

УДК 621.6.052

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБОМЕХАНИЗМАМИ ТЭС

*И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев, М.Г. Гунина*

Приведены результаты работ по оценке энергетических параметров силовой части энергосберегающей системы управления турбомеханизмами ТЭС, выполненной на базе асинхронного двигателя двухстороннего питания.

*Ключевые слова:* турбомеханизм; асинхронный двигатель с двухсторонним питанием; реактивная мощность; приведенный КПД коэффициента мощности.

---

## ENERGY PARAMETERS OF POWER ENERGY SAVING CONTROL SYSTEM FLUID-HANDLING APPLICATIONS OF TPP

*I.V. Bochkarev, K.K. Kelebaev, M.G. Gunina*

It is given the results of the work on the assessment of the energy parameters of the energy-efficient power management system of fluid-handling application of TPP made on the basis of bilateral asynchronous motor power.

*Keywords:* fluid-handling application; asynchronous motor with two-way power; reactive power; reduced power factor efficiency.

Среди вспомогательного оборудования ТЭС ведущее место по установленной мощности занимают различные турбомеханизмы (ТМ), к которым относятся насосное оборудование, вентиляторы, компрессоры и т. п. ТМ в значительной степени определяют технический уровень и надежность работы ТЭС, поскольку участвуют как в работе основного оборудования ТЭС, так и используются для дополнительных технических целей, например, в системах технического водоснабжения. Поэтому требования, которые предъявляются к ТМ ТЭС, постоянно ужесточаются. Эти требования нередко трудно выполнить, используя в составе ТМ серийно выпускаемые электроприводы. Это приводит к необходимости разработки новых, прогрессивных конструкций энергосберегающих автоматизированных систем управления (ЭАСУ) турбомеханизмами. Одним из путей улучшения эксплуатационных показателей ЭАСУ является использование в их силовой части специальных асинхронных двигателей двухстороннего питания (АДДП) [1], что обусловлено их высоким КПД, связанным с однократным преобразованием энергии скольжения, возвращаемой в сеть; уменьшенной мощностью тиристорного преобразователя ча-

стоты (ТПЧ), через который питается роторная обмотка; возможностью регулирования реактивной мощности статора. Именно исследованиям таких перспективных электроприводов ТМ и посвящена данная работа.

Энергетические показатели силовой части ЭАСУ на базе АДДП зависят от закона регулирования реактивной мощности, а также от частоты вращения и момента на валу: активная мощность статора  $P_{1AD}$  определяется нагрузкой двигателя и частотой вращения ротора, а реактивная мощность  $Q_{1AD}$  зависит от используемого закона регулирования. Активная мощность  $P_{1ТПЧ}$  на входе ТПЧ, за вычетом потерь, соответствует активной мощности скольжения  $P_2$  АДДП, а реактивная мощность  $Q_{1ТПЧ}$  ТПЧ зависит от величины и частоты напряжения ротора, а также от коэффициента мощности роторной цепи.

Поскольку ТМ ТЭС работают в основном в продолжительном режиме с практически неизменной нагрузкой и переходные режимы вследствие своей непродолжительности мало влияют на энергетику ЭАСУ, то это позволило ограничиться исследованием установившихся электромагнитных процессов в АДДП и ТПЧ. Путем совместного

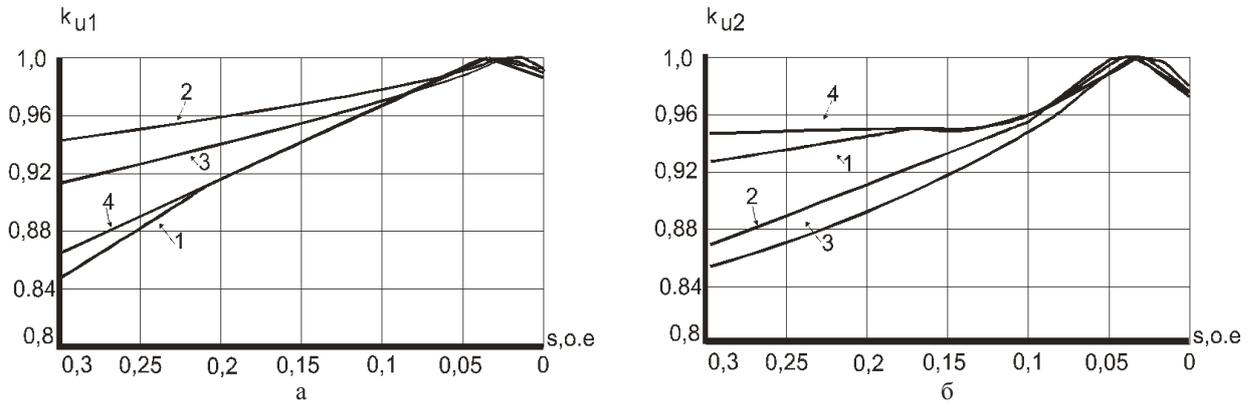


Рисунок 1 – Коэффициенты искажения токов статора (а) и ротора (б) АДДП:  
 1 –  $Q_1 = 0$ ; 2 –  $Q_2 = 0$ ; 3 –  $\Delta P = \min$ ; 4 –  $I_2 = I_{2н}$

использования метода гармонических составляющих и теории обобщенной электрической машины переменного тока сравнительно несложно определить мгновенные значения токов, момента и частоты вращения двигателя, что позволит произвести расчет энергетических показателей привода с учетом несинусоидальности формы питающего ротором напряжения. Решая исходные уравнения относительно  $v$ -х гармоник токов, можно получить выражения для мгновенных значений их проекций на синхронные оси  $x, y$ . Амплитуды высших гармоник токов статора и ротора определяются по векторной сумме их проекций:

$$I_{1v} = k_s \frac{u_{2v}}{\sqrt{r_2^2 + \omega_{2v}^2 L_r^2 \sigma^2}}; \quad I_{2v} = \frac{-u_{2v}}{\sqrt{r_2^2 + \omega_{2v}^2 L_r^2 \sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{2v} = v \cdot \omega_2$  – частота  $v$ -ой гармоники напряжения (тока) ротора;  $\omega_{2v} L_r$  – индуктивное сопротивление рассеяния ротора для  $v$ -ой гармонической тока.

Проведенный анализ показал, что искажения токов в АДДП меньше, чем в обычном короткозамкнутом АД при частотном управлении. Это объясняется тем, что преобразованию подвергается лишь часть мощности АДДП, а именно, мощность скольжения  $P_s = P_1 \cdot s$ . Раньше было показано, что величина мощности скольжения  $P_s$  изменяется в процессе регулирования подачи  $Q$  и напора  $H$  ТМ и зависит от закона управления реактивной мощностью АДДП. Поэтому определить влияние способа модуляции выходного напряжения НПЧ и режима работы АДДП на качество токов можно с помощью интегральных параметров – коэффициентов искажения тока статора  $k_{u1}$  и тока ротора  $k_{u2}$ , величины которых равны отношению действующих значений первых гармоник к полному току при несинусоидальном питании:

$$k_{u1} = I_{1(1)} / I_1; \quad k_{u2} = I_{2(1)} / I_2. \quad (2)$$

Здесь полные токи статора  $I_1$  и ротора  $I_2$  при несинусоидальном питании равны суммам первой и высших гармоник:

$$I_1 = \sqrt{I_{1(1)}^2 + \sum_{v=1}^{\infty} (I_{1v}^2 / 2)}; \quad I_2 = \sqrt{I_{2(1)}^2 + \sum_{v=1}^{\infty} (I_{2v}^2 / 2)}. \quad (3)$$

Результаты расчетов  $k_u$  для различных режимов работы и форм управляющего напряжения АДДП мощностью 200 кВт приведены на рисунке 1.

Во всем диапазоне регулирования скорости рабочего органа ТМ при прямоугольной модуляции  $k_{u1}$  достаточно высок (например, для рассматриваемого двигателя  $k_{u1AD} = 0,98-0,99$ ), а в областях номинальной и синхронной скоростей имеет наибольшее и наименьшее значения. Коэффициенты  $k_u$  повышаются с увеличением угловой частоты от  $\omega = 0,5$  до  $\omega = \omega_n$ , причем при  $\omega = \omega_n$  кривая имеет максимум. Это объясняется наименьшим значением напряжения, подаваемого на обмотку ротора для обеспечения этой скорости.

Минимум функция  $k_{uAD} = f(s)$  имеет при  $\omega = \omega_0$ , когда индуктивное сопротивление высшим гармоникам токов равно нулю.

Важным энергетическим показателем привода является коэффициент мощности. Для систем с несинусоидальным питанием он равен

$$k_M = k_C \cdot k_H, \quad (4)$$

где  $k_C$  – коэффициент сдвига, характеризующий фазовый сдвиг между напряжением сети и первой гармоникой тока;  $k_H$  – коэффициент искажения, учитывающий дополнительные потери мощности за счет несинусоидальности тока.

При анализе АДДП были приняты допущения, что на ротор подается синусоидальное напряжение, поэтому  $k_{uAD} = 1$ .

Тогда

$$k_{M \text{ АДДП}} = k_{C \text{ АДДП}} = \cos \phi_1, \quad (5)$$

где  $\phi_1$  – фазовый угол статорной цепи.

Анализ значений коэффициента сдвига  $k_{C \text{ АДДП}}$  силовой части ЭАСУ ТМ для различных законов управления АДДП в рабочем диапазоне частот вращения насосного агрегата показал, что максимальное значение  $k_{C \text{ АДДП}}$  во всем диапазоне регулирования ТМ обеспечивается при регулировании по номинальному току ротора АДДП. При глубоком регулировании подачи ТМ ( $s = 0.2 \dots 0.3$ ) и законе  $I_2 = I_{2н}$  величина  $k_{C \text{ АДДП}}$  возрастает до значений, близких к 1. Это означает, что реактивная мощность, потребляемая преобразователем ротора, по цепи статора полностью компенсируется. Потребление реактивной мощности значительно возрастает при регулировании АДДП по законам  $\Delta P = \min, Q_2 = 0$ . Необходимо отметить, что в рабочем диапазоне регулирования ТМ коэффициент  $k_{C \text{ АДДП}}$  при прямоугольной форме напряжения управления НПЧ имеет в среднем на 0,02–0,04 более высокое значение по сравнению с синусоидальной модуляцией.

Проведенный анализ показал, что снижение потребления реактивной мощности в статорной цепи АДДП и повышение тем самым коэффициента мощности  $k_M$  при применении специальных законов управления, сопровождается определенным ростом потерь активной мощности в цепи ротора, что приводит к снижению КПД. Очевидно, что оценка энергетических показателей силовой части ЭАСУ ТМ, выполненной на базе АДДП, только посредством КПД некорректна. АДДП необходимо рассматривать не только как потребитель электроэнергии, т.е. как электродвигатель, но и как генератор реактивной энергии. Поэтому требуется комплексное объединение двух основных энерге-

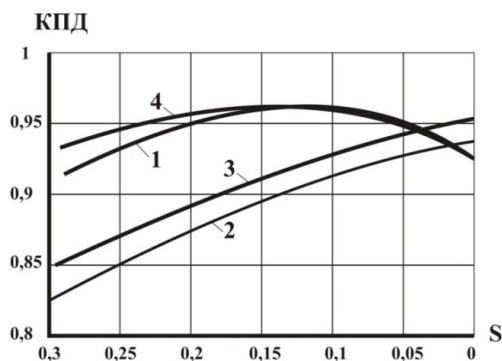


Рисунок 2 – Приведенный коэффициент полезного действия силовой части ЭАСУ ТП при прямоугольной модуляции напряжения НПЧ и различных законах управления АДДП:

1 –  $Q_1 = 0$ ; 2 –  $Q_2 = 0$ ; 3 –  $\Delta P = \min$ ; 4 –  $I_2 = I_{2н} = \text{const}$

тических характеристик АДДП – коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и КПД  $\eta$ . Но очевидно, что  $\eta$  и  $\cos \varphi$  имеют принципиально различный физический смысл и их произведение не может служить адекватной обобщенной оценкой энергетических показателей АДДП в целом. Более объективным вариантом обобщенного показателя энергетической эффективности является приведенный КПД:

$$\eta_{np} = \frac{\eta}{1 + k_y (tg \phi - tg \phi_0)}, \quad (6)$$

где  $k_y$  – удельные потери, характеризующие величину затрачиваемой активной мощности, идущую на генерирование 1 квар реактивной мощности, кВт/квар;  $tg \phi_0 = Q_1 / P_1$  – нормативная величина отношения реактивной  $Q_1$  и активной  $P_1$  потребляемых мощностей.

В качестве обобщенного нормативного показателя целесообразно использовать номинальный  $tg \phi_n$  конкретного АДДП. Результаты расчета приведенного значения КПД силовой части ЭАСУ ТМ для различных законов управления АДДП приведены на рисунке 2.

Видно, что вариант регулирования реактивной мощности АДДП по номинальному току ротора, даже с учетом влияния прямоугольной модуляции напряжения НПЧ, является наиболее предпочтительным. Во всем рабочем диапазоне регулирования скорости ТМ худшие энергетические показатели обеспечиваются при способах управления по законам, связанным с минимизацией тока ротора ( $Q_2 = 0; \Delta P = \min$ ).

В АДДП имеют место пульсации электромагнитного момента за счет взаимодействия основного потока с высшими гармониками тока ротора. Для их расчета достаточно учесть только взаимодействие высших гармонических токов с первыми гармониками:

$$M_{1,v} = (3/2) p l_3 (I_{1y} i_{2,xv} + I_{2x} i_{1,yv} - I_{1x} i_{2,yv} - I_{2y} i_{1,xv}). \quad (7)$$

Анализ показал, что амплитуда пульсаций увеличивается с ростом абсолютной величины скольжения  $s$  и может достигать 11 % номинального момента АДДП. При этом частота пульсаций в 6 раз превышает частоту тока ротора и изменяется с изменением скольжения. Такие колебания момента компенсируются механической инерцией, создаваемой на валу АДДП рабочими органами ТМ. Величина среднего за период момента, которая определяется взаимодействием первых гармоник тока и потока, остается постоянной.

#### Литература

1. 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.