

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 $Q_{1АД}$ и ротора $Q_{2АД}$. 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 завышенная 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 δ . Вектор U_2 обычно отстает от вектора напряжения сети U_1 на угол δ . 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 δ , 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 δ находятся из решения уравнения реактивного тока статора

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

при моменте двигателя, вычисляемом по выражению [4]:

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

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

Совместное решение этих двух уравнений позволяет определить значения U_2 и δ , 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 $I_2 = I_{2н} = \text{const}$. При таком способе во всем диапазоне регулирования частоты вращения необходимо поддерживать значения реактивного тока ротора I_{2y} , в соответствии с условием

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

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; $I_{1x}, I_{1y},$

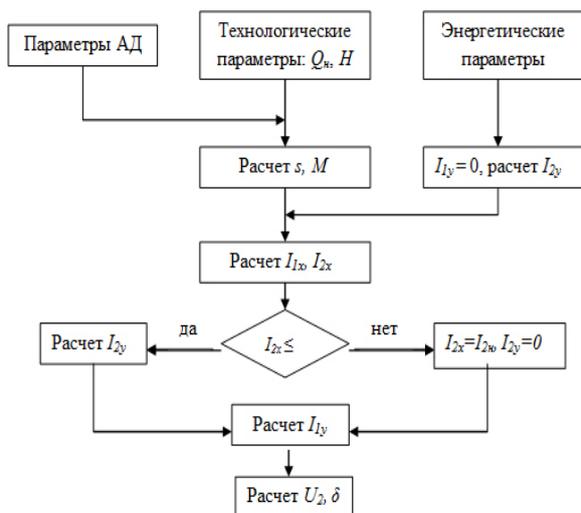


Рисунок 1 – Алгоритм расчета функций при регулировании по $I_2 = I_{2n}$

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; ω_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 δ по предложенному способу показан на рисунке 1.

Результаты расчета токов АДП при регулировании реактивной мощности по предложенному способу $I_2 = I_{2n} = const$ 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.

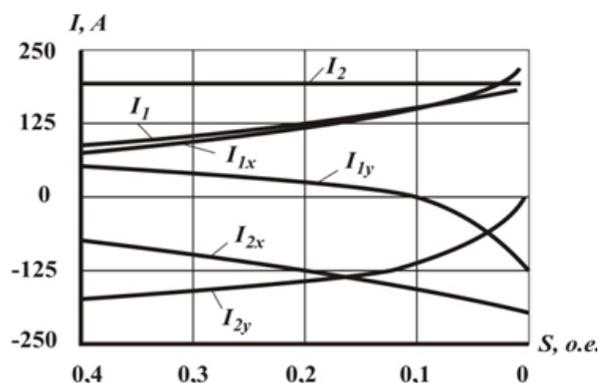


Рисунок 2 – Токи АДП – привода ТМ при регулировании по закону $I_2 = I_{2n} = const$

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.