

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ “АСИНХРОННЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС”

К.К. Келебаев

Разработана математическая модель и методика расчета характеристик асинхронного вентильного двигателя в электроприводе центробежных насосов.

Ключевые слова: асинхронный вентильный двигатель; инверторная обмотка; естественная и искусственная коммутация выпрямителя и инвертора; приведенный энергетический показатель.

Асинхронный вентильный двигатель (АВД) представляет собой, в сущности, двигатель с фазным ротором, обмотка которого питается через выпрямитель, дроссель и инвертор от дополнительной (инверторной) обмотки, уложенной на статоре [1]. При разработке математической модели системы “АВД – насос” были использованы полученные ранее результаты исследования электрических и энергетических функциональных зависимостей в АВД [2, 3], исследования напорных, механических и энергетических характеристик системы “насос – трубопровод” [4]. Для получения всей совокупности электромеханических и энергетических соотношений в системе “АВД – насос” был выбран численный инерционный метод, который является хорошим инструментом исследования сложных физических процессов. При его использовании основная часть решения задачи сводится к формированию системы уравнений, адекватно отображающей физические процессы.

Электромагнитная мощность P_{δ} передается со статора на ротор магнитным потоком Φ , распределение магнитной индукции которого по расточке статора будем аппроксимировать рядом Фурье, записанном в численном виде в осях d и q , вращающихся синхронно с полем статора:

$$B_{\delta} = \sum_v \left[B_{\delta vd} \sin\left(\frac{v2\pi}{N} x\right) + B_{\delta vq} \cos\left(\frac{v2\pi}{N} x\right) \right], \quad (1)$$

где $B_{\delta vd}, B_{\delta vq}$ – амплитуды v -ых гармонических магнитной индукции по продольной и поперечной осям; N – число интервалов, на которое разбивается окружность рачотки статора; $x = 0, 1, 2, \dots, N-1$ – текущая пространственная координата; $v = pk, k = 1, 3, 5, \dots, M$.

Гармонические составляющие магнитной индукции известны либо из результатов предыдущего итерационного цикла, либо (в первом итерационном цикле) из результатов прогноза согласно выражений:

$$E_1 = k_E U_1; \quad k_E = 0,96 \div 0,99; \quad B_{\delta 1} = E_1 / k_{e1}; \quad k_{e1} = \sqrt{2\pi} f_1 w_1 k_{01} D l / p, \quad (2)$$

где D, l – внутренний диаметр и длина сердечника; $B_{\delta(v>p)} = 0$; p – число пар полюсов; E_1, k_{e1} – ЭДС и обмоточный коэффициент обмотки статора.

Электромагнитная мощность и механический момент:

$$P_{\Omega} = M_{MX} \cdot \Omega_1; \quad M_{MX} = M = M_B + M_0, \quad (3)$$

где M_{MX}, M, M_B, M_0 – моменты: механический, электромагнитный, на валу, холостого хода;

$$\Omega_1 = 2\pi \cdot n_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}.$$

ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора:

$$E_{2s} = k_{e2} \cdot B_{\delta 1}; \quad k_{e2} = \sqrt{2\pi} \cdot f_1 \cdot s \cdot w_2 \cdot k_{02} \frac{D l}{p}. \quad (4)$$

Активная составляющая тока ротора:

$$I_{2a} = \frac{P_{\Omega}}{3 \cdot E_{2s}}. \quad (5)$$

Выпрямленный ток:

$$I_d = I_{2a} \frac{2 \cdot (\pi / \sqrt{6})}{1 \pm \sqrt{1 - (2\pi / 3) x_{k2^*} \cdot I_{2a^*}}, \quad (6)$$

где $x_{k2^*} = \frac{I_{2a} x_{k2}}{E_{2k}} \approx \frac{I_{1H} x_k}{u_1}$ – относительное индуктивное сопротивление короткого замыкания, приведенное к активной составляющей тока обмотки ротора.

Действующее значение тока обмотки ротора определяется по кривой мгновенных значений; аппроксимируя изменение тока на интервале угла коммутации по линейному закону, получим:

$$I_{2D} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\gamma} \left(\frac{I_d \theta}{\gamma} \right)^2 d\theta + \int_{\gamma}^{\frac{2\pi}{3}} I_d^2 d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3} + \gamma} \left(I_d - \left(\frac{I_d \theta}{\gamma} \right) \right)^2 d\theta \right]}. \quad (7)$$

После преобразований и упрощений получаем:

$$I_{2D} = k_D I_d, \quad (8)$$

где $k_D = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\gamma}{3\pi}}$.

Значение угла γ для предельных значений $x_{k2^*} = 0,1 \div 0,2$ находятся в пределах $0 \div 0,7$ радиан. После подстановки значений γ в (8) получаем пределы изменения коэффициента $k_D \div k_{D\bar{}} = 0,815$ – при идеальной коммутации ($\gamma = 0$), искусственно-идеальной коммутации ($\gamma \approx 0$); $k_{D\bar{}} = 0,777$ – при естественной коммутации в номинальном режиме. Принимая во внимание узкий диапазон изменения коэффициента $k_{D\bar{}}$ в инженерных расчетах привода насоса можно использовать универсальное упрощенное значение $k_{D\bar{}} = 0,79$.

Потери в обмотке ротора

$$P_{M2} = 3 I_{2D}^2 r_2. \quad (9)$$

Мощность выпрямителя

$$P_d = P_S - P_{M2} - \Delta U_B I_d, \quad (10)$$

где ΔU_B – падение напряжения на вентилях.

С другой стороны, мощность выпрямителя

$$P_d = U_d I_d, \quad (11)$$

где U_d – напряжение на выходе выпрямителя.

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{2k} \cdot s \cdot \cos \alpha - \frac{3}{\pi} x_{2k} \cdot s \cdot I_d - 2r_2 \cdot I_d, \quad (12)$$

откуда формируется уравнение для мощности выпрямителя:

$$P_S - U_d I_d - P_{M2} - \Delta U_B I_d = 0. \quad (13)$$

Или для i -го итерационного цикла:

$$P_{si} - U_{di} I_{di} - P_{M2i} - \Delta U_B I_{di} < \varepsilon, \quad (14)$$

где ε – допустимое значение коэффициента погрешности.

Реактивная мощность обмотки ротора:

$$Q_2 = 3 \cdot E_{2k} \cdot I_{2x}, \quad (15)$$

где $I_{2x} = I_{2a} \cdot \frac{2}{1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\pi}{3} x_{k2*} \cdot I_{2a*}}} \sin \gamma_a$ – реактивная составляющая тока ротора.

ЭДС, индуцируемая в инверторной обмотке, равна:

$$E_3 = K_{e3} \cdot B_{\delta 1}, \quad (16)$$

где $k_{e3} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot w_3 \cdot k_{03} \cdot D \cdot l / p$.

Электромагнитная мощность инверторной обмотки (мощность рекуперации):

$$P_3 = P_S - P_{M2} - P_{др} - P_{M3} - \Delta U_B I_d - \Delta U_U \cdot I_d, \quad (17)$$

где $P_{M3} = 3I_d^2 \cdot k_d^2 r_3$

Угол управления вентилями инвертора:

$$\beta = \arccos \beta, \quad (18)$$

где $\cos \beta = \left(U_D - \frac{3}{\pi} x_{k3} I_d - 2r_3 I_d \right) / U_{D0}$; $U_{D0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_3$.

Реактивная мощность инверторной обмотки:

$$Q_2 = 3 \cdot E_3 \cdot I_{3x}, \quad (19)$$

где $I_{3x} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \cdot \sin(\beta - \gamma_a)$ – реактивная составляющая тока инверторной обмотки.

На основе математической модели системы “АВД – насос” была разработана методика и программа расчета интегральных энергетических, технических показателей и характеристика АВД в электроприводе насоса.

В качестве объекта исследования выбран АВД, разработанный на базе асинхронного двигателя АК-13-59-94 мощностью $P = 1200$ кВт, $U = 3000$ В, $n_1 = 1500$ об/мин. Соединение концов обмотки статора – треугольник. Фазное значение тока $I_{1\phi} = 162$ А. При разработке АВД размеры корпуса, щитов, а также сердечника статора и ротора были оставлены без изменения. Заменялась лишь обмотка статора и электротехническая сталь сердечника заменена на лучшую – на сталь 2414. Число пазов на полюс и фазу в исходном двигателе $q = 5$, в АВД один паз из пяти отводится под инверторную обмотку. Число витков обмотки статора $w_1 = 96$, число витков инверторной обмотки $w_3 = 8$, число витков обмотки ротора $w_2 = 24$. Номинальный ток инверторной обмотки принят равным номинальному току обмотки ротора. Величина плотности тока в инверторной обмотке принята равной плотности тока в обмотке статора $J_{10} = J_3 = 4$ А/мм². Все конструкционные данные выбраны на основе оптимизационных расчетов на ЭВМ, выполненных с использованием разработанной программы.

АВД принципиально может работать в различных режимах управления выпрямителем и инвертором: “неуправляемый выпрямитель – инвертор с естественной коммутацией”, “выпрямитель и инвертор с естественной коммутацией”, “неуправляемый выпрямитель – инвертор с искусственной коммутацией” и, наконец, “выпрямитель и инвертор с искусственной коммутацией”. На рис. 1 приведены результаты расчета изменения тока статора при регулировании частоты вращения АВД в указанных выше режимах.

Как видно из приведенных на рис. 1 зависимостей, в АВД практический интерес представляют следующие режимы управления: “выпрямитель и инвертор с искусственной коммутацией” (кривая 1, при условии $I_f = \min$) и “неуправляемый выпрямитель – инвертор с искусственной коммутацией” (кривая 2), причем первый из них является наиболее оптимальным. В режиме “неуправляемый выпрямитель – инвертор с искусственной коммутацией” (кривая 3) при номинальной частоте вращения ток статора больше номинального, что исключает его практическую реализацию.

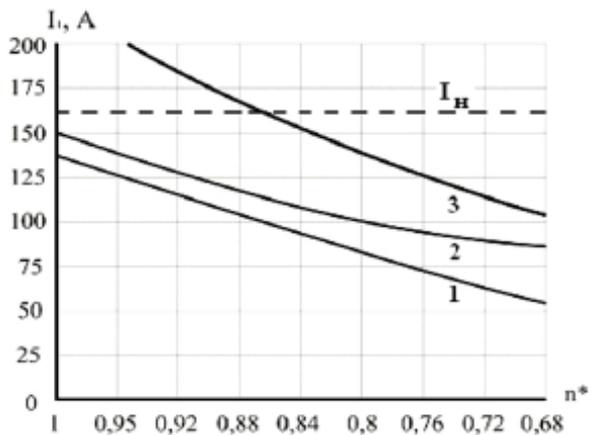


Рис. 1. Изменение тока статора в функции частоты вращения АД в различных режимах управления вентилями выпрямителя и инвертора

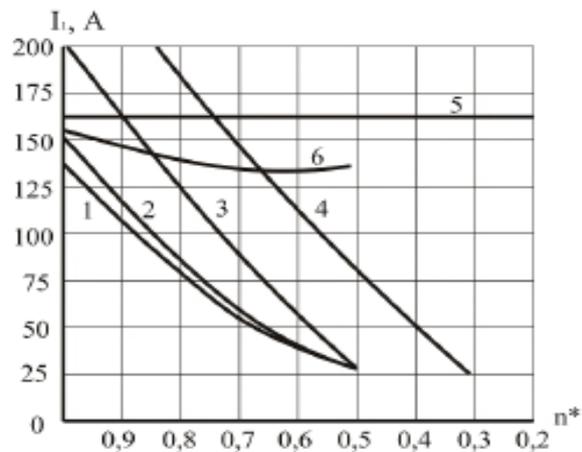


Рис. 2. Изменение тока статора АД в функции частоты вращения: 1, 2, 3, 4 – $\alpha = 0, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$; 5 – при $I_2 = I_{2H} = const$; 6 – номинальное значение тока статора

Поскольку наиболее благоприятным является режим искусственной коммутации и выпрямителя и инвертора, то ниже приводится исследование энергетических показателей и регулировочных характеристик именно для этого режима работы. Следует отметить, что в указанном случае имеется большой выбор режимов управления выпрямителем и инвертором при регулировании частоты вращения ротора АД.

На рис. 2 приведены зависимости изменения тока статора в функции частоты вращения для ряда постоянных значений углов управления выпрямителем (регулирование частоты вращения производится изменением угла управления инвертором – β). Область практически возможных законов регулирования сверху ограничивается кривой 5 изменения тока статора из условия постоянства тока ротора $I_2 = I_{2H} = const$, а снизу – минимально возможным при регулировании ток статором (кривые 1, 6).

Как видно, область возможных законов управления выпрямителем и инвертором очень широкая. В реальных условиях она должна определяться конкретными требованиями к энергетическим показателям АД и к приводу (например, диапазон регулирования частоты вращения АД).

За критерий энергетического показателя рационально взять обобщенный приведенный энергетический показатель, который интегрирует коэффициент полезного действия, коэффициент мощности АД, потери в нем и сокращение (увеличение) потерь в системе за счёт эксплуатации привода:

$$\mathcal{E}_\Pi = \frac{\eta}{1 + C_E (tg \varphi - tg \varphi_0)}$$

Коэффициенты сокращения (увеличения) потерь в системе на 1 кВА отданной (потреблённой) реактивной мощности в зависимости от режима работы конкретной сети находятся в пределах $C_E = 0,05 \div 0,1$, а $\cos \varphi_0 = 0,8 \div 0,9$.

На рис. 3 приведены кривые изменения приведенного обобщенного коэффициента в функции частоты вращения АД для двух режимов работы: $I_2 = I_{2H} = const$ и $I_1 = min$. Для каждого из этих режимов рассматривают два предельных варианта: 1. $C_E = 0,1, \cos \varphi = 0,8$; 2. $C_E = 0,05, \cos \varphi_0 = 0,9$.

Анализ полученных результатов показывает, что наилучший приведенный энергетический показатель обеспечивает режим работы при управлении выпрямителями и инверторами из условия $I_2 = I_{2H} = const$, т.е. по закону кривой $I_1 = f(I_2 = const)$ (кривая 6, рис. 2). При этом режиме управления приведенный энергетический показатель значительно выше 100%.

Последнее физически означает, что экономия электрической энергии от сокращения потерь в системе энергоснабжения за счёт генерации реактивной мощности оказывается больше потерь самого АД. Это подтверждается и кривой генерации реактивной мощности, приведённой на рис. 4.

Проведенные расчеты показали, что КПД самого АД остается очень высоким во всём практически требуемом диапазоне регулирования частоты вращения насоса.

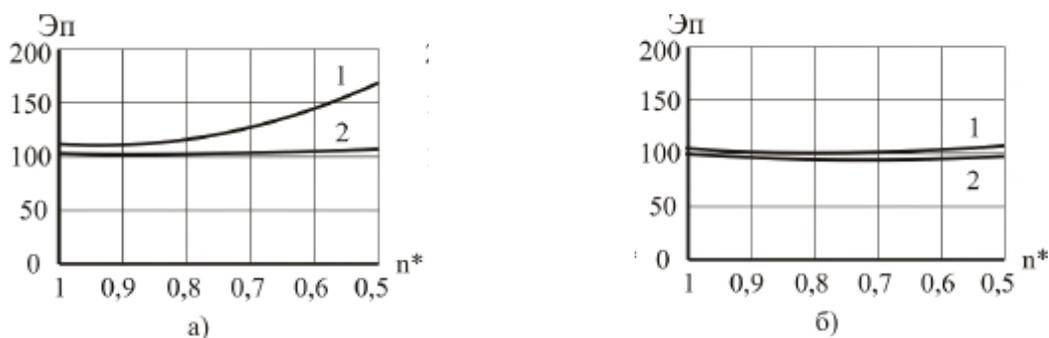


Рис. 3. Энергетический приведенный показатель АД:
 а – при $I_2 = I_{2H} = const$, б – $I_1 = min$. 1 – $CE = 0,1$; $\cos\varphi_0 = 0,8$; 2 – $CE = 0,05$; $\cos\varphi_0 = 0,9$

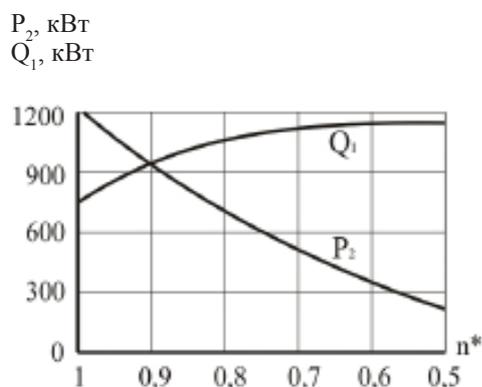


Рис. 4. Полезная мощность P_2 (мощность на валу насоса) и отдаваемая АД в сеть реактивная мощность Q_1

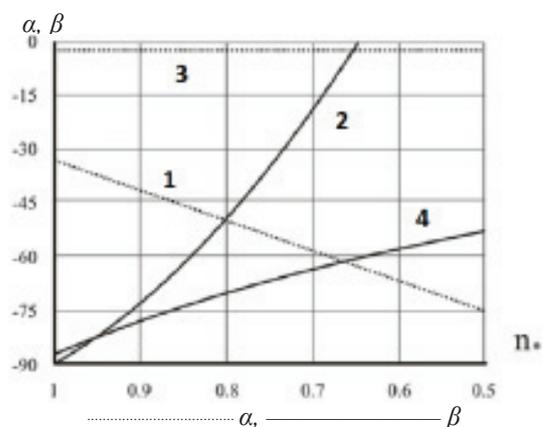


Рис. 5. Изменение углов открытия вентилей выпрямителя α и инвертора β в функции частоты вращения ротора: 1, 2 – при $I_2 = I_{2H} = const$; 3, 4 – при $I_1 = min$

На рис. 5 приводятся регулировочные характеристики АД (изменение частоты вращения в функции углов управления α и β) для двух предельных режимов: $I_2 = I_{2H} = const$ и $I_1 = min$. Область между этими кривыми – это область возможных законов управления.

Таким образом, путем изменения функциональных зависимостей углов открытия вентилей выпрямителя и инвертора, может быть получен большой спектр регулировочных характеристик АД, обеспечивающий широкий диапазон регулирования частоты вращения.

АД принципиально может работать в различных режимах управления выпрямителем и инвертором. Наиболее хорошими по энергетическим показателям являются режимы “неуправляемый выпрямитель – инвертор с искусственной коммутацией” и “выпрямитель и инвертор с искусственной коммутацией”.

Численные исследования АД, спроектированного на базе асинхронного двигателя АК-13-59-94 без изменения объема сердечника, габаритных и установочных размеров, показали его высокие энергетические характеристики: КПД двигателя при изменениях относительной частоты вращения от 1 до 0,5 находится в пределах от 96 до 82 % при одновременном генерировании реактивной мощности в сеть во всем диапазоне изменения частоты вращения, при этом приведенный энергетический КПД находится в пределах 96–94 %.

Получена математическая модель системы “АД – насос”, на основе которой разработана методика и программа расчета интегральных энергетических, технических показателей и характеристика АД в электроприводе насоса.

Литература

1. *Бочкарев И.В., Келебаев К.К.* Разработка энергосберегающего электропривода для центробежных насосов // *Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Мат-лы Всерос. НТК. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2010. С. 238–240.*
2. *Бочкарев И.В., Келебаев К.К.* Энергетические характеристики машины двойного питания привода центробежных насосов // *Проблемы автоматки и управления: Научно-техн. журнал НАН КР. Бишкек: Илим, 2010. С.149–153.*
3. *Келебаев К.К.* Исследование электромагнитных процессов в электроприводе с машиной двойного питания для центробежных насосов // *Известия КГТУ. 2009. № 19.*
4. *Келебаев К.К.* Пути экономии электроэнергии в насосных установках. // *Известия КГТУ. 2009. № 19.*