

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ТУРБОМЕХАНИЗМАМИ ТЭС**

***И.В. Бочкарев***

---

Приведены результаты работ по созданию асинхронного вентильного электродвигателя с дополнительной преобразовательной обмоткой на статоре, предназначенного для силовой части энергосберегающих автоматизированных систем управления турбомеханизмами ТЭС. Получены аналитические выражения для расчета механических и регулировочных характеристик АД.

*Ключевые слова:* турбомеханизм; выпрямитель; инвертор; угол открытия тиристорov; механические и регулировочные характеристики.

Обеспечение заданных технологических режимов работы, а также производительность, надежность и безопасность работы тепловых электростанций (ТЭС) в значительной степени определяется работой их турбомеханизмов (ТМ), к которым относятся питательные, сетевые, циркуляционные, подпиточные и другие насосы, а также дымососы и дутьевые вентиляторы. Поскольку работа ТЭС регулируется с учетом суточных и сезонных графиков нагрузки, то для ТМ необходимо применение энергосберегающих автоматизированных систем

управления (ЭАСУ), которые должны обеспечивать возможность регулирования частоты вращения их рабочих органов [1]. Проведенный анализ показал, что силовую часть ЭАСУ ТМ наиболее целесообразно строить на базе машины двойного питания (МДП), которая представляет собой асинхронный двигатель с фазным ротором (АД), к обмотке ротора которого подводится регулируемое по амплитуде, частоте и фазе напряжение [2]. Достоинством МДП является пониженная установленная мощность преобразователя, соответствующая глубине регулиро-

вания скорости (в 4–5 раз меньше, чем в обычной системе “преобразователь частоты – асинхронный короткозамкнутый двигатель”), а возможность регулирования реактивной мощности по цепи статора позволяет обеспечить работу такого привода ТМ с единичным (и даже опережающим) коэффициентом мощности.

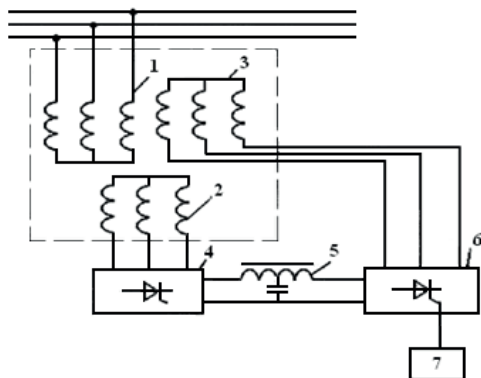


Рисунок 1 – Принципиальная схема АВД

Таким образом, в МДП энергия подводится (отводится) как со стороны статора, так и со стороны ротора. При этом обмотка статора выполняется на высокое напряжение (до 10 кВ), а обмотка ротора по условиям надежности – на низкое напряжение. Поэтому между блоком “обмотка ротора – преобразователь” ставится согласующий высоковольтный трансформатор. Установка такого трансформатора требует помещения, выполненного в соответствии с ПУЭ, а также целого комплекса коммутационной и защитной аппаратуры. Все это чрезвычайно усложняет ЭАСУ ТМ. Исследования, направленные на улучшение технико-экономических показателей силовой части ЭАСУ ТМ привели к созданию асинхронного вентильного двигателя (АВД). Он выполняется на базе обычного асинхронного двигателя с фазным ротором, в пазы статора которого укладываются две обмотки: обмотка 1 представляет собой обычную обмотку статора (рисунок 1), обмотка 3 подключается к преобразователю. Обе обмотки 1 и 3 имеют одно и тоже число полюсов и одинаковый шаг. Обмотки могут укладываться либо в общих, либо в отдельных пазах, при этом часть пазов занимает обмотка 1 (обмотка статора), другую часть пазов занимает обмотка 3 (преобразовательная обмотка). Обмотка ротора 2 АВД остается обычной фазной обмоткой ротора. Следовательно, электро-механическая часть АВД представляет собой, по существу, трехобмоточный вращающийся трансформатор, где обмотка статора 1 – первичная, обмотка ротора 2 – вторичная, преобразовательная обмотка 3 – третичная.

Основным режимом работы АВД является двигательный режим при частоте вращения ниже синхронной. Этот режим работы характерен для большинства приводов вентиляторной и насосной нагрузки ТМ ТЭС. Энергетическая диаграмма распределения потоков мощности при работе АВД в указанном режиме работы представлена на рисунке 2.

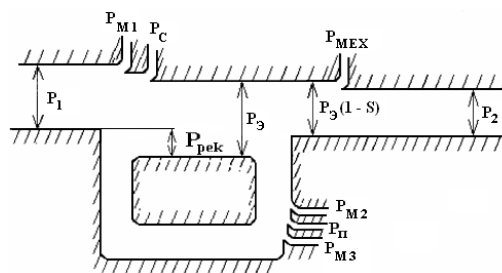


Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма АВД с инверторной обмоткой

При работе обычного АД в диапазоне частот вращения ниже синхронной, электромагнитная мощность  $P_3$  равна потребляемой мощности  $P_1$  за вычетом потерь в стали  $P_c$  и в обмотке  $P_{m1}$  статора. Принципиальная особенность АВД заключается в том, что его электромагнитная мощность  $P_3$  имеет две составляющие: мощность  $P_1$ , потребляемую двигателем из сети, и мощность  $P_{pek}$ , передаваемую с инверторной обмотки статора.

Таким образом, при работе АВД в двигательном режиме со скольжением  $0 < S < 1$  часть электромагнитной мощности  $P_3(1-S)$  идет на совершение механической работы. Другая часть, т.е. мощность скольжения  $P_3S$ , трансформируется в ротор и за вычетом потерь (в меди обмоток ротора  $P_{m2}$  и преобразовательной обмотки  $P_{m3}$ , и в преобразователе РП) возвращается в инверторную обмотку и передается на ротор в виде электромагнитной мощности. Поэтому разработанный АВД обладает очень важным свойством: при любой частоте вращения потребляемая двигателем из сети мощность равна механической мощности двигателя (если пренебречь потерями в стали, обмотках и преобразователе). Именно это свойство обеспечивает АВД высокие энергетические показатели в двигательном режиме при частоте ниже синхронной.

Очевидно, что если АВД будет работать при частоте вращения  $n_2$  выше синхронной  $n_1$ , скольжение станет отрицательным и ЭДС изменит знак на противоположный. Поэтому для обеспечения двигательного режима при такой сверхсинхронной частоте вращения в цепь ротора необходимо ввести добавочную ЭДС, направленную навстречу ЭДС ротора и превосходящую ее по модулю. Энергия будет

поступать в роторную обмотку от ПЧ, причем роторная группа вентиляей 4 должна работать в инверторном режиме, а статорная 6 – в выпрямительном и получать питание от преобразовательной обмотки 3 статора (рисунок 1). При этом напряжение в обмотке 3 как во вторичной обмотке трансформатора индуцируется магнитным полем обмотки 1 статора.

Таким образом, электромагнитные мощности, передаваемые с обмотки статора и ротора АД, равны соответственно

$$P_{\vartheta} = M\omega_1; P_{\vartheta p} = P_{\vartheta}S, \quad (1)$$

где  $\Omega_1 = 2\pi \cdot n_1 = 2\pi \cdot f_1/p = \omega_1/p$  – синхронная угловая частота вращения;  $M$  – электромагнитный момент.

Мощность, потребляемая обмоткой статора, равна

$$P_1 = P_{\vartheta}(1+S) + P_{\text{эм}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{эм}}$  – сумма всех электромагнитных потерь.

Следовательно, при одном и том же моменте мощность, потребляемая обмоткой статора из сети при частоте вращения выше синхронной  $n_2 > n_1$ , больше мощности, потребляемой двигателем в режиме работы при частоте вращения ниже синхронной  $n_2 < n_1$ . Отсюда следует ряд важных выводов:

1. Реализация режима работы при  $n_2 > n_1$  требует при неизменном моменте увеличения установленной мощности двигателя. При этом энергетические характеристики ЭАСУ ТМ будут хуже, чем при  $n_2 < n_1$ .

2. Режим работы АД при частотах вращения  $n_2 < n_1$  является более предпочтительным по энергетическим и стоимостным показателям. Это необходимо учитывать при разработке силовой части ЭАСУ ТМ и режима работы двигателя.

При описании электромагнитных процессов в системе “обмотка ротора АД – выпрямитель” необходимо учесть целый ряд факторов: изменение частоты и величины ЭДС обмотки ротора, изменение индуктивного сопротивления обмотки ротора, изменение соотношения активного сопротивления к индуктивному, а также изменение нагрузочного момента на валу АД по закону насосной механической характеристики.

Полученные ранее в [3–5] аналитические соотношения позволяют в целом оценить баланс мощностей и возможности регулирования реактивной мощности АД. Определим на их базе аналитические выражения для расчета механической и регулировочной характеристик АД.

Для модели выпрямителя с вынесенным активным сопротивлением обмотки ротора в цепь выпрямителя напряжение на его выходе равно

$$U'_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{2k} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} x_{k2} I_d, \quad (3)$$

где  $E_{2k}$  – ЭДС в обмотке неподвижного ротора;  $\alpha$  – угол управления тиристора;  $x_{k2} = x_2 + x'_1$ ;  $x'_1$  – индуктивное сопротивление обмотки статора, приведенное к обмотке ротора;  $I_d$  – значения выпрямленного тока ротора.

Напряжение на входе модели инвертора при вынесенном активном сопротивлении инверторной обмотки в цепь выпрямленного тока равно

$$U'_D = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{3k} \cos \beta - \frac{3}{\pi} x_{k3} I_d, \quad (4)$$

где  $\beta$  – угол открытия вентиляей инвертора;  $x_{k3}$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания обмоток 1 и 3, приведенные к обмотке 3.

С другой стороны,

$$U'_D = U'_d - I_d \cdot R_d, \quad (5)$$

где  $R_d = 2r_2 + r_{ДР} + 2r_3$ .

Из уравнений (3) – (5) можно получить уравнение, которое связывает основные параметры системы “обмотка ротора – выпрямитель – инвертор – инверторная обмотка АД”, в следующем виде:

$$S \cdot \cos \alpha - k_{32} \cos \beta - \left( \frac{s \cdot x_{k2*}}{\sqrt{6}} + \frac{x_{k3*}}{\sqrt{6}} + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} R_{d*} \right) \cdot C_{da} \cdot I_{2a*} = 0, \quad (6)$$

где  $k_{32} = \frac{E_3}{E_{2k}} = \frac{w_3 k_{03}}{w_2 k_{02}}$  – коэффициент трансформации между обмоткой 3 и обмоткой 2;

$x_{k3*} = (x_{k3} \cdot I_{2an}) / E_{2k}$ ;  $R_{d*} = (R_d \cdot I_{2an}) / E_{2k}$ ;  $I_{2a*} = I_{2a} / I_{2an}$  – относительное значение активной составляющей тока обмотки ротора;  $C_{di} = \pi / \sqrt{6} = 1,28$  – коэффициент связи токов  $I_d$  и  $I_2$  в режиме идеальной коммутации;

$$C_{da} = \frac{2C_{di}}{\cos \alpha \pm \sqrt{\cos^2 \alpha - \frac{2\pi}{3} \cdot x_{k2*} \cdot I_{2a*}}}. \quad (7)$$

Учтем, что

$$S = 1 - \Omega_*(1 - S_H), \quad (8)$$

где  $\Omega_* = \Omega / \Omega_n$ ;  $S_H$  – скольжение в номинальном режиме.

Тогда получим:

$$\begin{aligned} & [1 - \Omega_*(1 - S_H)] \cos \alpha - k_{32} \cos \beta - \\ & - \left[ \frac{(1 - \Omega_*(1 - S_H)) x_{k2*}}{\sqrt{6}} + \frac{x_{k3*}}{\sqrt{6}} + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} \cdot R_{d*} \right] \cdot \\ & \cdot C_{da} \cdot I_{2a*} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом того, что  $I_{2a*} = M_*$ , уравнение (9) примет вид:

$$[1 - \Omega_*(1 - S_H)] \cos \alpha - k_{32} \cos \beta - \left[ \frac{(1 - \Omega_*(1 - S_H))x_{k2*}}{\sqrt{6}} + \frac{x_{k3*}}{\sqrt{6}} + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} R_{d*} \right] \cdot C_{dM} \cdot M_* = 0, \quad (10)$$

где  $C_{dM} = f(M_*)$  – получается подстановкой в (7)  $I_{2a*} = M_*$ .

Выражение (10) представляет собой уравнение механической характеристики АД  $\Omega_* = f(M_*)$ , записанное с учетом параметров АД, выпрямителя и инвертора. Его можно решить с использованием программы *root* приложения MathCad [6]:

$$\Omega_*(M) = \text{root}(F(\Omega_*, M), \Omega_*).$$

Для расчета механических характеристик предварительно определяется номинальное скольжение по (10), принимая

$$M_* = \text{root}(F(S_H), S_H).$$

Механические характеристики АД мощностью  $P_2 = 1200$  кВт для  $\beta = \pi/2$  и  $\beta = \pi/8$  приведены на рисунке 3.

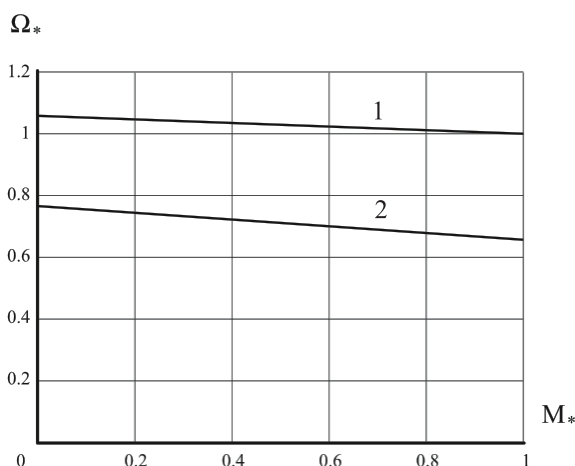


Рисунок 3 – Механическая характеристика АД ( $\alpha = 0, x_{k2*} = 0,15$ ): 1 –  $\beta = \pi/2$ ; 2 –  $\beta = \pi/8$

Регулировочные характеристики  $\Omega_* = f(\cos \beta, \cos \alpha)$  силовой части ЭАСУ ТМ на базе АД получим из уравнения (10) путем подстановки в него выражения механической характеристики ТМ  $M_* = \Omega_* \sqrt{\Omega_*}$ :

$$[1 - \Omega_*(1 - S_H)] \cos \alpha - k_{32} \cos \beta - \left[ \frac{(1 - \Omega_*(1 - S_H))x_{k2*}}{\sqrt{6}} + \frac{x_{k3*}}{\sqrt{6}} + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} R_{d*} \right] \cdot C_{d\Omega} \cdot \Omega_* \sqrt{\Omega_*} = 0, \quad (11)$$

где  $C_{d\Omega}$  – из (7) с учетом  $I_{2a*} = \Omega_* \sqrt{\Omega_*}$ .

Анализируя это уравнение, можно увидеть, что параметры обмоток мало влияют на диапазон регулирования частоты вращения, который определяется, в основном, углами открывания вентилей выпрямителя  $\alpha$  и инвертора  $\beta$ , а также коэффициент трансформации  $k_{32}$ .

Поскольку коэффициент  $k_{32}$  оказывает значительное влияние на массу и стоимость двигателя, то он не может выбираться произвольно. Следовательно, для формирования регулировочной характеристики практически можно использовать только два параметра –  $\alpha$  и  $\beta$ . На рисунке 4 приведены регулировочные характеристики АД с неуправляемым и управляемым выпрямителем для предельных значений  $x_{k2*} : x_{k2*} = 0,1$  и  $x_{k2*} = 0,2$ .

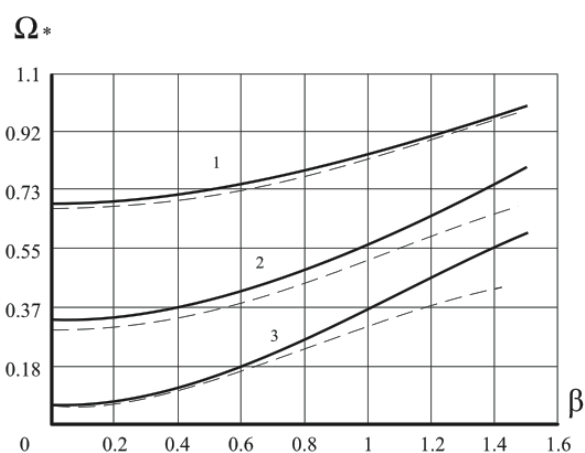


Рисунок 4 – Регулировочные характеристики АД: 1 –  $\alpha = 0$ ; 2 –  $\alpha = \pi/3$ ; 3 –  $\alpha = 1,25$ ; — — —  $x_{k2*} = 0,1$ ; - - - -  $x_{k2*} = 0,2$

Поскольку в случае неуправляемого выпрямителя имеем  $\alpha = 0$ , то управление частотой вращения осуществляется только изменением угла  $\beta$  открытия вентилей инвертора.

Максимальная частота вращения двигателя  $\Omega_* = 1$ . Минимальную частоту вращения получим из (11), приняв  $\cos \alpha = 1, \cos \beta = 1$ :

$$\Omega_{\min} = \text{root}(F(\omega), \omega).$$

В управляемом выпрямителе диапазон регулирования может быть расширен до  $\Omega = 0$ .

#### Литература

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздушных установках / Б.С. Лезнов. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. Бочкарев И.В. Регулируемый электропривод как основа энергосбережения в области электроэнергетики / И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев,

- Е.В. Хворостьяная // Известия КГТУ. 2011. № 25. С. 113–117.
3. *Бочкарев И.В.* Энергетические характеристики машины двойного питания привода центробежных насосов / И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев // Проблемы автоматизации и управления: Научн.-техн. журнал НАН КР. Бишкек: Илим, 2010. С.149–153.
  4. *Бочкарев И.В.* Расчет энергетических показателей энергосберегающего привода центробежных насосов при различных законах регулирования / И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. тр. шестой Всерос. НТК. Благовещенск: Изд-во Амурского гос. ун-та, 2011. Т1. С. 339–343.
  5. *Бочкарев И.В.* Электромагнитные процессы, протекающие в асинхронном вентильном двигателе при питании обмотки ротора от неуправляемого выпрямителя / И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев // Вестник КРСУ. 2011. Том 11. № 11. С. 89–94.
  6. *Дьяконов В.Г.* MathCad 7 в математике, физике и в Internet / В.Г. Дьяконов, И.В. Абраменкова. М.: Нолидж, 1999. 352 с.