого періоду, тобто в кінці часу  $t_k$ , буде менше  $\tau_{доп}$ . Отже, двигун буде недо-використаний по нагріванню.

Для того, щоб він в тепловому відношенні був використаний повністю, його потрібно перевантажити так, щоб за час  $t_k$  він був нагрітий до  $\tau_{доп}$ . Інакше кажучи, можна взяти двигун меншої потужності, ніж потрібно для короткочасної роботи (наприклад, потужністю 10 кВт замість 15 кВт, а навантажити потужністю 15 кВт).

Для кількісної оцінки перевантаження використовуються коефіцієнти термічного (теплого) і механічного перевантаження. У тривалому режимі з номінальним навантаженням температура перегріву асимптотично наближається до гранично допустимої для даного класу ізоляції.

$$\tau_{уст} = \tau_{доп} = \frac{Q_{\infty}}{A} = \frac{\Delta P_{\infty}}{A},$$

де  $Q_{\infty} = \Delta P_{\infty}$  - втрати при довготривалому режимі з номінальним навантаженням.

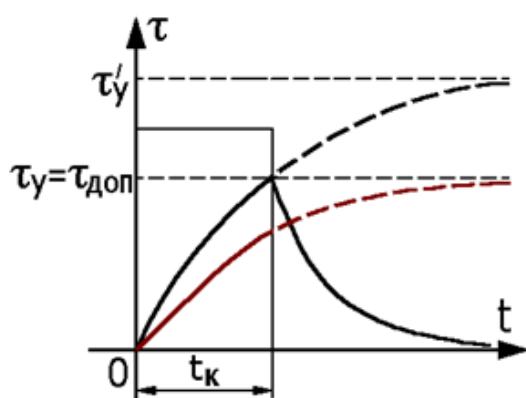


Рис.27.3.

При короткочасній роботі двигуна режиму S1 з перевантаженням ця ж температура буде досягнута за час  $t_k$  (див. рис.27.3). Оскільки за цей час навантаження залишається постійною, то  $t_k$  і коефіцієнт термічного перевантаження  $\delta$  можна знайти з рівняння нагріву

$$\tau_{уст} = \tau_{доп} = \frac{\Delta P_k}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right) = \tau'_{уст} \left( 1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right)$$

де  $\Delta P_k$  - допустимі втрати при

короткочасному режимі двигуна режиму S1, при короткочасній роботі з перевантаженням.

Прирівнявши ці рівності і перетворивши, маємо

$$\frac{\Delta P_{\infty}}{A} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}} \right) = \frac{\Delta P_{\kappa}}{A} - \frac{\Delta P_{\kappa}}{A} \cdot e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}}.$$

Звідси

$$e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}} = \frac{\Delta P_{\kappa} - \Delta P_{\infty}}{\Delta P_{\kappa}}; \quad t_{\kappa} = T_H \cdot \ln \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\kappa} - \Delta P_{\infty}} = T_H \cdot \ln \frac{\delta}{\delta - 1},$$

де

$$\delta = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\infty}} = \frac{Q_{\kappa}}{Q_{\infty}} = \frac{\tau'_{уст}}{\tau_{уст}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}}} - \text{коefficient термічного наванта-$$

ження.

За величиною  $\delta$  може бути визначений і coefficient механічної перевантаження двигуна  $X$ , який представляє відношення допустимого за умовами нагріву моменту  $M^{(\kappa)}$  при короткочасному навантаженні  $P_{\kappa}$  до номінального моменту  $M^{(H)}$  при тривалій роботі з номінальним навантаженням  $P_H$ , а також ступінь перевантаження двигуна по струму

$X = \frac{M^{(\kappa)}}{M^{(H)}}$  або  $X = \frac{I_{\kappa}}{I_H}$ . Для цього у виразі для  $\delta$  розділимо втрати на постійні

$K$  і змінні  $V$

$$\delta = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\infty}} = \frac{K + V_H \left( \frac{I_{\kappa}}{I_H} \right)^2}{K + V_H} = \frac{a + x^2}{a + 1},$$

де  $a = \frac{K}{V_H}$  - coefficient втрат;  $V_H$  - номінальні змінні втрати.

Звідси можна знайти допустиму тривалість короткочасної роботи двигуна режиму S1 при заданій ступеня перевантаження двигуна по струму або потужності і допустиму перевантаження двигуна по струму при заданій тривалості  $t_{\kappa}$ .

$$t_{\kappa} = T_H \ln \frac{a + x^2}{x^2 - 1}; \quad x = \sqrt{\frac{1 + a \cdot e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}}}} \quad \text{або} \quad x = \sqrt{\delta + a(\delta - 1)} = \sqrt{\delta(a + 1) - a}.$$

Якщо знехтувати постійними втратами, то  $x = \sqrt{\delta}$ .

При необхідності визначення  $T_H$ , і знаючи каталожні дані двигуна короткочасного режиму її можна знайти з виразу для  $t_k$ :

$$T_H = \frac{t_k}{\ln \frac{\delta}{\delta-1}} = \frac{t_k}{\ln \frac{\Delta P_k}{\Delta P_k - \Delta P_\infty}} = \frac{t_k}{\ln \frac{P_k \left( \frac{1}{\eta_k} - 1 \right)}{P_k \left( \frac{1}{\eta_k} - 1 \right) - P_H \left( \frac{1}{\eta_H} - 1 \right)}},$$

де  $\eta_k$  и  $\eta_H$  - ККД двигуна при роботі в короткочасному режимі з перевантаженням і номінальний ККД.

Визначимо, тепер, допустиме навантаження двигуна короткочасного режиму по моменту або потужності якщо дійсне час короткочасної роботи  $t_{k,дейс}$  відрізняється від каталожного  $t_{k,кат}$ . При цьому вважаємо, що за час  $t_{k,кат}$  і навантаженні відмінною від номінальної, двигун нагріється до такої ж допустимої температури, що і за час  $t_{k,кат}$  і номінальному навантаженні.

$$\tau_{дон} = \frac{\Delta P_H}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_{k,кат}}{T_H}} \right) = \frac{\Delta P_k}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_{k,дейс}}{T_H}} \right),$$

звідки 
$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_H} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{k,кат}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{k,дейс}}{T_H}}}.$$

Так як  $\Delta P_H = \kappa + V_H$ , и  $\Delta P_k = \kappa + V_H \cdot x^2 = \kappa + V_H \cdot \left( \frac{M_{дон}}{M_H} \right)^2$  то

$$M_{дон} = M_H \sqrt{(a+1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{k,кат}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{k,дейс}}{T_H}}} - a} \text{ або } P_{дон} = P_H \sqrt{(a+1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{k,кат}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{k,дейс}}{T_H}}} - a}.$$

Відзначимо, що використовувати двигуни тривалого режиму для роботи в короткочасному режимі недоцільно.

Пояснюється це тим, що якщо прагнути повністю використовувати їх по нагріванню в короткочасному режимі, то їх навантаження повинне бути більше номінального. Однак, перевантажувальна здатність, яка визначається електричними і механічними властивостями машини, зменшується, тому що ці властивості не залежать від теплового режиму двигуна. Крім того, якщо час  $t_k$  невеликий, то для повного використання двигуна по нагріванню необхідно значно перевантажити його по моменту.

Інакше кажучи, оскільки в режимі S2 двигун, призначений для тривалого режиму, може працювати з більшим навантаженням, ніж в режимі

S1, то можна вважати, що його потужність в короткочасному режимі підвищується, тобто  $P_{к.ном} > P_{осн.ном}$ . Максимальне ж значення струму і моменту при короткочасному перевантаженні не залежить від теплового режиму.

Тому перевантажувальна здатність двигуна режиму S1 при роботі в режимі S2 буде нижчою, ніж в режимі S1, тобто

$$\lambda_{I(к)} = \frac{I_{макс}}{I_{к.ном}} < \lambda_{I(\infty)} = \frac{I_{макс}}{I_{осн.ном}}.$$

Якщо зобразити криві залежності коефіцієнта перевантаження  $x$  по потужності (моменту) від відношення  $\frac{t_k}{T_H}$ , то виявляється, що вже при  $\frac{t_k}{T_H} > 0,35$   $x > 2,5$  (рис.27.4), тобто для того, щоб двигун тривалого режиму повністю використовувався в тепловому відношенні при  $\frac{t_k}{T_H} < 0,35$ , його потрібно перевантажити по потужності (моменту) більше, ніж в 2,5 рази. Однак не всі двигуни нормального виконання, призначені для тривалого режиму, допускають таке перевантаження.

Тому потужність двигуна довелося б вибрати не з умов нагрівання, а за умовами допустимого перевантаження по моменту (потужності), що веде до його недовикористання по нагріванню.

Крім того, не всі частини двигуна мають однакові  $T_H$ . При тривалому режимі це не суттєво.

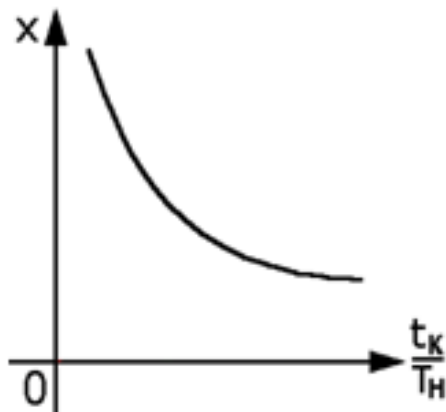


Рис.27.4.

У короткочасному режимі в разі двигуна постійного струму колектор і обмотки збудження обмежують навантаження, в той час як якір допускає подальше її підвищення. У двигунах тривалого режиму температура всіх частин досягає сталого значення протягом часу  $> (4-5) T_H$ . При роботі такого двигуна в режимі S2 температура перегріву не досягне усталеного значення, причому до кінця робочого періоду нагрівання окремих частин машини може бути різним.

Наприклад, на рис.27.5 наведені криві нагріву обмотки збудження (1), колектора (2) і обмотки якоря (3).

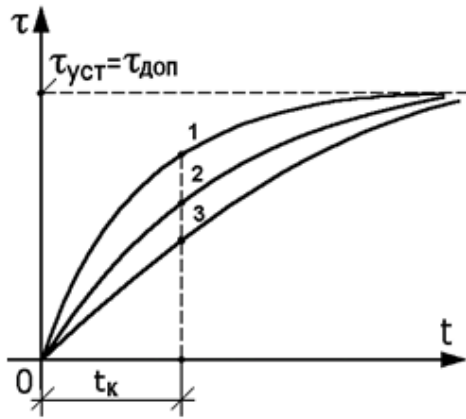


Рис.27.5.

Видно, що допустима тривалість короточасної роботи визначається умовами нагріву елемента машини, що має найменшу  $T_H$  (в даному випадку обмотки збудження). З цієї причини в двигунах, призначених для коротко-часної роботи, при їх розрахунках втрати в окремих елементах перерозподіляють таким чином, щоб до кінця часу  $t_k$  температура перегріву всіх елементів машини досягала гранично-допустимого значення.

Недоцільність використання двигунів режиму S1 в режимі S2 визначається ще й енергетичними міркуваннями. Двигуни режиму S1 розраховуються і конструюються таким чином, щоб максимальний ККД був при номінальному режимі.

Відомо, що максимальному ККД відповідає умова рівності змінних і постійних втрат. При роботі ж цих двигунів в режимі S2 з перевантаженням змінні втрати будуть більші постійних і ККД буде меншим.

Недоцільно також використовувати двигуни режиму S2 для роботи в тривалому режимі, тому що вони мають підвищені постійні втрати і будуть сильно грітися. В окремих випадках при наявності великих постійних втрат вони не можуть працювати тривалий час навіть вхолосту.

Двигуни, призначені для короточасної роботи, розраховуються інакше, ніж двигуни режиму S1. Для них характерна підвищена перевантажувальна здатність, а якщо це машини постійного струму, то вони мають посилену конструкцію колектора і обмотки збудження.