

УДК 621.313.333

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВЫХ АСИНХРОННЫХ

ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХСЛОЙНЫХ РОТОРОВ

Шайтор Н.М.

Исследованы электрические приводы с асинхронными двигателями и определены режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором, позволяющие улучшить характеристики судовых электроприводов.

1. Введение. При практической эксплуатации судовых электроприводов динамических режимов работы необходимо ориентироваться на то, что в большинстве случаев возникает необходимость в перегрузках и большой частоте включений электродвигателей достигающей 600...800 и более включений в час. В этих режимах потери переходных процессов оказывают существенное влияние на превышение температуры обмоток, нагревание и сроки службы электрических машин. По сравнению с асинхронными двигателями /АД/ с короткозамкнутым ротором /АДКР/, АД с двухслойным ротором /АДДР/ имеют пониженные пусковой ток и пусковые потери, повышенные перегрузочную способность и пусковой момент. По энергетическим показателям в длительных режимах работы АДДР хотя и приближаются к АДКР, однако уступают последним вследствие повышенных потерь и намагничивающего тока [1].

2. Кратковременные режимы работы. Режим работы электрической машины определяется её температурой. Исследование тепловых процессов в двигателях производится при общепринятых [2] теплофизических допущениях.

Уравнение перегрева АДКР над температурой окружающей среды, представляющее собой зависимость температуры перегрева от времени $t(t)$, получают из уравнения теплового баланса машины:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} (1 - e^{-t/T}). \quad (1)$$

При номинальной нагрузке АДКР имеют место потери ΔP_n . Номинальные потери вызывают перегрев, при котором температура электрических обмоток не превышает допустимого значения температуры для класса изоляции машины, равного отношению номинальных потерь к теплоотдаче $\tau_n = \Delta P_n / A$.

Установившийся температурный режим определяется постоянной времени нагрева $T = C / A$. В режиме произвольной нагрузки установившееся значение температуры определяется отношением потерь при данной нагрузке к теплоотдаче $\tau_{уст} = \Delta P / A$.

В длительном режиме номинальной нагрузки время работы $t > (3 \div 4)T$, и температура машины практически достигает установившегося номинального значения $\tau_{уст} = \tau_n$, а в кратковременном режиме время работы $t < (2 \dots 3)T$, поэтому температура не достигает установившегося номинального значения и АДКР будет недоиспользован по нагреву.

В случае замены короткозамкнутого ротора двухслойным АДДР будет работать при той же теплоотдаче, что и АДКР. На изменение теплового режима существенное влияние окажут два основных фактора. Первый обусловлен снижением КПД АДДР по сравнению с базовым двигателем и ростом потерь $\Delta P_\delta > \Delta P_n$. Рост потерь при нагрузке АДДР, равной номинальной нагрузке базового двигателя, приводит к новой установившейся температуре $\tau_\delta = \Delta P_\delta / A$, которая превышает допустимое значение τ_n , имеющее место у АДКР при номинальной нагрузке. Другой фактор связан с применением новой конструкции ротора. Масса и теплоёмкость ротора и машины в целом увеличиваются, то есть $C_\delta > C$. Следствием повышения теплоёмкости является увеличение постоянной времени нагрева машины $T_\delta > T$. Совместное действие рассмотренных факторов определяет уравнение перегрева АДДР

$$\tau = \tau_\delta \left(1 - e^{-t/T_\delta} \right). \quad (2)$$

В течение начального времени включения на номинальную нагрузку АДДР будет работать при температурах ниже номинальной. Время допустимой работы этого двигателя, обусловленное достижением номинальной температуры, можно получить из выражения (2), подставляя значение $\tau = \tau_n = \Delta P_n / A$ и решая уравнение относительно $t = t_\delta$

$$t_{\partial} = \kappa_T T \ln \frac{P_T}{P_T - 1}, \quad (3)$$

где $p_T = \Delta P_{\partial} / \Delta P_n$ - отношение потерь к номинальным потерям базового АД или коэффициент термической перегрузки АДДР; $\kappa_T = T_{\partial} / T$ - отношение постоянных времени нагрева.

При номинальной нагрузке по условиям нагрева допускается только непродолжительный режим работы АДДР, при этом время работы двигателя не должно превышать допустимого

Если АДКР, рассчитанный для продолжительного режима работы, будет работать в кратковременном режиме, то для полного его использования и достижения номинальной температуры $\tau = \tau_n$ мощность кратковременного режима должна быть больше номинальной. Допустимое время работы при перегрузке можно получить из выражения (3), если положить $\kappa_T = 1$, $\kappa_p = \Delta P / \Delta P_n$. Для полного использования машина должна работать с коэффициентом термической перегрузки, определяемом из (1) отношением установившейся температуры кратковременного режима к номинальной температуре

$$p_T = \tau_{уст} / \tau_n = 1 / (1 - e^{-t/T}). \quad (4)$$

С другой стороны, коэффициент термической перегрузки определяется отношением потерь кратковременного режима к номинальным потерям. Указанное соотношение можно выразить через коэффициент перегрузки двигателя полезной мощностью $p_m = P_2 / P_{2n}$

$$p_T = \frac{\Delta P}{\Delta P_n} = p_m \frac{\eta_n}{\eta} \frac{1 - \eta_{эл}}{1 - \eta_{н,эл}}, \quad (5)$$

где $\eta_n, \eta, \eta_{н,эл}, \eta_{эл}$ - КПД и электрический КПД АДКР соответственно при номинальной нагрузке и рассматриваемой перегрузке.

Электрический КПД может быть представлен [3] произведением $\eta_{эл} = \eta_c \eta_p$, где $\eta_c = (P_1 - I_1^2 R_1) / P_1$ - КПД статора; $\eta_p = 1 - s$ - КПД ротора; s - скольжение двигателя. С учётом (4) и (5) коэффициент механической перегрузки АДКР равен:

$$p_m = \frac{\eta}{\eta_n} \times \frac{1 - \eta_{н,эл}}{1 - \eta_{эл}} \times \frac{1}{1 - e^{-t/T}}. \quad (6)$$

Проведя аналогичные рассуждения, получают коэффициент механической перегрузки АДДР

$$p_{м\partial} = \frac{\eta_{\partial}}{\eta_n} \times \frac{1 - \eta_{н,эл}}{1 - \eta_{эл\partial}} \times \frac{1}{1 - e^{-t/\kappa_T T}}, \quad (7)$$

где $\eta_{\partial}, \eta_{эл\partial}$ - КПД и электрический КПД АДДР при перегрузке

Двигатели будут полностью использованы по нагреву, если в кратковременном режиме АДКР загрузить мощностью $P = p_m P_n$, а АДДР – мощностью $P_d = p_{mo} P_n$. Отношение мощностей двигателей АДДР к мощностям двигателей АДКР при условии их полного использования по нагреву

$$\kappa_p = \frac{P_d}{P} = \frac{\eta_d}{\eta} \times \frac{1 - \eta_{эл}}{1 - \eta_{элд}} \times \frac{1 - e^{-t/T}}{1 - e^{-t/\kappa_T T}} \quad (8)$$

- отношение коэффициентов механической перегрузки двигателей. Исходными данными для расчётов являются рабочие характеристики двигателей, получаемые расчётными [1,3] и экспериментальными [4] методами.

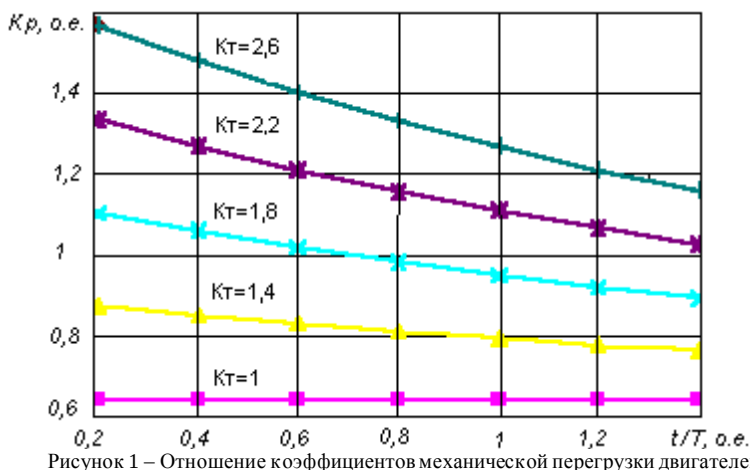


Рисунок 1 – Отношение коэффициентов механической перегрузки двигателей

На рисунке 1 показано отношение коэффициентов механической перегрузки (8) АД серии ДМШ номинальной мощностью 3 кВт. АДДР имеет преимущества по сравнению с АДКР в области $\kappa_p > 1$. С ростом отношения κ_T увеличиваются преимущества АДДР.

С увеличением мощности отношение постоянных времени нагрева АДДР к АДКР снижаются, поскольку уменьшаются удельные массы, привнесённые конструкцией ротора. Это отношение можно выразить приближённой полуэмпирической формулой $\kappa_T = 1 + 1,4 / \sqrt{P}$, где P – мощность, кВт. Отсюда следует, что при мощности 1 кВт отношение $\kappa_T = 2,4$, а при мощности 9 кВт – указанная величина уменьшается до 1,47.

В кратковременных режимах продолжительностью до 30 минут АДДР малой мощности работает при пониженных тепловых нагрузках.

Это позволяет заменить АДКР двигателем АДДР меньшей мощности, снизить массы и габариты привода.

3. Повторно-кратковременные режимы работы Одним из основных показателей приводов динамических режимов является допустимое число включений в час, при котором после большого числа циклов включение-отключение /ВО/ среднее превышение температуры будет равно допустимому. При этом двигатель оказывается полностью использованным по нагреву.

Если АДКР продолжительного режима работает с номинальной угловой скоростью при допустимом превышении температуры, мощность потерь, выделяемых в окружающую среду, равна потерям ΔP_n , а в периоды паузы при том же превышении температуры $\beta_o \Delta P_n$, где β_o - коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе. В среднем за время переходных процессов потери, выделяемые в окружающую среду, равны $(1 + \beta_o) \Delta P_n / 2$.

С другой стороны, потери энергии, выделяющиеся в двигателе за цикл, состоят из потерь энергии за время переходных процессов ΔA и потерь в установившемся режиме $\Delta P t_y$. Последние могут меняться в зависимости от нагрузки. Когда температура двигателя установилась, потери энергии, выделяющиеся в двигателе за цикл, равны энергии, рассеиваемой в окружающую среду:

$$\Delta A + \Delta P t_y = (1 + \beta_o) \Delta P_n t_g + \Delta P_n t_y + \beta_o \Delta P_n t_o. \quad (9)$$

Время цикла t_u включает время переходного процесса t_n (пуска, торможения, реверса), установившегося режима t_y и стоянку двигателя t_o , $t_u = t_n + t_y + t_o = 3600 / h$. Поскольку продолжительность включения $\varepsilon = (t_n + t_y) / t_u$, где h - допустимая частота включений в час, то $t_y = 3600 \varepsilon / h - t_n$ и $t_o = 3600(1 - \varepsilon) / h$. Подставляя эти значения в исходное уравнение (9) и решая его относительно h , получаем допустимую частоту включений АДКР:

$$h = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P) \varepsilon + \Delta P_n \beta_o (1 - \varepsilon)}{\Delta A - t_n [\Delta P + (1 + \beta_o) \Delta P_n / 2 - \Delta P_n]}. \quad (10)$$

Число допустимых включений АДДР получаем из (10) заменой потерь АДКР потерями АДДР:

$$h_o = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P_o) \varepsilon + \Delta P_n \beta_o (1 - \varepsilon)}{\Delta A_o - t_n [\Delta P_o + (1 + \beta_o) \Delta P_n / 2 - \Delta P_n]}. \quad (11)$$

Для АД вторыми членами знаменателей в выражениях (10) и (11) можно пренебречь по сравнению с ΔA и ΔA_o соответственно, так как они не превышают 2...4% этой суммы.

С учётом этого допущения, разделив выражение (10) на выражение (11), получают кратность числа допустимых включений или отношение циклов ВО:

$$k_h = \frac{h_o}{h} = \frac{\Delta A}{\Delta A_o} \times \frac{(1 - \Delta P_o / \Delta P_n) \epsilon + \beta_o (1 - \epsilon)}{(1 - \Delta P / \Delta P_n) \epsilon + \beta_o (1 - \epsilon)}. \quad (12)$$

Представив отношение потерь через коэффициент загрузки двигателя полезной мощностью и КПД $\Delta P_o / \Delta P_n = p_m \eta_n (1 - \eta_{\partial o}) / \eta_o (1 - \eta_{\partial n})$ и $\Delta P / \Delta P_n = p_m \eta_n (1 - \eta_{\partial}) / \eta (1 - \eta_{\partial n})$,

где h , h_o , η_o , $\eta_{\partial o}$ - КПД и электрический КПД АДКР и АДДР соответственно при установившейся нагрузке, из выражения (12) находится:

$$k_h = \frac{\Delta A}{\Delta A_o} \frac{[1 - p_m \eta_n (1 - \eta_{\partial o}) / \eta_o (1 - \eta_{\partial n})] \epsilon + \beta_o (1 - \epsilon)}{[1 - p_m \eta_n (1 - \eta_{\partial}) / \eta (1 - \eta_{\partial n})] \epsilon + \beta_o (1 - \epsilon)}. \quad (13)$$

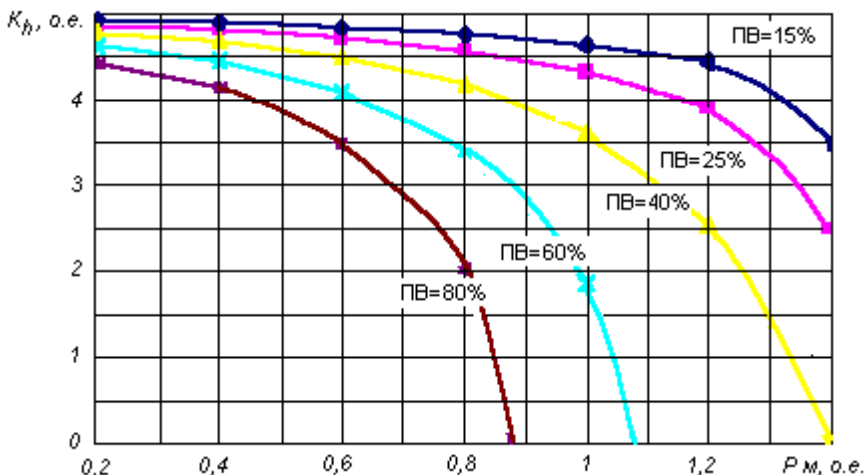


Рисунок 2 – Отношение циклов включение-отключение АД с независимой вентиляцией

На рисунке 2 изображена зависимость (13) в функции коэффициента загрузки p_m двигателей серии ДМШ номинальной мощностью 3 кВт при отношении пусковых потерь $\Delta A / \Delta A_o = 5$. Расчёт произведён для двигателей с независимой вентиляцией ($\beta_o = 1$) для различных значений продолжительности включения $ПВ\% = \epsilon \times 100\%$.

Отношение циклов включение-отключение существенно увеличивается для АДДР при соотношении потерь переходных процессов 4 - 5 при независимой вентиляции АД во всём диапазоне нагрузок при нормируемой продолжительности включения 15-60%. При снижении соотношения потерь и с переходом к системам самовентиляции АД ($\beta_o < 1$

) улучшение динамических характеристик возможно в нижнем диапазоне нагрузок и продолжительности включения.

Библиографический список

1. Могильников В.С. А.Н. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 120 с.
2. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 576 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
4. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин / Г.К. Жерве. — Л.: Энергоатомиздат Ленинградское отделение, 1984. — 408 с.

Поступила в редакцию 02.12.2001 г.