

УДК 621.313.33:004

К ВОПРОСУ О ДИАПАЗОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ И ПОТЕРЯХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАГРУЗКЕ И ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В статье предложена методика определения диапазона регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при частотном ее регулировании для вентиляторной нагрузки. Приведен анализ изменения потерь асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, диапазон регулирования скорости, жесткость механической характеристики, частотное регулирование, потери.

The article proposes the method for determining the speed control range of the induction motor with short-circuit rotor at frequency-controlled speed for fan load. The analysis of induction motor loss variation with frequency speed control is adduced.

Key words: induction motor, speed control range, rigidity of the speed-torque characteristic, frequency control, losses.

Введение

В статье [1] достаточно подробно рассмотрены вопросы, касающиеся диапазона регулирования скорости и потерь асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором при вентиляторной нагрузке и параметрическом регулировании скорости АД изменением напряжения питания обмоток его статора. Для сравнения эффективности методов изменения подачи воздуха вентилятором рассмотрим аналогичные вопросы при широко используемом в настоящее время частотном методе регулирования скорости АД с короткозамкнутым ротором для вентиляторной нагрузки.

Цель данной работы – провести теоретическую оценку возможного диапазона регулирования скорости и потерь АД при ее частотном методе регулирования для вентиляторной нагрузки.

Основная часть

Для достижения поставленной цели необходимо провести расчет и построение естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик АД при изменении по определенному закону частоты и амплитуды напряжения

питания обмоток статора, а затем на механическую характеристику АД наложить механическую характеристику вентилятора. Для упрощения анализа, расчет характеристик АД можно вести при постоянных параметрах его схемы замещения (СЗ) определенных для рабочего участка характеристик, так как при частотном регулировании скорости АД и вентиляторной нагрузке установившийся режим работы будет на рабочем участке механической характеристики АД $M=f(\omega)$, т.е. в точке пересечения ее рабочего участка с механической характеристикой вентиляторной нагрузки $M_c=f(\omega)$.

Тогда по известным классическим выражениям, приведенным в работах [2-6], рассчитаем механические $\omega=f(M)$ и электромеханические $\omega=f(I_1)$ характеристики АД:

$$M = \frac{3U_1^2 r_2'}{\omega_0 \alpha s \left((x_1 + x_2')^2 \cdot \alpha^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_{\mu}} \right)^2 \right)}; \quad (1)$$

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2}; \quad (2)$$

$$\omega = \omega_0 \alpha (1 - s); \quad (3)$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \cdot \alpha^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu \alpha}\right)^2}}; \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2 \cdot \alpha^2}}; \quad (5)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_1 + x_2'}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \cdot \alpha^2}}, \quad (6)$$

где M – момент, развиваемый АД, Н·м;
 U_1 – напряжение питания обмоток статора (фазное), В;

ω_0 – синхронная угловая скорость магнитного поля статора АД при номинальной частоте питающей сети, рад/с;

ω – угловая скорость ротора АД при определенном его скольжении, рад/с;

s – скольжение ротора АД, о.е.;

r_1 – активное сопротивление обмоток статора АД, Ом;

r_2' – активное сопротивление обмоток ротора АД, приведенное к обмотке статора, Ом;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазных обмоток статора АД, Ом;

x_2' – индуктивное сопротивление рассеяния фазных обмоток ротора АД, приведенное к обмотке статора, Ом;

x_μ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания СЗ АД, Ом;

I_1 – ток статора АД, А;

I_2' – расчетный ток обмотки ротора АД, приведенный к обмотке статора, А;

I_0 – намагничивающий ток АД, А;

$\sin \varphi_2$ – синус угла между вектором фазного напряжения питания обмоток статора и сопряженным вектором тока обмотки ротора АД, о.е.;

α – относительная частота напряжения питания обмоток статора, о.е.

Относительная частота напряжения питания обмоток статора вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}, \quad (7)$$

где $f_1, f_{1н}$ – регулируемая и номинальная частота напряжения питания обмоток статора АД, Гц.

Так как при частотном регулировании скорости АД для вентиляторной нагрузки используется, как правило, стандартный закон скалярного регулирования $U/f^2 = \text{const}$, означающий, что при любом значении ча-

стоты напряжения питания обмоток статора f_1 значение величины напряжения вычисляется по формуле

$$U_1 = \frac{U_{1н}}{f_1^2} f_1^2, \quad (8)$$

где $U_{1н}$ – номинальное напряжение питания обмоток статора АД, В.

Для определения установившейся угловой скорости АД на любой из его механических характеристик $\omega=f(M)$ при вентиляторной нагрузке запишем математическое выражение механической характеристики для вентилятора

$$M_c = M_0 + a_c \omega^x, \quad (9)$$

где M_0 – момент сил трения вентилятора, Н·м;

a_c – коэффициент, Н·м·с/рад;

x – показатель степени угловой скорости (для вентиляторов $x=2$).

Далее, приравнявая M и M_c выражений (1) и (9), с учетом выражения (3) из полученного равенства можно получить скольжение ротора АД s , соответствующее точке пересечения механических характеристик АД и вентилятора. Однако такое решение получить в общем виде достаточно сложно, и оно будет громоздким и неудобным в использовании при расчетах. Наиболее просто установившуюся скорость АД получить на естественной и искусственных механических характеристиках, если рабочие участки механических характеристик на отрезке скольжений между $s=0$ и критическим скольжением s_k описать уравнением прямой линии с использованием коэффициента жесткости k_β механической характеристики на этом отрезке скольжений $0 \dots s_k$.

Величины критического скольжения s_k и критического момента M_k получим известным методом из выражения (1), для чего продифференцируем его, т.е.

найдем $\frac{dM}{ds}$, а затем полученное выражение прирав-

няем к нулю. Тогда, решив полученное выражение относительно s_k , получим

$$s_k = r_2' \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{r_1}{x_\mu \alpha}\right)^2}{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2 \alpha^2}}. \quad (10)$$

Подставив выражение (10) вместо s в выражение (1) и проведя соответствующие преобразования, получим выражение критического момента

$$M_k = (3U_1^2) \times (2\omega_0 \alpha \times \left(r_1 + \sqrt{\left(r_1^2 + (x_1 + x_2')^2 \cdot \alpha^2 \right) \left(1 + \left(\frac{r_1}{x_\mu \alpha} \right)^2 \right)} \right))^{-1} \cdot (11)$$

Угловая критическая скорость АД ω_k при критическом скольжении его ротора s_k для различных ча-

стот напряжения питания обмоток статора f_1 будет определяться по формуле

$$\omega_k = \omega_0 \alpha (1 - s_k). \quad (12)$$

Далее запишем уравнение рабочего участка естественной механической характеристики АД

$$M(\omega) = k_\beta (\omega - \omega_0), \quad (13)$$

где коэффициент жесткости для рабочего участка естественной механической характеристики АД

$$k_\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{0 - M_H}{\omega_0 - \omega_0(1 - s_H)} = \frac{-M_H}{\omega_0 s_H}. \quad (14)$$

Учитывая, что при частотном регулировании скорости жесткость на рабочем участке искусственных механических характеристик АД $\omega=f(M)$ практически не меняется, т.е. остается такой же, как и на естественной характеристике, то аналогично выражению (13), можно записать уравнение рабочего участка искусственных механических характеристик АД при различной частоте напряжения питания обмоток его статора f_1 .

$$M(\omega) = k_\beta (\omega - \omega_0 \alpha). \quad (15)$$

Приравнявая M и M_c в выражениях (15) и (9) и решая их относительно скорости ω для конкретной частоты напряжения питания f_1 , получим точку пересечения механических характеристик АД и вентилятора и, соответственно, установившуюся скорость ω_y

$$M_0 + a_c \omega_y^2 = k_\beta (\omega_y - \omega_0 \alpha) \quad (16)$$

или

$$a_c \omega_y^2 - k_\beta \omega_y + M_0 + k_\beta \omega_0 \alpha = 0. \quad (17)$$

С учетом выражения (14)

$$a_c \omega_y^2 + \frac{M_H}{\omega_0 s_H} \omega_y + \left(M_0 - \frac{M_H \alpha}{s_H} \right) = 0. \quad (18)$$

Откуда

$$\omega_y = \frac{-\frac{M_H}{\omega_0 s_H} + \sqrt{\left(-\frac{M_H}{\omega_0 s_H} \right)^2 - 4a_c \left(M_0 - \frac{M_H \alpha}{s_H} \right)}}{2a_c}. \quad (19)$$

Полученная таким образом установившаяся скорость ω_y должна находиться на отрезке $\omega_0 \alpha - \omega_k$ механической характеристики АД для конкретной частоты напряжения питания f_1 .

Вычисление, построение и определение установившейся скорости ω_y АД и вентилятора будет проводиться при различных частотах f_1 на отрезке от $f_{1н}$ до 0 до тех пор, пока уравнение (19) будет иметь решение. Минимальное значение частоты f_1 , при которой выражение (19) будет иметь решение и будет определять нижнюю границу диапазона регулирования скорости при вентиляторной нагрузке. Верхнюю границу диапазона регулирования будет определять номинальная частота напряжения питания обмоток статора АД $f_{1н}$ при однозонном регулировании скорости или $f_1 > f_{1н}$ при двухзонном регулировании.

Все изложенное выше поясняет рисунок 1, на котором приведены естественные и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различной

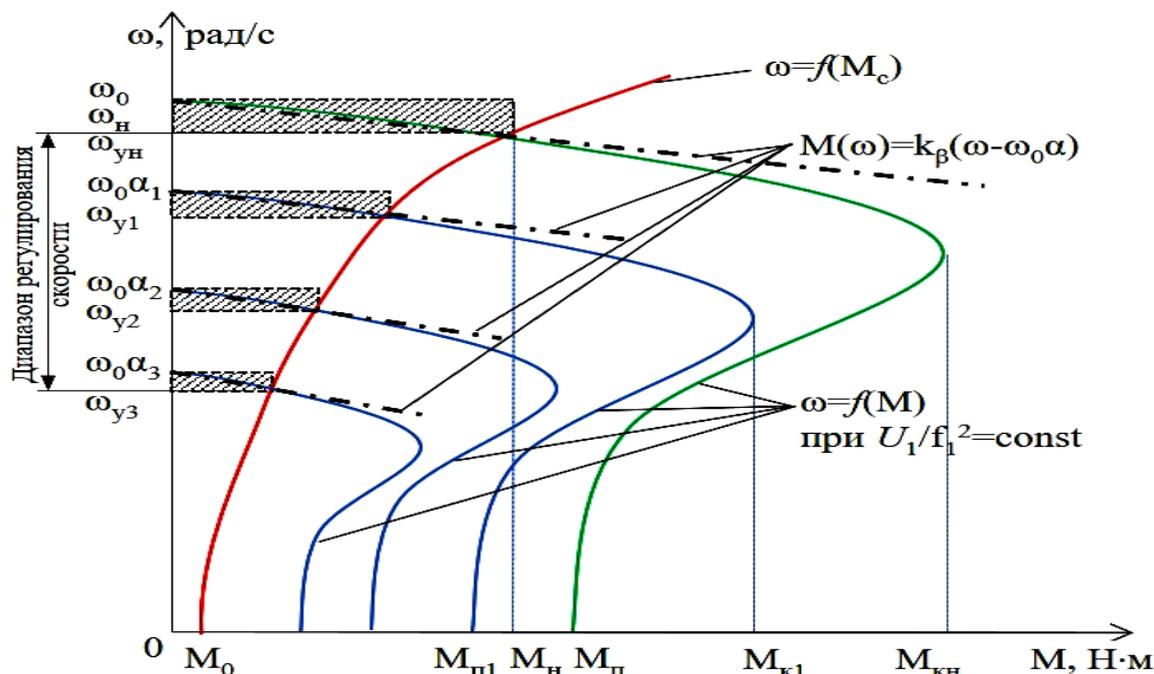


Рисунок 1. Естественная и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различной частоте напряжения питания его обмоток статора f_1 для закона регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и механическая характеристика вентиляторной нагрузки $\omega=f(M_c)$ при $1 > \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > 0$

частоте напряжения питания его обмоток статора и законе регулирования $U/f^2 = \text{const}$, а также механическая характеристика вентиляторной нагрузки $\omega = f(M_c)$.

Анализ полученных графических зависимостей (рис. 1) показывает, что частотное регулирование скорости АД при вентиляторной нагрузке обеспечивает широкий диапазон регулирования скорости, при этом с уменьшением частоты напряжение питания обмоток статора АД f_1 уменьшается, соответственно, и относительная частота, а также потери в обмотке ротора, которые эквивалентны площадям заштрихованных прямоугольников одной вершиной касающихся точек пересечения механических характеристик АД и вентилятора.

Для полной оценки энергоэффективности частотного регулирования скорости АД при вентиляторной нагрузке необходимо проанализировать суммарную мощность потерь ΔP в рассматриваемом электроприводе, состоящую из постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$ и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь [7,8]:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}. \quad (20)$$

Постоянные потери мощности в АД включают потери в стали статора $\Delta P_{\text{ст1}}$, потери в стали ротора $\Delta P_{\text{ст2}}$, потери в обмотке статора от протекания намагничивающего тока ΔP_{μ} и механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{ст2}} + \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\text{мех}}. \quad (21)$$

Потери в стали статора АД можно записать в виде

$$\Delta P_{\text{ст1}} = \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m, \quad (22)$$

где $\Delta P_{\text{ст1н}}$ – потери в стали статора АД в номинальном режиме работы, Вт;

Φ , $\Phi_{\text{н}}$ – текущее и номинальное значение магнитного потока, Вб;

m – показатель степени, принимающий значения $m=1,3-1,5$ в зависимости от сорта электротехнической стали.

Потери в стали ротора пропорциональны аналогичным потерям в статоре $\Delta P_{\text{ст1}}$ и зависят от скольжения ротора АД s

$$\Delta P_{\text{ст2}} = \Delta P_{\text{ст1}} \cdot s^m. \quad (23)$$

Потери мощности от протекания намагничивающего тока I_0 по обмотке статора АД выразим следующим образом:

$$\Delta P_{\mu} = 3I_0^2 r_1 = 3I_{0\text{н}}^2 r_1 \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\mu\text{н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2, \quad (24)$$

где $I_{0\text{н}}$ – намагничивающий ток в номинальном режиме работы АД, А;

$\Delta P_{\mu\text{н}}$ – потери мощности от намагничивающего тока в номинальном режиме работы АД, Вт.

Механические потери АД в большей степени определяются его вентилятором самоохлаждения,

поэтому принимают пропорциональными квадрату скорости

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 \approx \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2, \quad (25)$$

где $\Delta P_{\text{мехн}}$ – механические потери мощности в номинальном режиме работы АД, Вт.

Тогда в общем виде постоянные потери мощности равны

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пост}} &= \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m + \Delta P_{\text{ст1н}} \times \\ &\times \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m s^m + \Delta P_{\mu\text{н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + \\ &+ \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \alpha^m \times \\ &\times (1 + s^m) + \Delta P_{\mu\text{н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{мехн}} \alpha^2. \end{aligned} \quad (26)$$

Суммарные переменные потери АД можно определить, используя следующее выражение [8]:

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пер2}} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right), \quad (27)$$

где $\Delta P_{\text{пер2}}$ – переменные потери в роторе АД, Вт. Так как

$$\Delta P_{\text{пер2}} = M \omega_0 \alpha s, \quad (28)$$

то

$$\Delta P_{\text{пер}} = M \omega_0 \alpha s \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right). \quad (29)$$

Из анализа приведенных выражений постоянных (26) и переменных (29) потерь АД очевидно, что при частотном регулировании скорости АД составляющие постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ будут зависеть от их значений при номинальном режиме работы АД, а также от относительного изменения магнитного потока возбуждения двигателя $\Phi/\Phi_{\text{н}}$, изменения относительной частоты напряжения питания обмоток статора α , а постоянные потери в стали ротора $\Delta P_{\text{ст2}}$ от его скольжения s .

Переменные же потери $\Delta P_{\text{пер}}$ АД будут зависеть от значений момента M , синхронной угловой скорости магнитного поля статора ω_0 , относительной частоты напряжения питания обмоток статора α , скольжения ротора s и соотношения активных сопротивлений статора и ротора АД $\frac{r_1}{r_2'}$.

Учитывая, что магнитный поток АД

$$\Phi = \frac{E_1}{Kf_1} \approx \frac{U_1}{Kf_1}, \quad (30)$$

где E_1 – ЭДС обмоток статора АД, В;
 K – конструктивный коэффициент, о.е.

Тогда из анализа выражения (26) очевидно, что при постоянном магнитном потоке возбуждения АД, т.е. $\Phi = \Phi_n$, а это, как правило, обеспечивается при регулировании скорости, магнитный поток Φ не будет влиять на постоянные потери, а при уменьшении или увеличении магнитного потока они будут, соответственно, уменьшаться или увеличиваться.

Аналогично, изменения относительной частоты напряжения питания обмоток статора α и скольжения s АД влияют, как на постоянные, так и на переменные потери.

Заключение

1. Использование частотного регулирования скорости АД при вентиляторной нагрузке обеспечивает электроприводу широкий диапазон регулирования скорости при высокой статической устойчивости.

2. Однозонное частотное регулирование скорости АД при законе регулирования $U/f^2 = \text{const}$ и изменении относительной частоты напряжения питания обмоток статора α от 1 до 0,1 приводит, соответственно, к уменьшению как постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$, так и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь АД.

3. Так как при вентиляторной нагрузке и частотном регулировании скорости АД, скольжение его ротора s практически не изменяется, то для упрощения анализа потерь, в расчетах можно использовать $s = s_n$.

4. При двухзонном регулировании скорости АД для вентиляторной нагрузки, во второй зоне регулирования относительное изменение магнитного потока Φ/Φ_n будет уменьшаться, а относительная частота α будет увеличиваться, это расширяет диапазон регулирования скорости, но затрудняет анализ изменения постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ и приводит к необходимости увеличения мощности АД.

5. Использование частотного регулирования скорости АД при вентиляторной нагрузке и законе регулирования $U/f = \text{const}$ приводит к необоснованному увеличению как постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$, так и переменных

$\Delta P_{\text{пер}}$ потерь АД, что в конечном итоге снижает энергоэффективность электропривода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и параметрическом регулировании скорости / М.А. Прищепов // Агропанорама. – 2022. – № 3 (151). – С. 29-38.

2. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.

3. Чиликин, М.Г. Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.

4. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

5. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик АД с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном управлении скоростью и стабилизации потока возбуждения / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова, Д.М. Иванов // Агропанорама. – 2017. – № 2 (120). – С. 26-36.

6. Прищепов, М.А. Расчет предельных механических и электромеханических характеристик при частотном регулировании скорости в разомкнутой системе преобразователь частоты-асинхронный двигатель / М. А. Прищепов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2021. – № 5(147). – С.15-27.

7. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

8. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.08.2022