

УДК 621.6.052

**РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО ПО ЭНЕРГОЗАТРАТАМ  
ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ  
С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ ТЭС**

*И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев*

Рассмотрены различные законы регулирования реактивной мощности АДДП. Предложен новый закон регулирования, для которого составлен алгоритм расчета функций регулирования и токов АДДП.

*Ключевые слова:* турбомеханизм; реактивная мощность; частотно-регулируемый электропривод; тиристорный преобразователь частоты; функции регулирования.

---

**DEVELOPMENT OF OPTIMAL ENERGY CONSUMPTION  
ON CONTROL LAWS ASYNCHRONOUS MOTORS  
WITH TWO-WAY SUPPLY FOR FLUID-HANDLING APPLICATIONS OF TPP**

*I.V. Bochkarev, K.K. Kelebaev*

It is considered various laws of regulation of reactive power ADDP. It is offered the new law regulating for which algorithm of the calculation of regulatory functions and currents ADDP.

*Keywords:* fluid-handling application; reactive power; VFD; thyristor frequency converter; control functions.

В энергетическом цикле ТЭС используется большое количество разных типов турбомеханизмов (насосы, вентиляторы, компрессоры, дымососы и др.). Турбомеханизмы (ТМ) напрямую влияют на экономичность и надежность работы всей ТЭС. При этом, поскольку режимы работы ТЭС колеблются в течение суток, а также сильно изменяются в зимний и летний сезоны, то появляется необходимость регулирования рабочих выходных параметров ТМ – напора  $H$  и расхода  $Q$ . Применяемые на практике дроссельные методы регулирования  $H$  и  $Q$  (клапанами, задвижками, направляющими аппаратами) неэкономичны и приводят к значительным потерям электроэнергии, износу механизмов и запорной арматуры, снижению надежности за счет гидравлических ударов и т. п. Поэтому работы по переводу ТМ на энергосберегающие автоматизированные системы управления (ЭАСУ) являются актуальными, т. к. позволяют добиться ощутимого энергосбережения [1].

Общепризнанным средством энергосбережения производственных механизмов является использование для них частотно-регулируемого

электропривода, который не только позволяет исключить дросселирование, но и обеспечивает целый ряд важных технологических возможностей. Проведенный анализ показал, что электропривод ТМ наиболее целесообразно строить на базе асинхронного двигателя с двухсторонним питанием (АДДП). АДДП представляет собой АД с фазным ротором, обмотка статора которого подключается непосредственно к питающей сети, а роторная обмотка присоединяется к этой сети через тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ) и разделительный трансформатор (РТ). РТ нужен для снижения напряжения, подводимого к обмотке ротора, поскольку в приводах ТМ используются двигатели большой мощности, питающиеся от высоковольтной сети. ТПЧ содержит выпрямитель, инвертор и сглаживающий дроссель. Это позволяет независимо регулировать активную мощность (частоту вращения и момент), а также реактивную мощность в обмотке статора [2, 3].

Анализ основных уравнений АДДП показывает, что при заданных значениях частоты вращения двигателя и момента нагрузки можно получить различные режимы работы, которые зависят от параметров

подводимого к ротору напряжения. Это объясняется тем, что в АДДП имеется возможность регулирования реактивной мощности со стороны статора  $Q_{1AD}$  и ротора  $Q_{2AD}$ . При этом функциями регулирования являются заданные значения параметров установившегося режима:  $M_{зад}, S_{зад}, Q_{1зад}, Q_{2зад}$ . Проведенный анализ показал, что наиболее характерными законами регулирования параметров режимов работы АДДП являются следующие:

- обеспечение реактивной мощности, потребляемой со стороны статора, равной нулю  $Q_1 = 0$ . Эффективность такого режима объясняется тем, что частота скольжения  $f_s$  значительно меньше частоты сети  $f_1$ , поэтому для создания одного и того же магнитного потока требуется меньшая реактивная мощность со стороны ротора, чем со стороны статора;
- обеспечение реактивной мощности, потребляемой со стороны ротора, равной нулю  $Q_2 = 0$ . Эффективность этого режима заключается в том, что в этом случае требуется минимальная номинальная мощность ТПЧ;
- регулирование по минимуму суммарных электрических потерь мощности  $\Delta P = \min$  в обмотках двигателя, что обеспечивает снижение их нагрева.

При регулировании АДДП в указанных режимах работы токи статора и ротора не должны превышать номинальных значений. При этом очевидно, что при любом законе регулирования АДДП необходимо обеспечивать требуемые параметры технологического процесса. В этом случае и силовая часть ЭАСУ, и турбомеханизмы в целом работают с оптимальными энергетическими показателями. Если АДДП работает на приводной механизм, имеющий постоянный момент сопротивления, близкий к номинальному значению двигателя, то возможность регулирования реактивной мощности в АДДП ограничена и для ее реализации требуется повышенная установленная мощность двигателя. Однако для механизмов, нагрузочный момент которых существенно зависит от скорости вращения рабочего органа, этого не требуется. Именно к таким механизмам относятся ТМ, у которых момент имеет квадратичную зависимость от скорости.

Регулирование режима работы АДДП осуществляется изменением параметров напряжения, подводимого к ротору двигателя от ТПЧ: действующего значения  $U_2$  и фазы  $\delta$ . Вектор  $U_2$  обычно отстает от вектора напряжения сети  $U_1$  на угол  $\delta$ . Тогда составляющие напряжений можно записать в виде

$$\begin{aligned} U_{1x} &= U_1; \quad U_{1y} = 0; \\ U_{x2} &= U_2 \cos \delta; \quad U_{y2} = U_2 \sin \delta. \end{aligned} \quad (1)$$

Величины  $U_2$  и  $\delta$ , которые соответствуют конкретному режиму работы ТМ, можно определить путем совместного решения уравнений активных и реактивных составляющих токов и момента АДДП. Например, для обеспечения режима, при котором реактивная мощность, потребляемая со стороны статора, равна нулю  $Q_1 = 0$ , величины  $U_2$  и  $\delta$  находятся из решения уравнения реактивного тока статора

$$I_{1y}(U_2, \delta, s) = 0 \quad (2)$$

при моменте двигателя, вычисляемом по выражению [4]:

$$M = \frac{C_n H_c + \left(\frac{1-s}{1-s_n}\right)^2}{\eta_{TM}(\omega, H_c)} \sqrt{1 - \frac{H_c}{H_0} \left(\frac{1-s_n}{1-s}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $H_c$  – статический напор, который равен разности давлений в начале и в конце трубопровода;  $H_0$  – напор насоса при закрытой задвижке, т. е. при расходе  $Q = 0$ ;  $C_n = 1 - 1/H_0$  – коэффициент;  $s$  – скольжение ротора;  $\eta_{TM}(\omega, H_c)$  – КПД ТМ;  $\omega$  – угловая скорость колеса насоса, о.е.

Совместное решение этих двух уравнений позволяет определить значения  $U_2$  и  $\delta$ , которые соответствуют требуемому напору ТМ и реактивной мощности  $Q_1$ .

Проведенный анализ показал, что для создания одного и того же магнитного потока в АДДП со стороны ротора требуется меньшая реактивная мощность, чем со стороны статора. Поэтому можно предложить еще один способ регулирования реактивной мощности в АДДП – регулирование по номинальному току ротора  $I_2 = I_{2n} = \text{const}$ . При таком способе во всем диапазоне регулирования частоты вращения необходимо поддерживать значения реактивного тока ротора  $I_{2y}$ , в соответствии с условием

$$I_{2y} = \sqrt{I_{2n}^2 - I_{2x}^2}, \quad (4)$$

где  $I_{2x}$  – активная составляющая тока ротора.

При этом обеспечиваются наиболее высокие суммарные энергетические показатели во всем рабочем диапазоне ТМ.

В установившемся режиме уравнения электрического равновесия АДДП в ортогональных синхронных осях  $x, y$  можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} U_{1x} \\ U_{1y} \\ U_{2x} \\ U_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & -\omega_0 L_1 & 0 & -\omega_0 L_m \\ \omega_0 L_1 & r_1 & \omega_0 L_m & 0 \\ 0 & -\omega_0 L_m s & r_2 & -\omega L_2 s \\ \omega_0 L_m s & 0 & \omega_0 L_2 s & r_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I_{1x} \\ I_{1y} \\ I_{2x} \\ I_{2y} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $U_{1x}, U_{1y}, U_{2x}, U_{2y}$  – проекции векторов напряжений статора и ротора на синхронные оси;  $I_{1x}, I_{1y},$

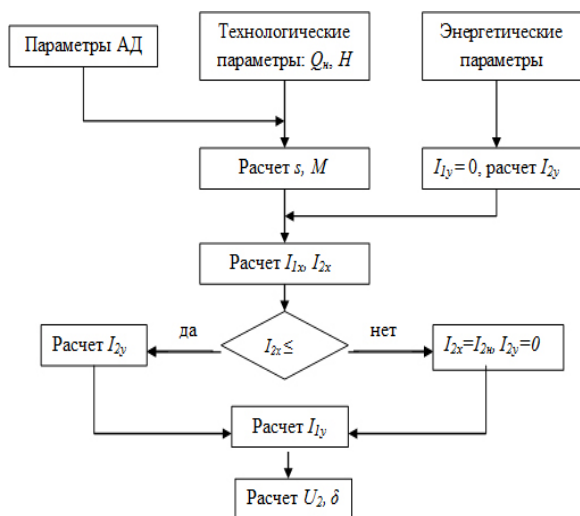


Рисунок 1 – Алгоритм расчета функций при регулировании по  $I_2 = I_{2н}$

$I_{2x}, I_{2y}$  – соответственно проекции векторов токов статора и ротора на оси  $x, y$ ;  $L_1, L_2$  – полная эквивалентная индуктивность фазы статора и ротора;  $L_m$  – индуктивность цепи намагничивания;  $\omega_0$  – угловая частота электромагнитного поля статора;  $r_1, r_2$  – активные сопротивления фазы статора и ротора.

Тогда из уравнений (5) реактивный ток статора равен

$$I_{1y} = \frac{r_1 I_{1x} - \omega L_m I_{2y} - U_1}{\omega L_m}. \quad (6)$$

Алгоритм расчета функций регулирования  $U_2$  и  $\delta$  по предложенному способу показан на рисунке 1.

Результаты расчета токов АДП при регулировании реактивной мощности по предложенному способу  $I_2 = I_{2н} = const$  показаны на рисунке 2. Расчет проведен для АДП мощностью 200 кВт при  $H_c = 0$  и относительной подаче насоса  $1 < Q_{нас}^* < 0,615$ , что соответствует диапазону регулирования скольжения  $0,025 < s < 0,4$ . Здесь обозначено  $Q_{нас}^* = Q_{нас} / Q_{ном.нас}$  где  $Q_{ном.нас}$  – номинальная подача ЦН.

Очевидно, что если двигатель недогружен по моменту, то получаем  $Q_1 > 0$ , т. е. статор выдает реактивную мощность в сеть. Как показал расчет (см.

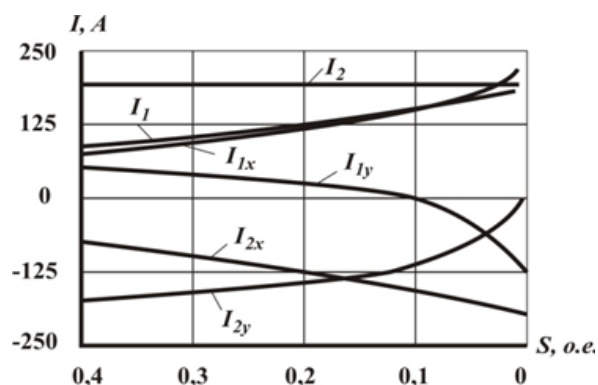


Рисунок 2 – Токи АДП – привода ТМ при регулировании по закону  $I_2 = I_{2н} = const$

рисунком 2), для рассматриваемого АДП-привода ТМ мощностью 200 кВт такой режим имеет место при  $s < 0,11$ . Это соответствует регулированию подачи насоса в пределах  $Q_{нас}^* < 0,913 Q_{ном.нас}$ .

Следует отметить, что активная мощность статора  $P_{1АД}$  определяется нагрузкой двигателя и частотой вращения ротора, а реактивная мощность  $Q_{1АД}$  зависит от используемого закона регулирования. Активная мощность  $P_{1НПЧ}$  на входе НПЧ, за вычетом потерь, соответствует активной мощности скольжения  $P_2$  АДП, а реактивная мощность  $Q_{1НПЧ}$  НПЧ зависит от величины и частоты напряжения ротора, а также от коэффициента мощности роторной цепи.

#### Литература

1. Бочкарев И.В. Регулируемый электропривод как основа энергосбережения в области электроэнергетики / И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев, Е.В. Хворостыяная // Известия КГТУ. 2011. № 25. С. 113–117.
2. Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов и др. М.: РАСХН, 2001. 520 с.
3. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
4. Келебаев К.К. Пути экономии электроэнергии в насосных установках / К.К. Келебаев // Известия КГТУ. 2009. № 19. С. 34–37.