

Мугалимов Р.Г.¹, Мугалимова А.Р.²¹ООО «МГТУ – Энергосбережение +»²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛАССА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ

Предметом исследования является энергоэффективность электротехнических комплексов, содержащих асинхронные двигатели. Обсуждены пути и средства повышения коэффициента полезного действия электротехнических комплексов. Дано обоснование и предложены зависимости для количественной оценки коэффициента полезного действия электротехнического комплекса в функции от коэффициентов полезного действия, мощности, загрузки асинхронного двигателя. Рассмотрены различные варианты энергоэффективных традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2 и асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Исследовано их влияние на коэффициент полезного действия электротехнического комплекса. На примере электропривода нефтяной качалки показано, что коэффициент полезного действия электротехнического комплекса с применением асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, обладающего коэффициентом мощности, равным единице, и классом энергоэффективности IE1, эквивалентен коэффициенту полезного действия электротехнического комплекса с применением традиционного асинхронного двигателя, обладающего классом энергоэффективности IE2. Приведены результаты расчетов коэффициентов полезного действия вариантов электроприводов. Полученные зависимости и результаты анализа рекомендуются производителям и потребителям асинхронных двигателей.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, асинхронный двигатель, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, энергоэффективность, уравнение, расчет, анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем является приоритетной хозяйственно-экономической задачей. Решению этой задачи уделяется серьезное внимание и вкладываются значительные ресурсы государством, производителями и потребителями электротехнического оборудования.

В настоящее время практически на всех предприятиях реального сектора экономики для вращения технологических машин и механизмов применяются трехфазные асинхронные электрические двигатели отечественных и зарубежных производителей. В Российской Федерации парк традиционных асинхронных двигателей (ТАД) по экспертным оценкам равен 250–280 млн единиц, а их установленная мощность превышает 2,8–3,2 млрд. кВт. Ежегодно электроприводы на основе АД потребляют не менее 60% вырабатываемой электрической энергии. Для российской промышленности это составляет около 0,55–0,65 триллионов кВт·ч, при этом потери энергии составляют от 14 до 19%, то есть не менее 77–104 млрд кВт·ч.

Традиционные асинхронные двигатели обладают известными достоинствами, такими как простота конструкции, высокая надежность, сравнительно невысокие эксплуатационные расходы. Вместе с тем электроприводы на основе ТАД имеют два существенных недостатка [1, 2]:

1) невозможность плавного пуска и регулирования частоты вращения ротора при питании от промышленной электросети, т.е. без применения современной силовой электроники, например преобразователей частоты (ПЧ), тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) и устройств плавного пуска;

2) низкая энергоэффективность, оцениваемая клас-

сом IE1 по Международному стандарту ИЕС 60034-30.

Первый недостаток ТАД в настоящее время успешно преодолевается применением современной силовой электроники – ПЧ, ТРН и устройств плавного пуска.

Второй недостаток еще не преодолен. Он обусловлен сравнительно невысокими значениями номинальных электрического КПД (η_n), определяемого величинами 75–90% и коэффициента мощности ($\cos\varphi_n$), находящегося в диапазоне 0,7–0,92. Энергетический КПД ТАД (η_{Σ}), равный произведению вышеуказанных коэффициентов $\eta_{\Sigma} = \eta_n \cdot \cos\varphi_n$, не превышает 52–83%.

В электротехнических комплексах (ЭТК), содержащих ТАД низкого класса энергоэффективности IE1, теряется от 17 до 48% потребляемой электрической энергии [3–8]. Собственно в электродвигателях теряется от 10 до 25 % энергии. Потерянная энергия в механическую энергию электропривода не преобразуется, а превращается в тепловую энергию и рассеивается в окружающей среде. Это снижает КПД ЭТК, а следовательно, конкурентную способность продукции товаропроизводителей из-за повышения себестоимости производства [7–12].

На практике известны и применяются три достаточно эффективных пути снижения потерь электрической энергии в ЭТК и системах:

1. Повышение коэффициента мощности ЭТК путем компенсации электрической реактивной мощности (тока) индуктивного характера реактивной мощностью (током), емкостного характера – применения компенсаторов реактивной мощности (КРМ).

2. Создание электрооборудования, в том числе асинхронных двигателей, с повышенным электрическим КПД, имеющих высокий класс энергоэффективности IE2, IE3, при сохранении на прежнем уровне или небольшого снижения коэффициента мощности.

3. Повышение коэффициента мощности до $\cos\varphi = 1$ конкретного электропотребителя, в том числе АД, при

одновременном повышении или сохранении на прежнем уровне его электрического КПД.

Для повышения энергоэффективности ЭТК на практике имеет место применение комбинаций из названных путей.

Первый путь достигается применением дополнительного электрооборудования – специальных компенсаторов реактивной мощности, генерирующих реактивную мощность емкостного характера. КРМ подключаются параллельно к каждому электропотребителю или к их группе, потребляющих из электросети реактивную мощность индуктивного характера. Этот путь достаточно ресурсозатратный. Кроме того, технико-экономический эффект от подключения КРМ достигается на участке электросети от узла подключения до узла генерации энергии. Эффект хорошо проявляется в высоковольтных (10 кВ и выше) и менее эффективно в низковольтных (0,4–1,0 кВ) ЭТК. Следует отметить, что доля последних в электрохозяйстве предприятий Российской Федерации составляет не менее 70–80%.

Второй путь – повышение электрического КПД электропотребителя, например создание АД высокого класса энергоэффективности (IE2, IE3, Premium), достигается совершенствованием его электромагнитной системы путем увеличения массы и повышения качества применяемых активных материалов (электротехнической стали, меди, алюминия, электроизоляционных материалов), а также снижением механических потерь при применении энергоэффективных подшипников. Этот путь преимущественно используется европейскими электромашиностроителями. Он достаточно эффективный, позволяет повысить КПД электродвигателей на 2–4,5 %. Однако это ведет к некоторому снижению $\cos\phi$ и значительному удорожанию АД, так как масса электротехнической стали увеличивается до 30%, меди до 25%, алюминия до 15%.

Третий путь реализуется преимущественно за счет компенсации реактивной мощности индуктивного характера непосредственно в электромагнитной системе электропотребителя, например в асинхронном двигателе с индивидуальной компенсацией реактивной мощности [1, 2, 13, 14]. Этот путь позволяет уменьшить потери активной мощности от реактивного тока как непосредственно в электропотребителе, так и во всей силовой электрической цепи ЭТК, а именно от узла подключения АД до узла генерации электрической энергии. Теоретические, экспериментальные исследования и опыт применения энергоэффективных индивидуально компенсированных асинхронных двигателей (ЭАД) в реальных электротехнических комплексах показали хорошую энергоэффективность при незначительных ресурсовложениях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с изложенным, возникает проблема по научно-обоснованной количественной оценке энергоэффективности ЭТК, содержащих АД с различным классом энергоэффективности.

В работе поставлены две главные задачи:

– получить зависимость КПД электротехнического комплекса, содержащего асинхронный двигатель, в функции от главных технических параметров послед-

него и параметров силовой цепи ЭТК;

– исследовать и сравнить энергоэффективность электротехнических комплексов, содержащих различные варианты традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2 и асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности класса IE1.

Первая задача решается в следующей постановке. Получить зависимость величины КПД электротехнического комплекса ($\eta_{\text{ЭТК}}$), содержащего АД, в функции от его КПД (η), коэффициента мощности ($\cos\phi$), коэффициента загрузки (k_3) и параметров силовой цепи ЭТК, применимую в инженерной практике.

Эта задача решается при следующих исходных данных, условиях, допущениях и ограничениях:

– задаются номинальные данные АД: тип двигателя, мощность ($P_{2н}$), напряжение ($U_{1н}$), ток ($I_{1н}$), коэффициент полезного действия (η_n), коэффициент мощности ($\cos\phi_n$);

– коэффициент загрузки (k_3) двигателя изменяется в диапазоне $k_3=0,25-1,25$ с шагом 0,25;

– для принятых k_3 задаются соответствующие значения η и $\cos\phi$;

– учитываются потери активной мощности в силовой цепи ЭТК $\Delta P_{\text{сц}}$ (в силовом трансформаторе, шинпроводах, кабельных линиях, защитно-коммутирующей и управляющей аппаратуре) уравнением вида $\Delta P_{\text{сц}} = k_{\text{сц}} \cdot P_{2н}$;

– для электроприводов, содержащих преобразователи частоты, тиристорные регуляторы напряжения и другую силовую электронику, учитываются потери активной мощности в полупроводниковых преобразователях $\Delta P_{\text{пп}}$ уравнением вида $\Delta P_{\text{пп}} = k_{\text{пп}} \cdot P_{2н}$;

– учитываются потери активной мощности в магнитной ΔP_m и механической $\Delta P_{\text{мех}}$ системах двигателя уравнениями вида: $\Delta P_m = k_m \cdot P_{2н}$; $\Delta P_{\text{мех}} = k_{\text{мех}} \cdot P_{2н}$;

– учитываются дополнительные потери активной мощности ΔP_d в двигателе от токов высокой частоты уравнением вида $\Delta P_d = k_d \cdot P_{2н}$.

Магнитные, механические и дополнительные активные потери мощности принимаются неизменными, т.е. независимыми от коэффициента загрузки, и учитываются произведением $\Delta P_{\text{п}} = k_{\text{п}} \cdot P_{2н}$, где $k_{\text{п}} = k_m + k_{\text{мех}} + k_d$ – коэффициенты, учитывающие соответствующие доли потерь активной мощности от номинальной мощности двигателя.

Потери активной мощности от токов, протекающих по обмоткам асинхронного двигателя и по силовой цепи ЭТК, являются изменяющимися и зависимыми от коэффициента загрузки k_3 . Эти электрические потери мощности ΔP_3 учитываются суммой $\Delta P_3 = \Delta P_{31} + \Delta P_{32}$, где $\Delta P_{31} = m \cdot I_1^2 r_1$ – потери активной мощности в обмотке статора; $\Delta P_{32} = m \cdot I_2' r_2'$ – потери активной мощности в обмотке ротора; m – число фаз АД; r_1 , r_2' – активные сопротивления обмоток статора и ротора, приведенного к обмотке статора; I_1 , I_2' – токи в обмотке статора и ротора, приведенного к обмотке статора.

Потери активной мощности в силовой электронике – преобразователях частоты, тиристорных регуляторах напряжения и др., учитываются через их коэффициенты полезного действия ($\eta_{\text{пп}}$) для номинального режима работы АД произведением $\Delta P_{\text{пп}} = k_{\text{пп}} \cdot P_{2н}$, где

$$k_{\text{пп}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{пп}}} - 1 \right).$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение первой задачи основано на использовании понятия КПД и энергетической диаграммы ЭТК.

Коэффициент полезного действия ЭТК, в относительных единицах, определяется известным отношением

$$\eta_{\text{эtk}} = \frac{P_2}{P_{\text{эtk}}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{сц}} + \Delta P_{\text{пп}} + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где P_2 – полезная мощность АД; $P_{\text{эtk}}$ – потребляемая активная мощность ЭТК.

Отношение (1), с учетом ранее принятых обозначений и коэффициента загрузки, имеет вид:

$$\eta_{\text{эtk}} = \frac{k_3 P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} (k_3 + k_{\text{пп}} + k_{\text{п}}) + m I_1^2 r_{\text{эсц}} + m (I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2')}. \quad (2)$$

В (2) ток в фазе обмотки статора АД и силовой цепи ЭТК определяется известным выражением

$$I_1 = \frac{k_3 P_{2\text{н}}}{m U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \quad (3)$$

где k_3 , η , $\cos \varphi$ – коэффициент загрузки, КПД и $\cos \varphi$, соответствующие коэффициенту загрузки.

Приведенный к обмотке статора ток в фазе обмотки ротора может быть выражен через фазный ток статора для заданного коэффициента загрузки и ток холостого хода

$$I_2' = \sqrt{(I_1 \cos \varphi - I_{1\text{хх}} \cos \varphi_{\text{хх}})^2 + (I_1 \sin \varphi - I_{1\text{хх}} \sin \varphi_{\text{хх}})^2}, \quad (4)$$

где $I_{\text{хх}}$ – фазный ток статора при холостом ходе двигателя; $\varphi_{\text{хх}}$ – сдвиг фаз между напряжением и током при холостом ходе.

Непосредственное использование (2) на практике затруднительно, так как часто бывают неизвестными сопротивления обмоток статора, ротора и сдвиг фаз $\varphi_{\text{хх}}$.

Для получения зависимости КПД ЭТК от его параметров, пригодной для инженерных расчетов, преобразуем (2) к виду

$$\eta_{\text{эtk}} = \frac{k_3 \cdot P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} \left[K_3 + K_{\text{п}} + \left(\frac{1}{\eta_{\text{пп}}} - 1 \right) \right] + m I_1^2 R_3 + m I_1^2 r_{\text{эсц}}}, \quad (5)$$

где R_3 – эквивалентное сопротивление, пропорциональное потерям активной мощности в обмотках АД.

Непосредственное использование (5) возможно при известных величинах I_1 , R_3 и $r_{\text{эсц}}$. Однако R_3 и $r_{\text{эсц}}$ на практике часто бывают неизвестными. Поэтому для инженерных расчетов (5) преобразуем к виду, удобному для практического применения. Для этого электрические потери активной мощности АД $\Delta P_{\text{э}}$, зависящие от его токов, выразим разницей полных и постоянных потерь при номинальном токе, т. е. для $k_3 = 1,0$.

$$\Delta p_{\text{эп}} = \Delta p_{\text{н}} - \Delta p_{\text{п}}. \quad (6)$$

где $\Delta p_{\text{п}}$ – постоянные потери активной мощности АД; $\Delta p_{\text{н}}$ – полные потери активной мощности АД при номинальной нагрузке,

$$\Delta p_{\text{н}} = P_{2\text{н}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right).$$

Тогда (6) преобразуется к виду

$$\Delta p_{\text{эп}} = P_{2\text{н}} \left[\left(\frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right) - k_{\text{п}} \right]. \quad (7)$$

С другой стороны, электрические потери активной мощности в АД можно выразить равенством

$$m I_1^2 R_3 = m \left(\frac{k_3 P_{2\text{н}}}{m U_{1\text{н}} \eta \cos \varphi} \right)^2 R_3. \quad (8)$$

Из анализа (8) следует, что, при неизменных m , $P_{2\text{н}}$, $U_{1\text{н}}$ электрические потери активной мощности прямо пропорциональны квадрату коэффициента загрузки двигателя и обратно пропорциональны квадрату его энергетического КПД η , равному произведению $\eta_{\text{б}} = \eta \cdot \cos \varphi$.

Исходное уравнение (1) с учетом (6-8) и математических преобразований принимает вид

$$\eta_{\text{эtk}} = \frac{k_3}{A + B \cdot C}, \quad (9)$$

где

$$A = k_3 + k_{\text{п}} + k_{\text{пп}};$$

$$B = k_3^2 \left(\frac{\eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}{\eta \cos \varphi} \right)^2;$$

$$C = \frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 - k_{\text{п}} + k_{\text{сц}}.$$

Из анализа (9) следует, что КПД ЭТК зависит не только от КПД АД, но также от его коэффициента мощности и коэффициента загрузки. Кроме того, КПД ЭТК зависит от коэффициентов параметров силовой цепи $k_{\text{сц}}$, а также от энергетических показателей силовой электроники (ПЧ, ТРН и др.), определяемых коэффициентом $k_{\text{пп}}$.

Решение второй поставленной задачи рассмотрим на конкретном примере – электроприводе нефтяной качалки. Выполним расчеты и исследования КПД ЭТК по (9) и сравним энергоэффективности ЭТК, содержащих традиционные асинхронные двигатели с классом энергоэффективности IE1, IE2 и энергосберегающие асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности (ЭАД) класса энергоэффективности IE1.

Пример

Рассмотрим три варианта выполнения электропривода нефтяной качалки.

Вариант 1 – электропривод выполнен на основе

ТАД, типа АИР180М8, мощностью $P_{2H} = 18,5$ кВт, номинальным напряжением $U_{1H} = 220/380$ В, номинальной частотой вращения вала ротора $n_H = 725$ об/мин, класс энергоэффективности двигателя IE1, $\eta_H = 0,88$, $\cos\varphi_H = 0,87$.

Вариант 2 – электропривод выполнен на основе ТАД, типа АИР180М8, мощностью $P_{2H} = 18,5$ кВт, номинальным напряжением $U_{1H} = 220/380$ В, номинальной частотой вращения вала ротора $n_H = 725$ об/мин, класс энергоэффективности двигателя IE2, $\eta_H = 0,91$, $\cos\varphi_H = 0,87$.

Вариант 3 – электропривод выполнен на основе ЭАД, типа АИР180М8, мощностью $P_{2H} = 18,5$ кВт, номинальным напряжением $U_{1H} = 220/380$ В, номинальной частотой вращения вала ротора $n_H = 725$ об/мин, класс энергоэффективности двигателя IE1, $\eta_H = 0,88$, $\cos\varphi_H = 1,0$, изготовленного путем модернизации из ТАД IE1.

По (9) для различных коэффициентов загрузки АД рассчитаны: электрические потери в двигателе, электрические потери в силовой цепи электропривода и коэффициент полезного действия ЭТК. Расчеты выполнены для значений коэффициентов: $k_H = 0,05$; $k_{\text{мш}} = 0,03$; $k_{\text{сц}} = 0,14$. Для каждого коэффициента загрузки АД задаются значения электрического КПД и коэффициента мощности. Результаты расчетов КПД ЭТК для различных вариантов электроприводов представлены графиками на рис. 1.

На рис. 2 представлены графики потерь мощности в силовой цепи ЭТК от применения ТАД класса энергоэффективности IE1, IE2 и ЭАД класса энергоэффективности IE1.

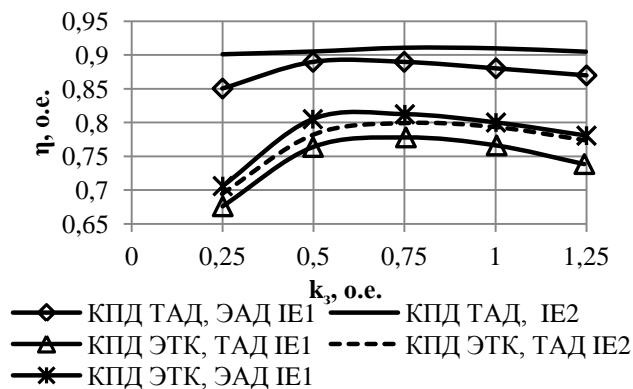


Рис. 1. Зависимости КПД двигателей и ЭТК от коэффициентов загрузки для вариантов электропривода нефтяной качалки

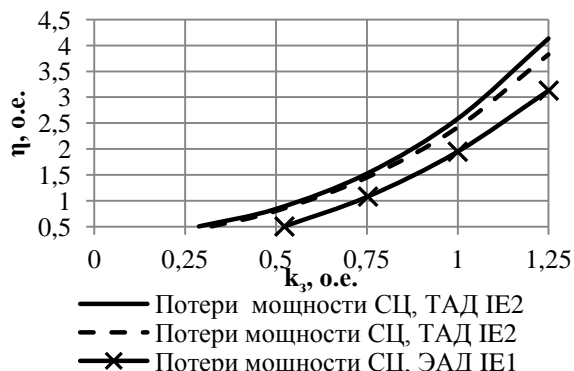


Рис. 2. Потери мощности в ЭТК от применения ТАД класса энергоэффективности IE1, IE2 и ЭАД класса энергоэффективности IE1

Анализ рис. 1 и 2 показывает, что КПД ЭТК на основе применения асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности класса энергоэффективности IE1 выше, чем КПД ЭТК на основе применения традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2. Потери мощности в силовой цепи ЭТК при применении асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности меньше потерь мощности в силовой цепи ЭТК при применении традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены зависимости, позволяющие количественно оценивать коэффициенты полезного действия электротехнических комплексов с различными вариантами асинхронных двигателей.

2. Коэффициент полезного действия электротехнического комплекса зависит не только от КПД асинхронного двигателя, но и от его коэффициента мощности, коэффициента загрузки и параметров силовой цепи.

3. Асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности класса энергоэффективности IE1 в электротехническом комплексе эквивалентен по энергоэффективности традиционным асинхронным двигателям с классом энергоэффективности IE2, созданным с увеличенной массой активных материалов.

4. Электромашиностроителям и электроремонтным предприятиям рекомендуется для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением создавать двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, не увеличивая массы электротехнической стали, меди и алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.
2. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, их технико-экономические преимущества и перспективы применения в промышленных электроприводах // Известия РАН. Энергетика. 2013. №5. С.30-43.
3. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Mathematical model of the static reactive power compensator // Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol. 2. P. 418-425. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958287
4. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter // Proceedings of 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014, Vol.1. P. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897.
5. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Vector control system of the static reactive power compensator // Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2014). Saratov: Bukva, 2014. Vol. 2. P. 418-425. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958287

- neering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol.2. P. 426-433. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958288
6. Храмшин В.Р., Головин В.В., Храмшин Р.Я. Энерго- ресурсосбережение средствами электротехнических систем широкополосного стана горячей прокатки // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т.2. С. 329 – 334.
 7. Частотно-регулируемый электропривод в теплоэнергетическом хозяйстве города: монография / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2014. 201 с.
 8. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Khrumshina E.A. Automatic Control Principles of Thermal Station Output Parameters on the Basis of Controlled Electric Drives. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol.698. P.808-814. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.808
 9. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С.35-39.
 10. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С.40-45.
 11. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками / Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Лукин А.А., Шурыгина Г.В., Головин В.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2010. № 13. С. 67-72.
 12. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дисс. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2013, 393 с.
 13. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Энергоэффективные асинхронные двигатели, технико-экономические преимущества и оптимизация себестоимости их создания // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №2(31). С.30-34.
 14. Регулируемый электропривод как средство энергосбережения в гидравлических системах насосных агрегатов / В.Р. Храмшин, О.И. Карандаева, Ю.И. Мамлеева, О.И. Петухова, Е.А. Храмшина // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 354-360.

Поступила в редакцию 28 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPARATIVE ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS AND ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES WITH THEIR APPLICATION

Rif G. Mugalimov

D.Sc.(Eng.), Professor, director, "NMSTU-Energoberezhnie+" LLC, Magnitogorsk, Russia.

Alia R. Mugalimova

Ph.D.(Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The scope of the research includes energy performance of electrical engineering complexes equipped with asynchronous motors. The paper discusses ways and methods for increasing the efficiency of electrical engineering complexes. It offers dependencies required for quantitative estimation of the efficiency degree of an electrical engineering complex as a function of the efficiency factors, power output and loads of an asynchronous motor. It considers different variants of energy efficient asynchronous motors with IE1 and IE2 energy efficiency class and those with individual compensation of reactive power. Their influence on the efficiency degree of the electrical engineering complex has been investigated. Using the electric drive of an oil pumping unit as an example, it is shown that the efficiency degree of the electrical engineering complex equipped with an asynchronous motor with individual compensation of reactive power with power factor equal to one and IE1 energy efficiency is equivalent to that of the electrical engineering complex equipped with a conventional asynchronous motor of IE2 energy efficiency class. The paper provides results of efficiency factor calculation for various variants of electric drives. The obtained dependencies and estimation outcomes may be useful for manufacturers and operators of asynchronous motors.

Keywords: electrical engineering complex, asynchronous motor, efficiency degree, power factor, energy efficiency, equation, calculation, analysis.

REFERENCES

1. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moschnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Asynchronous Motors with Independent Reactive Power Compensation and Corresponding Electric Drives. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 250 p.
2. Mugalimov R.G, Mugalimova A.R. Asynchronous Motors with Individual Compensation of Reactive Power, their Engineering and Economic Benefits and Prospects for Application in Industrial Electric Drives. *Izvestiya RAN. Energetika* [Bulletin of the Russian Academy of Science. Power engineering], 2013, no.5, pp.30-43. (In Russian)
3. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Mathematical model of the static reactive power compensator. Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol. 2. P. 418-425. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958287
4. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter. Proceedings of 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014, Vol.1. P. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897.
5. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Vector control system of the static re-

- active power compensator. Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol.2. P. 426-433. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958288
6. Khramshin V.R., Golovin V.V., Khramshin R.Ya. Energy and Resource Saving Using Electrical Engineering Systems of Wide Strip Hot Rolling Mill. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of VIII International (XIX All-Russian) conference on automatic electric drive AEP-2014]. Saransk, Publishing center of Mordovia University, 2014, vol.2, pp.329 – 334. (In Russian)
 7. Krylov Yu.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshin R.R. *Chastotno-reguliruemyy elektroprivod v teploenergeticheskom khozyaystve goroda* [Variable Frequency Electric Drive in Heat and Power Facilities of the City]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 201 p.
 8. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshina E.A. Automatic Control Principles of Thermal Station Output Parameters on the Basis of Controlled Electric Drives. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol.698. P.808-814. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.808
 9. Golovin V.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R. Energy-saving Thyristor Electric Drives with Automatic Coordinate Variation, which is Controlled by Circuit Condenser. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 35-39. (In Russian)
 10. Golovin V.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R. Performance Evaluation of Applying Thyristor Electric Drive with Automatic Coordinate Variation, which is Controlled by Circuit Condenser. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 40-45. (In Russian)
 11. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Lukin A.A., Shurygina G.V., Golovin V.V. Experimental Research of Thyristor Electric Drives with Two-zone Speed Control with Improved Energetic Characteristics. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Series "Power engineering"], 2010, no.13, pp.67-72.
 12. Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy stana goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos.* Doct. Diss. [Development of Electrotechnical Systems for Continuous Train of Hot Rolling Mill in the Process of Product Range Expansion Doct. Diss.]. Magnitogorsk, 2013, 393 p.
 13. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Energy Efficient Induction Motors, their Technical and Economic Advantages and Optimization of their Production Cost. *Elektrotehnicheskie sistmy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2016, no.2(31), pp.30-34.
 14. Khramshin V.R., Karandaeva O.I., Mamleeva Yu.I., Petukhova O.I., Khramshina E.A. Controlled electric drive as a meaning of power saving in hydraulic systems of pumping unit. *Elektrotehnicheskie sistmy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2012, no. 20, pp. 354-360.
-
- Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Сравнительная оценка класса энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.14-19. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-14-19
- Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Comparative Estimation of Energy Efficiency of Asynchronous Motors and Electrical Engineering Complexes with their Application. *Elektrotehnicheskie sistmy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.14-19. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-14-19 (In Russian)
-