

# АНАЛИЗ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ Пониженной частоте питающей сети

УДК 621.313

С.П. Голиков

*Рассмотрена оптимизация работы автономных дизель-генераторных установок с целью экономии топлива и связанное с этим изменение условий работы основных потребителей электроэнергии - асинхронных двигателей.*

© Голиков С.П., 1999

Анализ работы дизель-генераторных установок (ДГУ), входящих в состав многих систем автономного электроснабжения (аварийное питание различных объектов, судовые вспомогательные дизель-генераторы и др.), показал, что их загрузка составляет в среднем 60 - 70%, в то время как наивысший КПД подобных установок достигается при загрузке 85 - 90% [3]. При этом приводные двигатели вынуждены работать с номинальной скоростью из-за требования поддержания частоты в питаемой сети. Работа ДГУ в таких режимах сопровождается многими отрицательными явлениями:

- неэффективный расход топлива;
- повышенный расход масла;
- сокращение срока службы деталей

цилиндропоршневой группы.

Для улучшения показателей предлагается при длительной работе ДГУ с пониженной нагрузкой снижать подачу топлива для уменьшения частоты вращения. Следует отметить, что большинство ДГУ снабжены отдельными системами регулирования частоты и напряжения. Напряжение поддерживается на постоянном уровне изменением тока возбуждения генератора, а частота синхронного генератора регулируется установкой необходимой скорости дизеля. При снижении частоты вращения дизеля напряжение остается на прежнем уровне благодаря форсировке возбуждения, снижение же частоты ничем не компенсируется, и это ведет к изменению режимов работы потребителей электроэнергии. Для активной нагрузки (освещение, нагрев, полупроводниковые преобразователи) снижение частоты не приводит к изменению характеристик, так как параметры такой нагрузки зависят только от действующего значения напряжения. Но существует вторая, наиболее распространенная группа электропотребителей асинхронные двигатели (АД), — на их долю приходится до 70% всей потребляемой энергии. Снижение частоты приводит к значительным изменениям в их работе.

Следует учесть, что предполагаемый режим работы, когда  $U = U_n = \text{const}$ ,  $f = \text{var}$ , является для АД исключением из классических законов регулирования скорости двигателя (закон Костенко:  $U/f = \text{const}$ , [1]). В основной научной и учебной литературе этот режим не рекомендуется для длительной работы АД. Но в данном случае речь идет не о глубоком регулировании, а о вынужденном снижении частоты питающей сети (что также может происходить и в непредвиденных случаях).

Рассмотрим процессы, происходящие в АД при таких условиях работы.

Если двигатель с постоянным моментом сопротивления на валу, не зависящем от скорости, питается от сети с номинальным напряжением, но пониженной частоты увеличивается его магнитный поток и вращающий момент. Момент сопротивления остается постоянным, и поэтому скольжение уменьшается до величины, соответствующей равновесию моментов. Вследствие увеличения потока возрастает ток намагничивания, а ток ротора снижается. Результирующий ток статора может при этом увеличиваться, а может и снижаться в зависимости от значения момента сопротивления, соотношения между токами ротора и намагничивающим током. Таким образом, нельзя однозначно судить об изменениях параметров АД при чисто частотном регулировании, так как характер их изменения определяется не только выбранным законом регулирования, но и от АД, его загрузки.

Проведем качественный анализ изменения параметров АД.

Для определения механических характеристик электродвигателя воспользуемся известным выражением для максимальной электромагнитной мощности. При изменяющихся параметрах электроэнергии она представляется выражением:

$$P_{ам} = \frac{k_u^2}{k_f} \cdot \frac{U_{лн}^2}{2C_1 \left[ \frac{R_1}{k_f} + \sqrt{\left( \frac{R_1}{k_f} \right)^2 + x_k^2} \right]} = \frac{k_u^2}{k_f} \cdot (P_{ам})_н, \quad (1)$$

где  $k_u, k_f$  — относительные напряжение и частота.

Вследствие небольших значений  $R_1$  положим  $\frac{R_1}{k_f} \approx R_1$ . На основании выражения (1) получим формулу для кратности максимального момента:

$$K_m = \frac{M_m}{M_n} = \frac{P_{ам}}{k_f P_{ан}} \approx \frac{k_u^2}{k_f^2} \cdot \frac{(P_{ам})_н}{P_{ан}} = K_{mn} \frac{k_u^2}{k_f^2}. \quad (2)$$

где  $K_{mn}$  — кратность максимального момента в номинальном режиме.

Используя известную формулу

$$S_k = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} \quad (2a)$$

и пренебрегая активным сопротивлением обмотки, получаем выражение для критического скольжения:

$$S_k \approx \frac{S_{кн}}{k_f}, \quad (3)$$

где  $S_{кн}$  — критическое скольжение в номинальном режиме.

Таким образом, на основании формулы Клосса и соотношений (2) и (3) получаем выражение для относительного момента при изменяющихся параметрах сети.

$$M^* = \frac{M}{M_n} = \frac{2K_{mn} \frac{k_u^2}{k_f^2}}{\frac{S_{кн}}{k_f S} + \frac{k_f S}{S_{кн}}}. \quad (4)$$

Проанализируем, каким образом изменится работа АД в предполагаемых условиях с точки зрения перегрузочной способности и устойчивости на рабочем участке механической характеристики. Из формулы (2) следует, что кратность максимального момента обратно пропорциональна квадрату относительной частоты и прямо пропорциональна квадрату относительного напряжения, т.е. при работе с номинальным напряжением сети и пониженной частотой перегрузочная способность увеличивается.

Для определения характера изменения жесткости рабочего участка характеристики, которая характеризует устойчивость, необходимо из (4) получить выражение для частоты вращения двигателя в зависимости от момента. Для этого необходимо использовать выражение скольжения  $S$  для любого значения частоты

$$S = 1 - \frac{n}{n_0 \cdot k_f} \quad (5)$$

где  $n_0$  — синхронная частота вращения при номинальной частоте. Тогда

$$n = \frac{1}{2M^*k_f^2} \left( 2M^*k_f^3n_0 - 2K_{мн}k_u^2S_{кн}n_0 + 2\sqrt{K_{мн}^2k_u^4S_{кн}^2n_0 - M^{*2}k_f^4S_{кн}^4n_0^2} \right). \quad (6)$$

Полученная формула носит название обратной формулы Клосса и может быть использована для компьютерного расчета механической характеристики АД на рабочем участке.

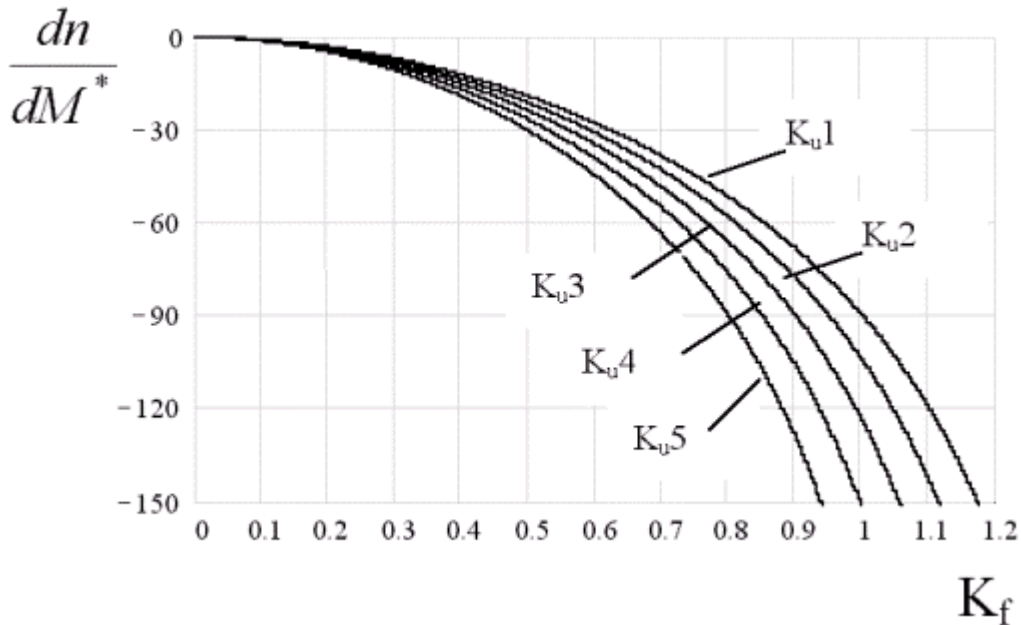


Рис.1 Зависимость производной от параметров сети.

$K_{u1} = 1, K_{u2} = 0,95, K_{u3} = 0,9, K_{u4} = 0,85, K_{u5} = 0,8.$

Математически жесткость рабочего участка характеристики определяется производной

$\frac{dn}{dM^*}$ . На рис.1 приведены графики зависимости производной от относительной частоты при различных значениях напряжения.

Из графика видно, что при  $k_u = k_f$  жесткость рабочего участка характеристики не меняется. При условии  $k_u < k_f$  жесткость увеличивается, при  $k_u > k_f$  уменьшается, т.е. в предполагаемом режиме работы со снижением частоты будет повышаться не только перегрузочная способность, но и устойчивость работы АД.

Как уже отмечалось выше, работа двигателя при выбранном законе регулирования будет зависеть не только от параметров сети, но и от заводских характеристик самого двигателя. Для оценки совокупности этих факторов воспользуемся понятием коэффициента сопротивления, предложенного в работе [2],

$$K_c = \frac{M_m}{M_c} = \frac{K_{мн}}{M_c^*} \cdot \frac{k_u^2}{k_f^2} \quad (7)$$

где  $M_c^*$  — относительный момент сопротивления на валу двигателя.

Формула (6) не удобна для практических расчетов, поэтому для определения производительности механизмов, используя (7) из формулы (4), получим более простое выражение для скольжения

$$S = \frac{S_{кн}}{k_f \left( K_c + \sqrt{K_c^2 - 1} \right)} \quad (8)$$

На основании (8) с учетом того, что  $K_c > 2$ , получим выражение для частоты вращения двигателя:

$$n_2 = n_1(1 - S) = k_f n_o \left( 1 - \frac{S_{\text{кн}}}{2K_c k_f} \right).$$

При определении электрических параметров электродвигателя важную роль играет, каким образом учитывается намагничивание машины. Известно, что при увеличении магнитного потока возрастает ток намагничивания  $I_0$ , характеристикой этого процесса является кривая намагничивания, или характеристика холостого хода машины. Характеристики холостого хода, построенные в относительных единицах для различных электродвигателей обычного исполнения, совпадают. Для расчетов воспользуемся характеристикой холостого хода, приведенной на рис.2.

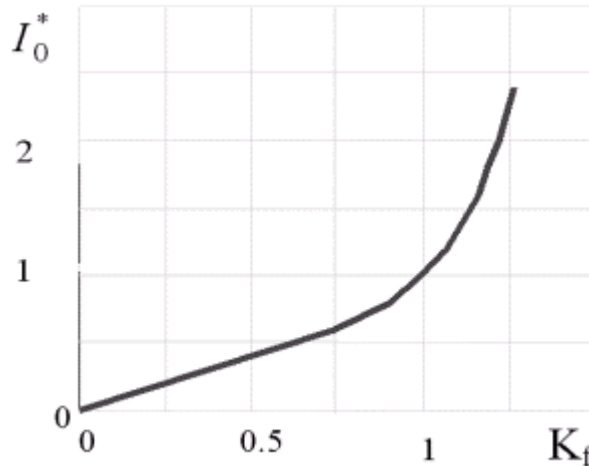


Рис.2 Кривая намагничивания

Для удобства расчетов характеристик АД на ПЭВМ данную кривую необходимо представить в виде интерполяционного многочлена. С достаточной точностью в области "колена" исходная кривая аппроксимируется многочленом 4-й степени. На основании расчетов получено аналитическое выражение тока намагничивания электродвигателя:

$$I_o^* = 0,007379 - 1,6768 \cdot \left( \frac{K_u}{K_f} \right)^1 + 10,4752 \cdot \left( \frac{K_u}{K_f} \right)^2 - 13,7062 \cdot \left( \frac{K_u}{K_f} \right)^3 + 5,8699 \cdot \left( \frac{K_u}{K_f} \right)^4 \quad (9)$$

Основным параметром асинхронного двигателя, характеризующим его энергетические качества, является ток статора. Его можно представить в виде геометрической суммы активной и реактивной составляющих:

$$I_1 = \sqrt{(I_o \sin \varphi_o + I_2 \sin \varphi'_n)^2 + (I_o \cos \varphi_o + I_2' \cos \varphi')^2}$$

где:

$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_n = I_o \cos \varphi_o + I_2' \cos \varphi'$  — активная составляющая

$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_n = I_o \sin \varphi_o + I_2 \sin \varphi'_n$  — реактивная составляющая.

Без учета активных потерь холостого хода, т.е. если  $\sin \varphi_o \approx 1$ ,  $\cos \varphi_o \approx 0$ ,

$$I_1 = \sqrt{(I_o \sin \varphi_o + I_2 \sin \varphi'_n)^2 + (I_o \cos \varphi_o + I_2' \cos \varphi')^2} \quad (10)$$

Для определения токов двигателя необходимо определить закон изменения угла сдвига фаз между током ротора и напряжением сети. Его можно определить, пользуясь схемой замещения АД и выражением для скольжения через параметры схемы замещения:

$$I_1 = \sqrt{(I_o + I_2' \sin \varphi')^2 + I_2' \cos \varphi'} \quad (11)$$

На основании (8):

$$\operatorname{tg} \varphi' \approx \frac{1}{K_c + \sqrt{K_c^2 - 1}}$$

Пользуясь известными тригонометрическими соотношениями, определяем:

$$\begin{aligned} \sin \varphi' &= \frac{1}{\sqrt{2 K_c (K_c + \sqrt{K_c^2 - 1})}}; \\ \cos \varphi' &= \sqrt{\frac{K_c + \sqrt{K_c^2 - 1}}{2 K_c}}. \end{aligned} \quad (12)$$

В номинальных условиях ток ротора можно определить, используя параметры двигателя,

$$I_{2н}' = \frac{U_{1н}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{c_1 r_2'}{S_n}\right) + x_k^2}}.$$

Пренебрегая активным сопротивлением статора, на основании схемы замещения с учетом (2а) можно определить ток ротора в любом режиме:

$$I_2' = I_{2н}' \cdot \frac{k_u}{k_f} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{S_k}{S_n}\right)^2}{1 + \left(\frac{S_k}{K_f S}\right)^2}}.$$

Из формулы Клосса, с учетом (2а) и (8), получаем:

$$1 + \left(\frac{S_k}{S_n}\right)^2 = 2 K_{mn} (K_{mn} + \sqrt{K_{mn}^2 - 1}) \cdot 1 + \left(\frac{S_k}{K_f S}\right)^2 = 2 K_c (K_c + \sqrt{K_c^2 - 1}) \quad (13)$$

$$\frac{K_{mn}}{K_c} = M_c^* \cdot \frac{k_f^2}{k_u^2}$$

Учитывая  $\frac{K_{mn}}{K_c} = M_c^* \cdot \frac{k_f^2}{k_u^2}$ , получим выражение для тока ротора при изменяющихся параметрах сети:

$$I_2' = I_{2н}' \sqrt{M_c^* \frac{K_{mn} + \sqrt{K_{mn}^2 - 1}}{K_c + \sqrt{K_c^2 - 1}}} \quad (14)$$

Пользуясь определением реактивной составляющей тока статора, получим выражение для номинального значения тока ротора

$$I_{2н}' \approx \frac{I_{1н} \cos \varphi_n}{\cos \varphi'} \quad (15)$$

В номинальных условиях

$$I_{2н}' \approx I_{1н} \cos \varphi_n \sqrt{\frac{2 \cdot K_{mn}}{K_{mn} + \sqrt{K_{mn}^2 - 1}}} \quad (15)$$

Аналогично можно получить выражение для номинального значения тока намагничивания:

$$I_{OH} = I_{1H} \left( \sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{K_{mH} + \sqrt{K_{mH}^2 - 1}} \right). \quad (16)$$

Для определения тока намагничивания в ненормальных условиях необходимо воспользоваться аналитическим выражением тока намагничивания

$$I_0 = I_0^* \cdot I_{0H\delta} \quad (17)$$

где  $I_0^*$  — рассчитывается при помощи (9).

Подставляя выражения (12)-(17) в (10), можно получить выражение для расчета тока статора.

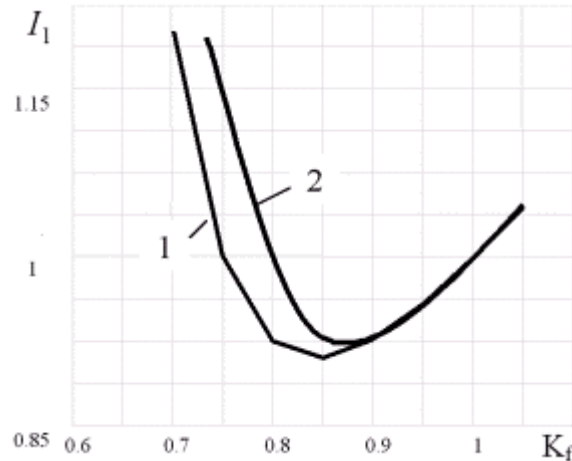


Рис. 3 Зависимость тока двигателя от частоты

По полученным формулам построена зависимость тока двигателя типа АОМ от частоты при номинальном напряжении (рис.3). На графике (кривая 1) отчетливо видно, что при снижении частоты ток сначала снижается и после достижения минимального значения резко возрастает. Были также проведены испытания на физической модели. Двигатель получал питание от синхронного генератора, приводимого во вращение дизелем. Частота тока генератора устанавливалась при помощи рейки топливного насоса, а напряжение — при помощи возбуждения генератора. Нагрузкой АД служил генератор постоянного тока, в качестве нагрузки генератора использован нагревательный элемент. Нагрузка двигателя регулировалась посредством изменения возбуждения ГПТ. В ходе опытов производилось снижение частоты тока СГ, его напряжение поддерживалось на постоянном уровне 380 В. При этом снимались значения тока двигателя, потребляемой мощности и его скорости. В настоящей работе интерес представляет зависимость тока двигателя от частоты. Опытная кривая (кривая 2, рис.3) имеет некоторое расхождение с расчетной из-за упрощенного учета намагничивания машины. При этом общая картина изменения тока не меняется.

Используя полученные выражения для тока статора и ротора, можно получить законы изменения активной и реактивной мощности потребляемой АД.

При изменении параметров питающей сети будут изменяться также величины потерь энергии как в меди, так и в стали электрических машин. Потери в меди связаны со значением полного тока, протекающего по обмоткам. С его снижением потери уменьшаются пропорционально квадрату тока.

Удельные потери в стали могут быть определены с помощью известного соотношения:

$$\Delta P_c = \left[ \delta_c \frac{f}{100} + \delta_{cm} \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{B}{1000} \right)^2,$$

где  $B$  — индукция.

При  $f = 50$  Гц для стандартной электротехнической стали ( $\delta_{m\phi} = 5,6$  Вт/кг и  $\delta_m = 4,4$ ) в номинальном режиме потери в стали составят:

$$\Delta P_{сн} = 3,6 \left( \frac{B_{н}}{1000} \right)^2$$

Отношение потерь определяем по формуле:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_{н}} = \left( \frac{B}{B_{н}} \right)^2 \cdot \frac{4,4 \cdot \frac{f}{100} + 5,6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2}{3,6} = \frac{k_u^2}{k_f} (0,61 + 0,39 k_f), \quad (18)$$

так как  $\frac{B}{B_{н}} = \frac{k_u}{k_f}$  и  $\frac{f}{100} = \frac{k_f}{2}$ .

Из рис.4 видно, что при снижении частоты на 20% при номинальном напряжении потери в стали возрастают всего на 15%. Однако возрастание потерь в стали компенсируется снижением потерь в меди.

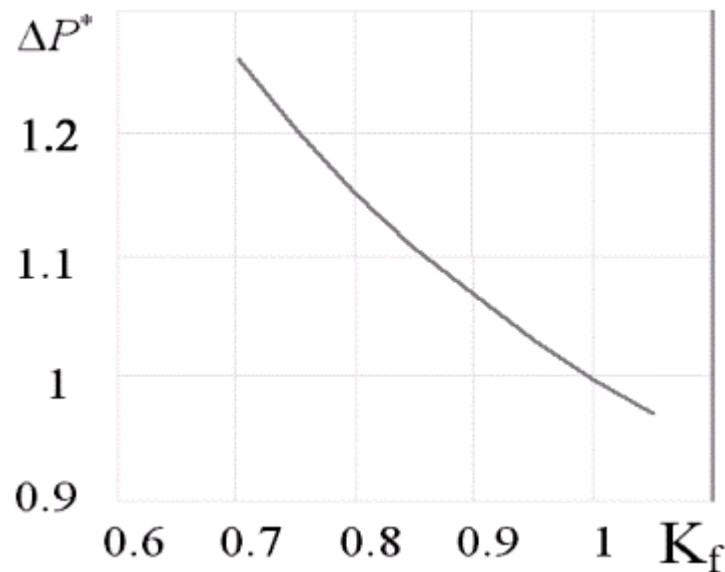


Рис.4 Электрические потери при регулировании частоты

Таким образом, при вынужденном снижении частоты питающей сети до 80% асинхронный двигатель может работать в условиях более легких, чем в номинальном режиме, так как при таком снижении частоты ток статора снижается до 90%, уменьшая нагрев машины.

#### Список использованной литературы

1. Костенко М.П. Электрические машины. Спецчасть - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1949. - 712 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. - М.: Энергоиздат, 1984. - 240 с.
3. Титов В.В., Голиков С.П. Оптимизация работы судового комплекса "ДИЗЕЛЬ - ВИНТ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА" // Рыбное хозяйство Украины.- 1998.- № 1.- С. 49 - 51.