

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Бочкарев И.В., Келебаев К.К.

Кыргызский государственный технический университет,
Майлуу-Суйский колледж ЖАГУ

Основная тенденция развития современного электропривода – распространение его на технологии, где до настоящего времени преобладает простейший нерегулируемый электропривод. Особый экономический эффект от использования управляемых электроприводов дает их применение на объектах, обеспечивающих транспортировку жидкостей или газов. Это насосные агрегаты водоснабжения, транспортировки нефти и других жидкостей, компрессоры сжатого воздуха и газов, вентиляторы, нагнетатели воздуха и т.д. Такие механизмы, работающие круглосуточно и потребляющие крайне нерационально громадное количество энергии, не были до последних лет удостоены внимания специалистов, т.к., с одной стороны, не было острой нужды, поскольку энергия была дешевой, а с другой - не было технических возможностей. Сейчас ситуация кардинально изменилась, поскольку возникла не только потребность, но и появились соответствующие технические средства.

До сих пор основным способом регулирования производительности указанных механизмов является использование задвижек или регулирующих клапанов. Очевидно, что при дросселировании поток вещества, сдерживаемый задвижкой или клапаном, не совершает полезной работы. Применение регулируемого электропривода позволяет задать необходимое давление или расход насоса или вентилятора при значительной экономии электроэнергии. Этот способ регулирования в экономическом отношении значительно эффективнее остальных. Перспективность регулирования наглядно видна на рис.1 (здесь при дросселировании в точке $Q = 0$, которая соответствует P_{min} , задвижка закрыта, а в точке $Q = 1$ при P_{max} задвижка открыта).

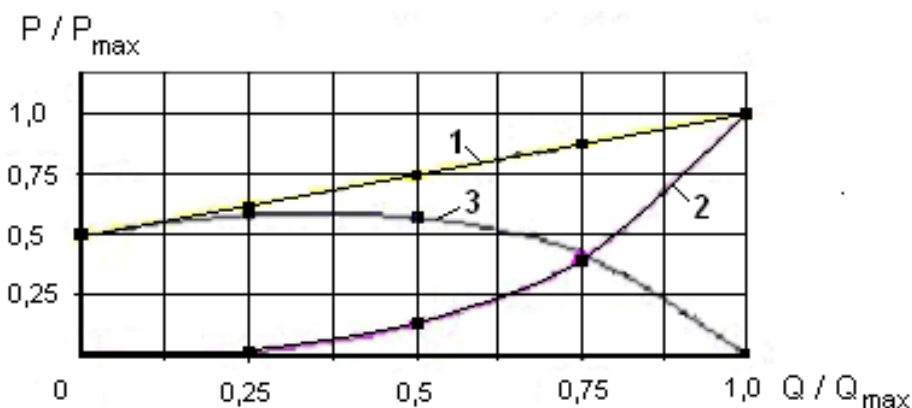


Рис. 1. Сравнение различных способов регулирования
производительности центробежного насоса:

1 – мощность, потребляемая при дросселировании; 2 – мощность,
потребляемая при частотном управлении; 3 – экономия электроэнергии

Электродвигатель для любого производственного механизма выбирается таким образом, чтобы при номинальной частоте вращения обеспечить номинальные параметры технологического процесса. Наиболее целесообразным вариантом регулируемого электропривода для центробежных насосов является машина двойного питания (МДП), которая представляет собой асинхронный двигатель с фазным ротором (АД), к обмотке ротора которого через контактные кольца подводится регулируемое по амплитуде, частоте и фазе напряжение [1].

Расчет энергетических параметров привода по схеме МДП имеет свои особенности. На рис.2 представлена схема МДП и указаны величины, характеризующие ее энергетику.

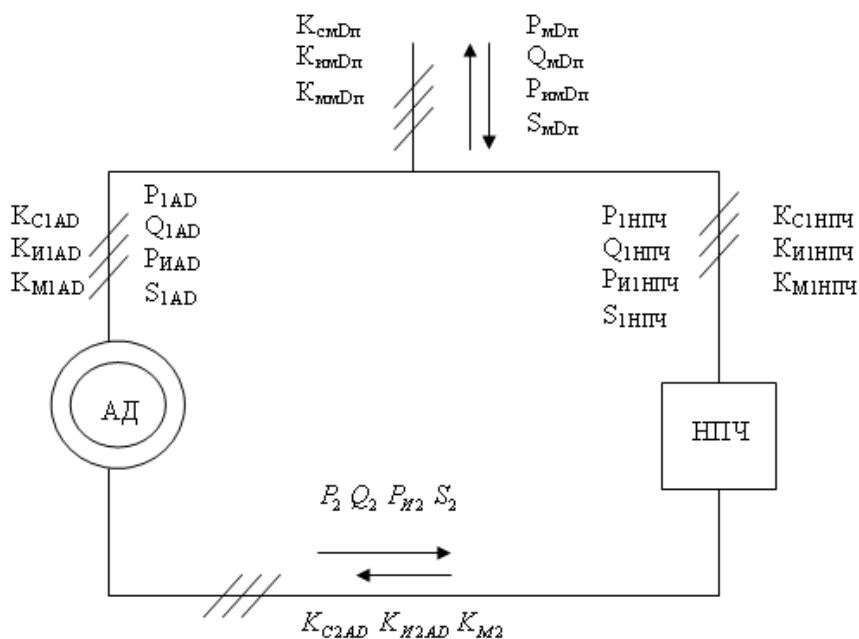


Рис.2. Энергетические показатели МДП

Составляющие мощности АД определяются, кроме частоты вращения и момента на валу, законом регулирования реактивной мощности. Активная мощность статора $P_{1АД}$ зависит от нагрузки двигателя и частоты вращения, реактивная $Q_{1АД}$ – от закона регулирования (функций регулирования), принятых в данном конкретном случае.

Мощность на входе ИПЧ $P_{1ИПЧ}$, за вычетом потерь, соответствует активной мощности скольжения АД P_2 , а реактивная $Q_{1ИПЧ}$ является функцией коэффициента мощности роторной цепи, величины и частоты напряжения подаваемого в ротор.

Таким образом, расчет энергетики по первым гармоническим токам и напряжениям (т.е. при пренебрежении их несинусоидальностью) должен проводиться в следующей последовательности:

1. Рассчитываются функции регулирования (величина и фаза подводимого к ротору АД напряжения), обеспечивающие выбранный режим работы привода во всем диапазоне регулирования. Для этого необходимо решить совместно уравнения электрического равновесия АД в режиме двойного питания и момента на валу двигателя. В нашем случае момент сопротивления является достаточно сложной функцией частоты вращения ротора АД.

2. Определяются токи статора и ротора АД, коэффициент сдвига статора K_{C1} и ротора K_{C2} , активные и реактивные мощности статора $P_{1АД}$, $Q_{1АД}$ и ротора P_2 , Q_2 . Здесь должны быть рассмотрены электромагнитные процессы в АД в режиме двойного питания, соответствующем п.1.

3. Активная мощность на входе ИПЧ $P_{1ИПЧ}$ соответствует, за вычетом потерь в преобразователе, активной мощности ротора P_2 , реактивная мощность $Q_{1ИПЧ}$ определяется по рассчитанным P_2 , Q_2 , K_{C2} и функциям регулирования МДП.

4. Суммарная мощность, потребляемая приводом, определяется

$$S_{МДП} = \sqrt{P_{МДП}^2 + Q_{МДП}^2}, \quad (1)$$

где $P_{МДП} = P_{1АД} \pm P_{1ИПЧ}$; $Q_{МДП} = Q_{1АД} + Q_{1ИПЧ}$.

5. Коэффициент сдвига (коэффициент мощности по первым гармоническим)

$$K_{смДП} = P_{МДП} / S_{МДП}. \quad (2)$$

Важным энергетическим показателем привода является коэффициент мощности, который для систем с несинусоидальным питанием определяется, как

$$k_M = k_C \cdot k_H, \quad (3)$$

где k_C – коэффициент сдвига, характеризующий фазовый угол между напряжением сети и первой гармоникой тока; k_H – коэффициент искажения, учитывающий потери мощности, обусловленные несинусоидальностью потребляемого тока.

Примем следующие допущения:

1. На ротор АД подается синусоидальное напряжение $k_{u1AD} = 1$;

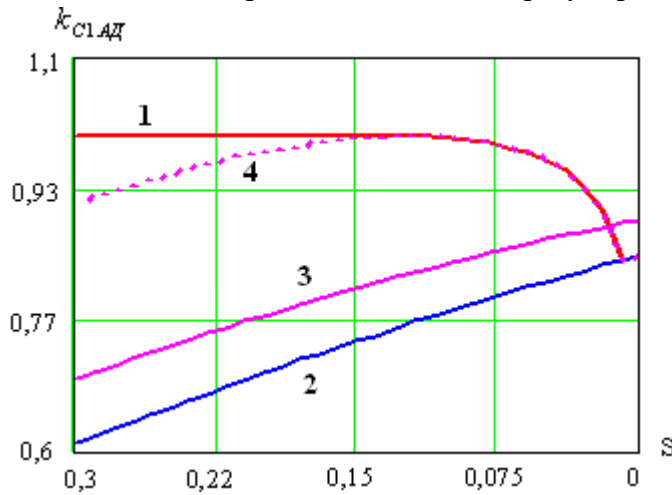
$$2. k_{M1AD} = k_{C1AD} = \cos \varphi_1, \quad (4)$$

где φ_1 – фазовый угол статорной цепи АД.

Токи статорной и роторной цепей АД в схеме МДП при синусоидальном питании для определенных значений U_2 и δ находятся из уравнений токов асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме двойного питания, которые получены в [1]:

$$\cos \varphi_1 = I_{1x} / \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2}. \quad (5)$$

На рис.3 приведены значения коэффициента сдвига статорной цепи k_{C1AD} двигателя, рассчитанные для различных законов регулирования приводом ЦН. При регулировании по алгоритму при $Q_1 = 0$ значение k_{C1AD}



в значительном диапазоне регулирования (пока двигатель недогружен) остается равным 1.

При реализации регулирования по номинальному току ротора АД в этих же пределах регулирования насоса работает компенсатор реактивной мощности (кривая 4 на рисунке 3). При снижении величины тока ротора (варианты регулирования $Q_2 = 0$ и $\Delta P - \min$) потребление реактивной мощности по цепи статора значительно возрастает.

Рис.3. Коэффициент сдвига статорной цепи МДП:

1 – $Q_1 = 0$; 2 – $Q_2 = 0$; 3 – $\Delta P - \min$; 4 – $I_2 = I_{2n}$

Рис.3. Коэффициент сдвига статорной цепи МДП:

Рис.3. Коэффициент сдвига статорной цепи МДП:

Кроме того, входная реактивная мощность НПЧ зависит от параметров нагрузки, т.е. от значений P_2 и Q_2 . Угол φ_2 сдвига I_2 относительно U_2 равен

$$\cos \varphi_2 = -\cos(\delta - \varphi'_2), \quad (6)$$

где $\varphi'_2 = \arccos(I_{2x} / I_2)$.

Активная P_2 , реактивная Q_2 и полная S_2 мощности роторной цепи равны:

$$P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2; \quad Q_2 = I_2 U_2 \sin \varphi_2; \quad S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}. \quad (7)$$

По выражениям (6) ÷ (8) проведен расчет составляющих мощности цепи ротора, результаты которого приведены на рис. 4. Расчет проведен для двигателя серии 4А мощностью 200 кВт и $H_c = 0$ в рабочем диапазоне регулирования скольжения ($0,025 < s < 0,4$, что соответствует относительной подаче насоса $1 < Q_{нас} < 0,615$). Очевидно, что в значительном диапазоне регулирования скорости рабочего колеса насоса, когда двигатель недогружен по моменту, $Q_1 > 0$, статор АД выдает реактивную мощность в сеть. Как показывают расчеты, для МДП - привода такой режим осуществим при скольжении $s < 0,11$, что соответствует регулированию относительной подачи насоса в пределах $Q_{нас} < 0,913$ от номинального значения. Реактивная мощность роторной цепи при регулировании по закону $I_2 = I_{2n}$ возрастает по сравнению с другими вариантами, однако для полной оценки коэффициента мощности МДП необходим расчет суммарных показателей на входе НПЧ и АД.

Из рис.4 видно, что при законе регулирования по минимуму тока ротора мощность роторной цепи S_2 , а, следовательно, и установленная мощность преобразователя, уменьшаются даже в крайних пределах регулирования скорости на 50% по сравнению со случаем регулирования $\cos\varphi_1 = 1$.

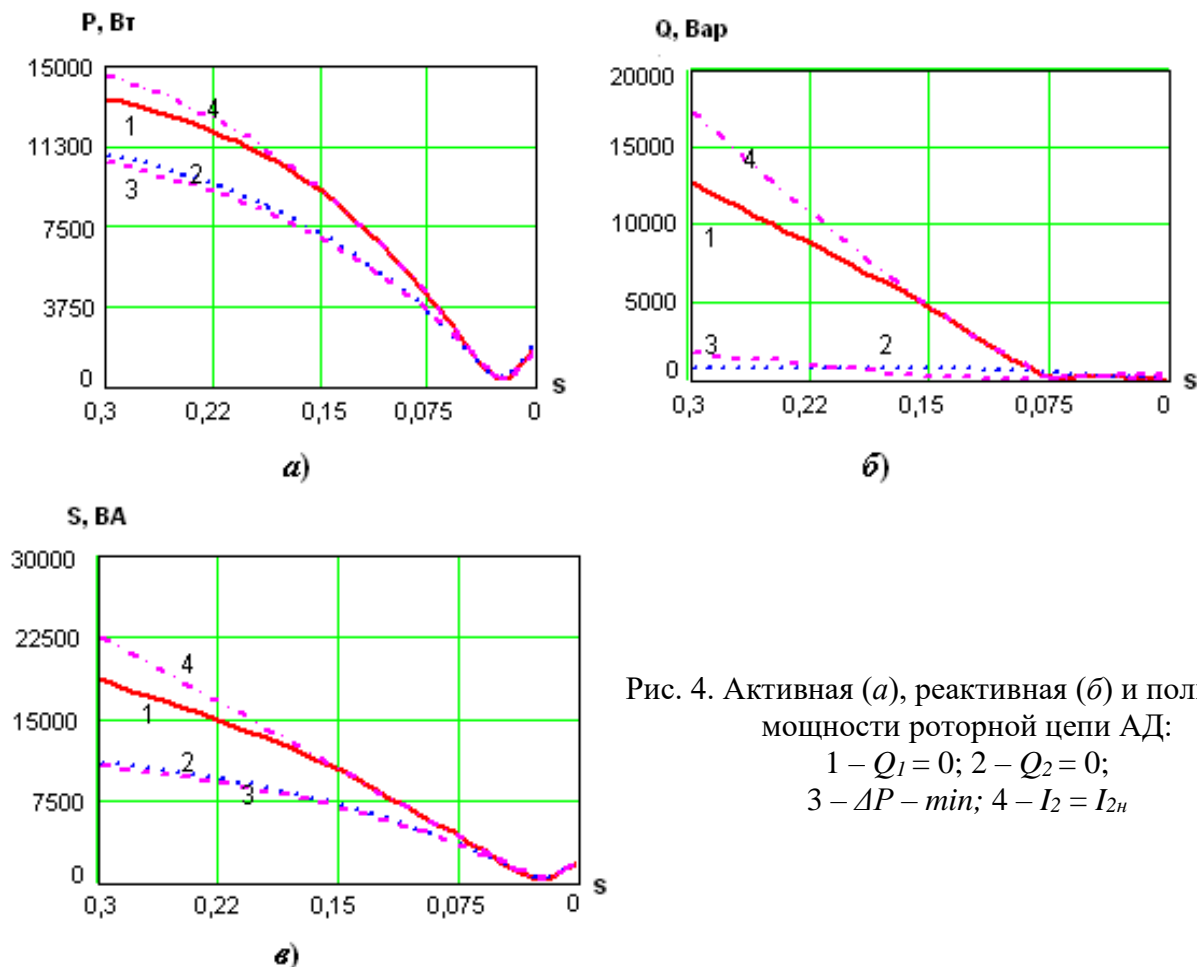


Рис. 4. Активная (а), реактивная (б) и полная (в) мощности роторной цепи АД:
 1 – $Q_1 = 0$; 2 – $Q_2 = 0$;
 3 – $\Delta P - min$; 4 – $I_2 = I_{2н}$

Одним из преимуществ МДП по сравнению с реостатным регулированием является высокий КПД при глубоком регулировании скорости двигателя, вследствие рекуперации энергии в сеть при работе машины в двигательном режиме с нижесинхронной скоростью.

Как и в обычной схеме включения асинхронного двигателя, потери в машине двойного питания можно подразделить на постоянные и переменные. Постоянные потери – механические и в стали – соответствуют аналогичным в АД:

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{пост АД} \quad (8)$$

Переменные потери и полезная мощность определяются, как

$$\Delta P_{пер} = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2); \quad P_{пол} = P_B \pm P_{реак}, \quad (9)$$

где P_B – мощность на валу двигателя; $P_{реак}$ – мощность, циркулирующая в цепи ротора: (+) – отдаваемая в сеть, $S > 0$; (–) – потребляемая из сети, $S < 0$,

Коэффициент полезного действия рассчитывается по формуле:

$$\eta = 1 - \Delta P_{\Sigma} / (P_{пол} \pm \Delta P_{\Sigma}), \quad (10)$$

где $\Delta P_{\Sigma} = P_{пост} + \Delta P_{пер}$ – суммарные потери.

Так как в МДП происходит перераспределение токов в статорной и роторной цепях в соответствии с законом регулирования, изменяются переменные потери и, следовательно, КПД. На рис.5,а изображены кривые КПД, рассчитанные по первым гармоническим токам для различных законов управления МДП.

Максимальный КПД получим при регулировании по закону $\Delta P = \min$. При управлении по закону $I_2 = I_{2н}$ в режиме компенсации реактивной мощности увеличиваются потери мощности в роторной цепи, максимальное снижение КПД АД составляет 0,016 по сравнению с вариантом $Q_I = 0$ и 0,03 - по сравнению с вариантом $\Delta P = \min$. Таким образом, снижение потребления реактивной мощности статором АД связано с некоторым увеличением потерь мощности в роторной цепи двигателя. Очевидно, необходимо комплексное сопоставление двух энергетических характеристик привода – коэффициента мощности и КПД.

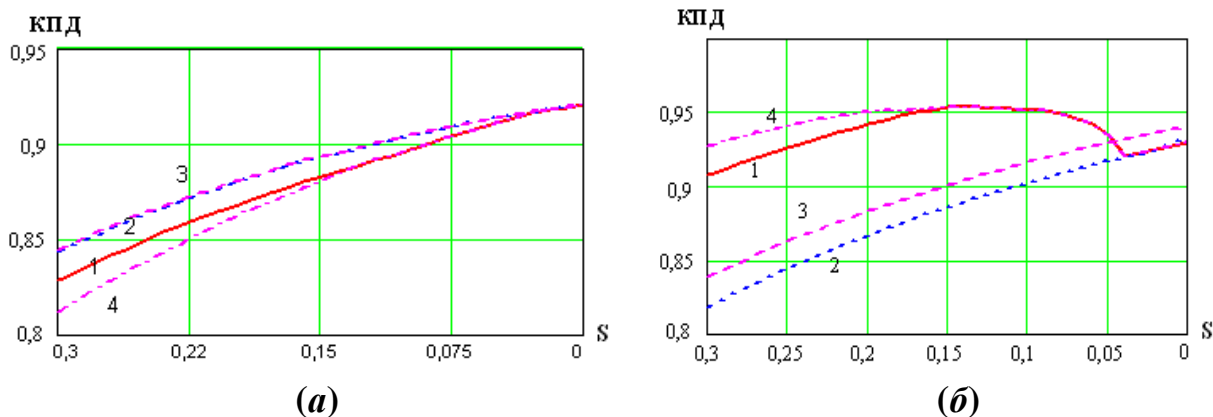


Рис. 5. КПД двигателя (а) и приведенный КПД (б) в схеме МДП:
1 – $Q_I = 0$; 2 – $Q_2 = 0$; 3 – $\Delta P = \min$; 4 – $I_2 = I_{2н}$

Приведенные расчеты показывают, что повышение k_M двигателя МДП при применении специальных законов управления сопровождается некоторым снижением КПД. В [2] отмечается, что недостаточность учета с помощью КПД свойств электропривода лишь как преобразователя электроэнергии и не учет характеристик ее как потребителя вызывает стремление объединить КПД и k_M в одном показателе. В качестве такого обобщенного показателя иногда применяется приведенный КПД $\eta_{пр} = \eta \cos\varphi$. Однако η и $\cos\varphi$ имеют разный физический смысл, несут разную весовую нагрузку и их произведение не может быть использовано для адекватной экономической оценки энергетики привода в целом. Гораздо более удачным вариантом комплексной оценки энергетической эффективности представляется сопоставление по приведенному значению КПД [3]

$$\eta_{пр} = \frac{\eta}{1 + k_3 (tg\varphi - tg\varphi_0)}, \quad (11)$$

где k_3 – удельные потери, связанные с генерированием 1 квар реактивной мощности, кВт/квар; $tg\varphi_0$ – нормативное значение отношения Q_I/P_I , при котором потребитель не платит надбавок за дополнительное потребление реактивной мощности из сети и не имеет скидок за генерирование реактивной мощности.

Результаты расчета приведенного значения КПД, проведенного по (11) для различных законов управления МДП – привода ЦН (рис.5,б), показали значительное преимущество регулирования по номинальному значению тока ротора.

Литература

1. Келебаев К.К. Исследование электромагнитных процессов в электроприводе с машиной двойного питания для центробежных насосов. Известия КГТУ №17. 2009.
2. Айзенштадт Е.Б., Шакарян Ю.Г. О законе регулирования напряжения статора и ротора АСД, работающего в автономной системе. // Электротехника. 1973. №11. С.14-16.
3. Парфенов Э.Е. Особенности электромагнитных процессов, расчета параметров и характеристик управляемых электрических машин для асинхронно-вентильных каскадов. // Исследование турбо- и гидрогенераторов. – Л.: Наука, 1976. С.146-154.