

REFERENCES

1. *Energoberezenije i avtomatizacija elektrooborudovanija kompressornyh stancij: Monografija* [Energy efficiency and automation of compressor stations electrical equipment: monograph]. Edited by Krjukov O.V. Nizhnij Novgorod: Vector TiS, 2010, 560 p.
2. *Energeticheskaja strategija Rossii na period do 2020 goda* [Russia energy strategy for the period until 2020 year]. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 28 avgusta 2003 g. No.1234-r.* [Russian Federation Government decree of August, 28 2003, No.1234-r].
3. Krasnov D.V., Onishhenko G.B. *Otsenka potrebnosti v*

vysokovol'tnyh reguliruemymykh elektroprivodah peremennogo toka [Evaluation of high-voltage controlled alternating-current drive necessity]. *Izvestija tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* [Journal of Tula state university. Technical sciences], 2010, no. 3, vol. 1, pp. 73-81.

4. Krjukov O.V. *Analiz i tehnickeskaja realizacija faktorov energoeffektivnosti innovacionnykh reshenij v elektroprivodnykh turbokompressorah* [Analysis and technical implementation of innovative solutions energy efficiency factors in electric driven turbo-compressors]. *Avtomatizacija v promyshlennosti* [Automation in industry], 2010, no. 10, pp. 50-53.

УДК 621.311

Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Губайдуллин А.Р.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИНДИВИДУАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ

Рассматриваются варианты повышения энергоэффективности электроприводов механизмов метизной промышленности. На примере электроприводов волочильных станов исследованы варианты компенсации реактивной мощности. Показано, что наилучшим вариантом повышения энергоэффективности путем компенсации реактивной мощности является вариант создания электроприводов волочильных станов на основе компенсированных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: энергоэффективность, электропривод, асинхронный двигатель, реактивная мощность, волочильный стан, компенсация реактивной мощности.

ВВЕДЕНИЕ

В метизной промышленности проблемы снижения себестоимости, повышения энергоэффективности и конкурентоспособности продукции являются актуальными. В данной публикации рассматривается задача снижения электропотребления волочильного отделения метизного предприятия. В частности, в системе цехового электроснабжения напряжением 0,4 кВ метизного предприятия отсутствуют компенсаторы реактивной мощности на линиях 6/10 кВ осуществляется не на всех вводах понизительных подстанций. В этой связи цеховые системы электроснабжения перегружены реактивными токами, что ведет к существенным потерям активной мощности и снижению энергоэффективности технологических участков. Потери электрической энергии от реактивных токов составляют не менее 25-40% от общих потерь электроэнергии. Например, в среднем за один год ОАО «ММК-МЕТИЗ» расходует 32 млн кВт·час электроэнергии. Суммарные потери электроэнергии составляют от 18 до 24%, то есть 5-8 млн кВт·ч. Доля потерь электрической энергии от реактивных токов составляет 1,5-3 млн. кВт·ч [1-3].

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНОВ

Для решения обозначенной проблемы поставлены задачи: 1) определение оптимального варианта компенсации реактивной мощности в цеховых электросетях 0,4 кВ; 2) реализация оптимального варианта компенсации реактивной мощности.

Для решения поставленных задач выделили схему электроснабжения одного из волочильных отделений

ОАО «ММК-МЕТИЗ». На рис. 1 приведена схема электроснабжения волочильного цеха.

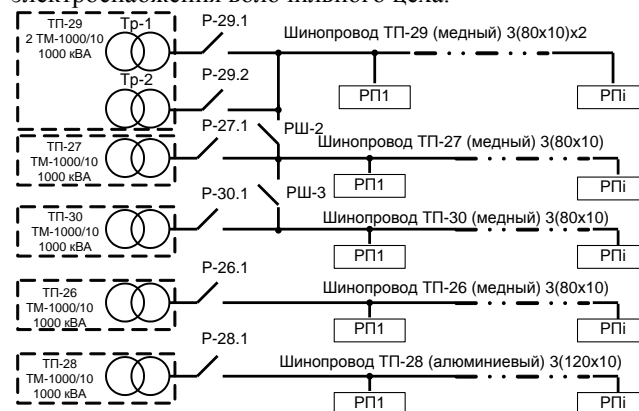


Рис. 1. Схема электроснабжения сталепроволочного отделения

Схема электроснабжения состоит из пяти трансформаторных подстанций (ТП) и пяти шинопроводов с суммарной мощностью установленных асинхронных двигателей $P_{уст.общ} = 5949,5$ кВт. ТП-29 содержит два трансформатора ТМ-1000/10, ТП-27, ТП-30, ТП-26, ТП-28 – по одному трансформатору ТМ-1000/10. Предусмотрена параллельная работа шинопроводов ТП-29, ТП-27, ТП-30 от четырех трансформаторов. Параллельная или раздельная работа трансформаторов зависит от объема производства и коэффициента использования технологического оборудования ($K_{и}$). В схеме электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ отсутствуют компенсаторы реактивной мощности (КРМ).

Из приведенной схемы (см. рис. 1) выделили схему электроснабжения участка волочения. Этот участок

является магистрально-радиальным и имеет схему, представленную на **рис. 2**.

Магистральный шинопровод ТП-27 подключен к распределительному устройству РУ-0,4 кВ ТП-27 через автомат АВМ-20 с номинальным током 2000 А к трансформатору ТМ-1000/10 с номинальными данными: $S_n=1000$ кВА; $U_{1n}=10$ кВ; $U_{2n}=0,4$ кВ; $I_n=100$ А; $\eta_n=0,95$; $U_k=0,05 \cdot U_{1n}$; $I_0=0,015 \cdot I_n$; $P_{к.з.}=12,2$ кВт; $P_0=1,9$ кВт; схема соединения обмоток – Y/Y.



Рис. 2. Схема электроснабжения ТП-27

От магистрального шинопровода радиально подключены распределительные пункты – РП: РП-30 – питает волоочильный стан №39; РП-31 – волоочильный стан №40; РП-34 – кран балки №306,307; РП-32 – волоочильные станы №43,44; РП-11 – волоочильные станы №34,33,32; РП – 8 волоочильный стан №11 и аварийное освещение; РП-7 – волоочильный стан №10; РП-6 – волоочильный стан №9; РП-5 – волоочильные станы №6,8; РП-3 – волоочильные станы №7,5; РП-36 – кран балки №308,309,310 и кран мостовой №320; РП-1 – питает здание АБК, водяной насос и отсекагель автомобильных ворот. Параметры волоочильных станков и главные их характеристики электроприводов приведены в **табл. 1**; номинальные параметры эквивалентированных нагрузок, подключенных к соответствующим РП, – в **табл. 2**.

Коэффициент загрузки электрооборудования, подключенного к системе шин ТП-27, составляет 0,85–1,0. Коэффициент использования волоочильного и дру-

го технологического оборудования может изменяться в диапазоне 0,45–0,75 и зависит от количества заказов на продукцию. Номинальная частота и напряжение основного электрооборудования стандартная: 50 Гц, $U_1=220/380$ В.

В **табл. 2**: $P_{уст}$ – установленная мощность; I – потребляемый ток; $\cos\phi$ – коэффициент мощности.

Для количественной оценки потерь электрической энергии провели моделирование расхода энергии на выбранном участке для следующих вариантов компенсации реактивной мощности:

1. Без применения КРМ для существующей системы электроснабжения и электроприводов, созданных на основе традиционных асинхронных двигателей (ТАД).
2. С подключением КРМ параллельно электроприводам, созданных на основе ТАД, для существующих систем электроснабжения.
3. С подключением КРМ на систему шин РУ 0,4 кВ ТП-27 для существующей системы электроснабжения и электроприводов, созданных на основе ТАД.
4. С подключением КРМ на каждый РП для существующей системы электроснабжения и электроприводов, созданных на основе ТАД.
5. Для существующей системы электроснабжения с применением энергосберегающих асинхронных двигателей (ЭАД) с индивидуальной компенсацией реактивной мощности [4-18].

На **рис. 3, 4** приведены фрагменты эквивалентной схемы замещения ТП-27, системы электроснабжения для питания электродвигателей волоочильных станков, реализованных на ТАД и ЭАД соответственно.

Таблица 1

Параметры волоочильных станков и характеристики электроприводов

№ стана	Тип стана	Количество двигателей, шт.	Мощность двигателя, кВт	Мощность двигателя моталки и других механизмов, кВт	Маршрут волоочения, мм ²
39	UDZSA2500/1	1	22	1,7*	1,4->0,5
40	UDZSA2500/1	1	40	1,7*	1,4->0,5
43	UDZSA2500/1	1	22	1,7*	1,4->0,1
44	UDZSA2500/1	1	22	1,7*	1,4->0,1
34	UDZSA2500/7	7	18,5	28	3->1,4
33	UDZSA2500/7	7	18,5	28	3->1,4
32	UDZSA2500/5	5	55	28	6,5 -> 2,5
11	UDZSA2500/3	3	55	28	6,5 -> 4
10	UDZSA2500/2	2	55	28	6,5 -> 5
9	UDZSA2500/2	2	90	28	6,5 -> 5
6	UDZSA2500/4	4	55	28	6,5 -> 3,5
8	UDZSA2500/2	2	55	28	6,5 -> 5
7	UDZSA2500/4	4	55	28	6,5 -> 3,5
5	UDZSA2500/4	4	55	28	6,5 -> 3,5

*Двигатель насоса подачи эмульсии для станков мокрого волоочения

Таблица 2

Параметры эквивалентированных нагрузок, подключенных к РП

Параметр	РП-1	РП-36	РП-3	РП-5	РП-6	РП-7	РП-8	РП-11	РП-32	РП-31
$P_{уст}$, кВт	63	54	516	406	215	140	210	485	50	40
I , А	96	82	784	617	327	213	320	738	76	61
$\cos\phi$, о.е.	0,87	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

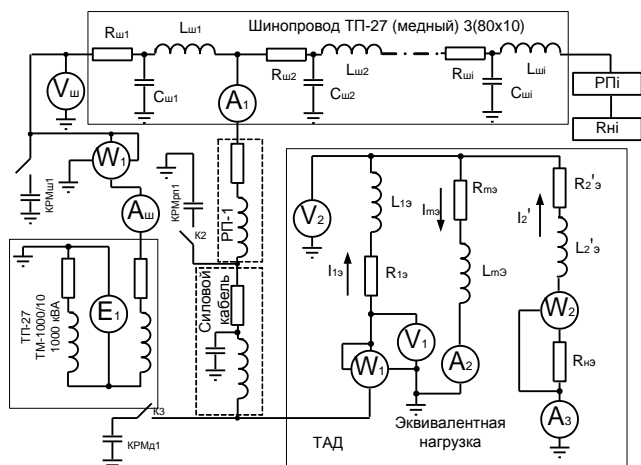


Рис. 3. Фрагмент эквивалентной схемы замещения ТП-27, реализованной на ТАД

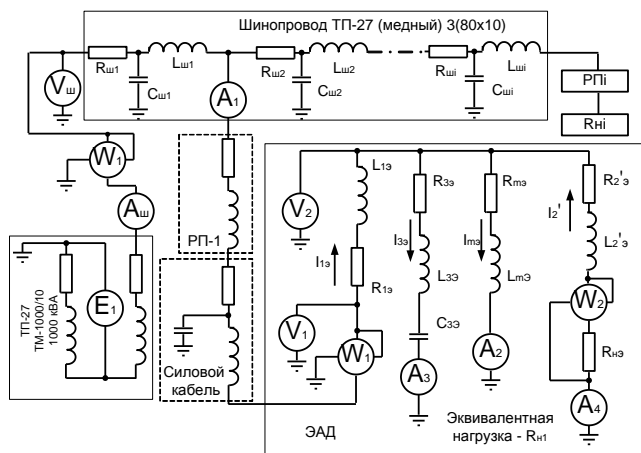


Рис. 4. Фрагмент эквивалентной схемы замещения ТП-27, реализованной на ЭАД

УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. Волочение проволоки организовано в три смены. В смену производственный план распределяется на волочильные станы с учетом допустимой мощности загрузки ТП-27. В случае превышения допустимой нагрузки на ТП-27 предусматривается параллельная работа ТП-27 и ТП-30. ТП-30 аналогичен по своим характеристикам ТП-27.
2. Электроприводы волочильных станов работают с реальными коэффициентами загрузки 0,7–0,85.
3. Коэффициент использования волочильного оборудования изменяется в диапазоне 0,45–0,85.
4. Работа волочильного участка цеха организована по трехсменному графику.

5. Потери электроэнергии в переходных процессах, связанных с пусками и остановками электроприводов, толчковые режимы при заправке волочильных станов учитываются путем корректирования средних значений потерь мощности через введенный дополнительный коэффициент $K_{п.т.}$. Это позволяет дополнительно увеличить точность моделирования потерь электроэнергии в системе электроснабжения волочильных станов.

УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. Эквивалентные трехфазные асинхронные двигатели и силовые трансформаторы представлены их Т-образными электрическими схемами замещения и являются линейными.
2. Эквивалентные трехфазные нагрузки, подключенные к соответствующим РП, являются симметричными.
3. Моделируется одна фаза симметричной трехфазной системы электроснабжения и эквивалентной нагрузки.
4. Моделируются установившиеся процессы волочения проволоки.
5. Электрические нагрузки вспомогательных механизмов: электрозаточные станки, сварочные трансформаторы, электроприводы волокуш мотков проволоки, мощностью менее 3 кВт и продолжительностью включения (ПВ) менее 10%, не учитываются.
6. Потери электроэнергии в системе электроснабжения определяются для установившихся режимов работы трехфазной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Усредненные значения энергетических показателей распределительных пунктов (РП) за сутки с подключенными к нему нагрузками, приведены в табл. 3.

В табл. 3: $P_{уст}$ – средняя установленная мощность нагрузки за сутки, полученная расчетным путем, при напряжении питания непосредственно на асинхронных двигателях $U_1=220$ В; P_1 – средняя активная мощность, потребляемая РП за сутки; P_2 – средняя полезная мощность, потребляемая эквивалентированным электроприводом за сутки; I_1 – средний ток; $\cos\phi_{РП}$ – коэффициент мощности; $\eta_{РП-АД}$ – коэффициент полезного действия системы «распределительный пункт – асинхронный двигатель волочильного стана»; $\eta_{ср}$ – средний коэффициент полезного действия системы «силовой трансформатор – асинхронный двигатель волочильного стана»; ΔP – потери активной мощности при различных вариантах компенсации реактивной мощности.

Таблица 3

Средние значения показателей РП за сутки

$P_{уст}^*$, кВт	P_1 , кВт	P_2 , кВт	I_1 , А	$\cos\phi_{РП}$, о.е.	$\eta_{РП-АД}$, о.е.	$\eta_{ср}$, о.е.	ΔP , кВт
918	1017	904	1652	0,92	0,89	0,86	152
918	1018	908	1656	1,00	0,9	0,87	143
918	1017	904	1652	0,92	0,9	0,86	150
918	1020	908	1656	1,00	0,9	0,86	146
951	990	911	1505	1,00	0,93	0,89	110

*Расчетная мощность при фазном напряжении питания 220 В

Анализ результатов моделирования показывает, что пятый вариант компенсации реактивной мощности является предпочтительным по всем показателям. Например, на **рис. 5** приведены диаграммы потерь электрической мощности для разных вариантов эксперимента при неизменной полезной мощности электроприводов.

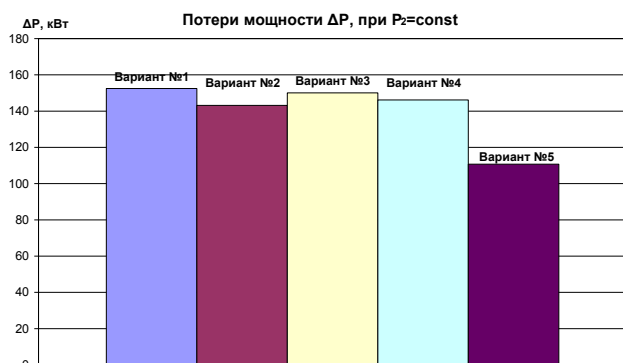


Рис. 5. Потери электрической мощности при P₂=const

Анализ диаграмм свидетельствует: варианты 2, 3, 4 по сравнению с первым вариантом позволяют уменьшить потери мощности от 2,5 до 9,3 кВт; пятый вариант, по сравнению с первым вариантом, позволяет уменьшить потери мощности на 41,8 кВт; пятый вариант, по сравнению со средними потерями 2, 3, 4 вариантов, позволяет уменьшить потери мощности от 32,5 до 39,3 кВт.

Анализ данного показателя подтверждает эффективность электроприводов на основе ЭАД для волочильных станов. Распространяя полученные результаты исследований на установленную мощность традиционных асинхронных двигателей P_{уст}=5949,5 кВт технологического оборудования цеха ЦМС-СПО, можно ожидать снижение потерь электрической мощности по цеху до 115,3 кВт. В существующей системе электроснабжения и применяемых электроприводов на основе традиционных асинхронных двигателей для волочильных станов, при среднем коэффициенте использования оборудования за один год теряется 601017 кВт·ч электроэнергии стоимостью 1,6 млн руб., при средней стоимости 1 кВт·ч 2,65 руб.

Показано, что компенсацию реактивной мощности в цехах метизного производства целесообразно осуществлять путем применения электроприводов на основе ЭАД для волочильного и другого оборудования.

Разработана функциональная схема автоматизированного электропривода на основе ЭАД для волочильного стана UDZSA 2500 [1,2]. Одним из главных требований к электроприводу волочильного стана является сравнительно большой пусковой момент. По технологии, изложенной в [19], выполнена модернизация ТАД типа SMR-250 на ЭАД.

На **рис. 6** приведены естественные механические характеристики ТАД и ЭАД.

Анализ механических характеристик ТАД и ЭАД, позволяет утверждать:

- номинальный момент ТАД – M_{н.ТАД}=369,6 Н·м, номинальный момент ЭАД – M_{н.ЭАД}=370 Н·м, т.е. практически одинаковые;
- пусковой момент ТАД равен M_{п.ТАД}=625 Н·м, пус-

ковой момент ЭАД – M_{п.ЭАД}=760 Н·м, что на 21,6% выше пускового момента ТАД;

– критический момент ТАД равен M_{к.ТАД}=1350 Н·м, критический момент ЭАД – M_{к.ЭАД}=1470 Н·м, что на 8,89% выше, чем критический момент ТАД.

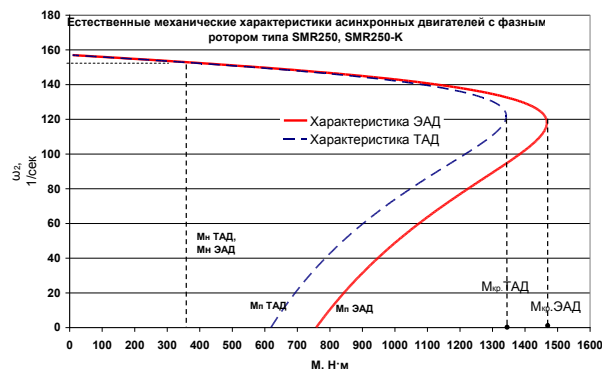


Рис. 6. Естественные механические характеристики ЭАД и ТАД

Результаты моделирования динамических процессов пуска и приложения технологической нагрузки на ЭАД приведены в [20,21].

Для сравнения и подтверждения основных энергетических показателей двигателей, работающих под нагрузкой, волочение проволоки, на **рис. 7, 8** приведены осциллограммы напряжения, тока и мощности, потребляемых из электросети, ТАД и ЭАД в установившихся режимах волочения.

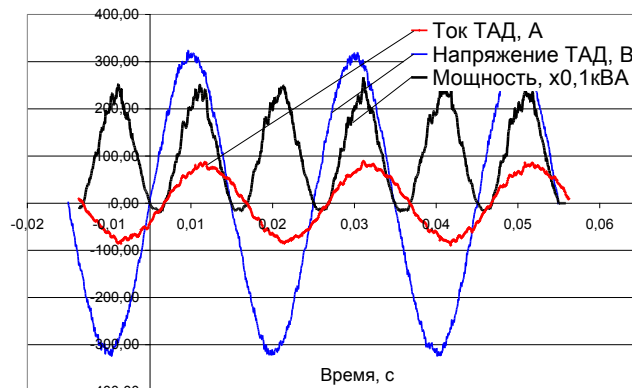


Рис. 7. Осциллограммы питающего напряжения, тока и мощности ТАД при волочении проволоки

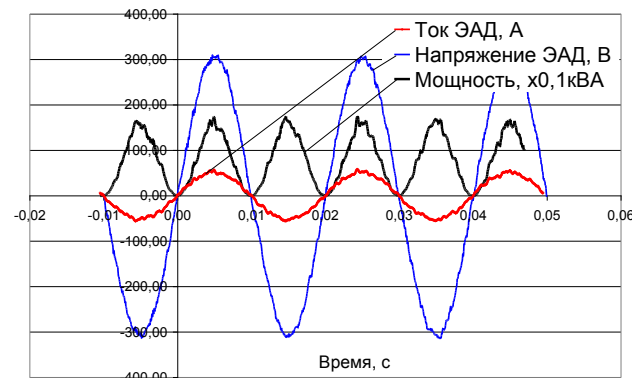


Рис. 8. Осциллограммы питающего напряжения, тока и мощности ЭАД при волочении проволоки

Анализ осциллограмм на **рис. 7, 8** показывает:

1. В ЭАД сдвиг фаз между питающим напряжением-

ем и потребляемым током практически равен нулю, коэффициент мощности двигателя $\cos\varphi=1,0$; действующее значение тока, потребляемого из электросети, равно $I_1=46$ А; активная мощность, потребляемая из электросети, равна $P=10,1$ кВт на фазу; реактивная мощность, потребляемая из электросети, практически отсутствует, $Q=0$. Полная мощность, потребляемая электродвигателем, равна $S=3\cdot\sqrt{P^2+Q^2}=30,3$ кВА. Коэффициент загрузки двигателя по активной мощности составляет 55% от $P_{2н}=55$ кВт.

2. В ТАД сдвиг фаз между питающим напряжением и потребляемым током составляет 30-31 электрических градусов, коэффициент мощности двигателя $\cos\varphi=0,86$; действующее значение тока, потребляемого из электросети, равно $I_1=64$ А; активная мощность, потребляемая из электросети, равна $P=12$ кВт на фазу; реактивная мощность, потребляемая из электросети, равна $Q=7,25$ кВАр на фазу. Полная мощность, потребляемая из сети, $S=3\cdot\sqrt{P^2+Q^2}=42,24$ кВА. Коэффициент загрузки двигателя по активной мощности составляет 65% от $P_{2н}=55$ кВт.

3. Сравнительный анализ показателей работы ТАД и ЭАД под нагрузкой позволяет отметить - ток ЭАД, потребляемый из электросети, в 1,32 - 1,39 раза меньше тока ТАД; коэффициент мощности ЭАД равен 1,0, что на 16,28 % больше коэффициента мощности ТАД; реактивная мощность ЭАД, потребляемая из электросети, равна нулю.

На рис 9, 10 приведены осциллограммы энергий, потребляемых электродвигателями, при пуске под нагрузкой - волочении проволоки.

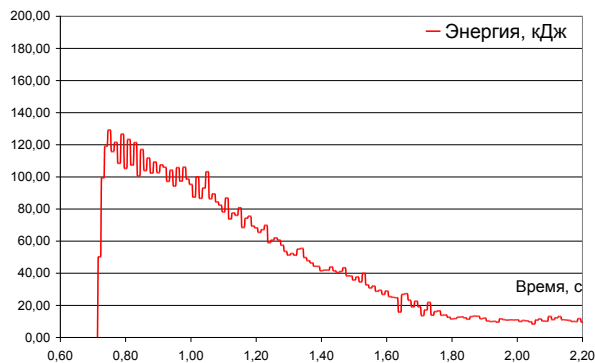


Рис. 9. График энергии, потребляемой из электросети, ЭАД для одной фазы при пуске под нагрузкой

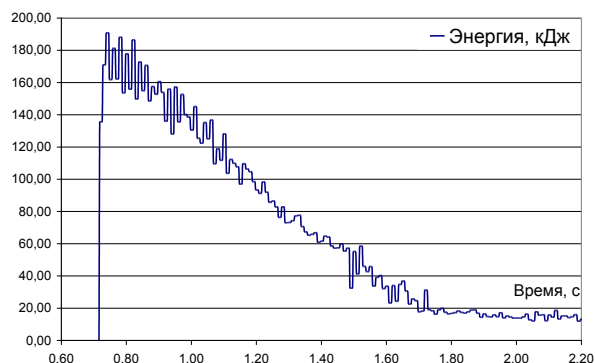


Рис. 10. График энергии, потребляемой из электросети, ТАД для одной фазы при пуске под нагрузкой

Анализ осциллограмм – графиков энергий на рис. 9, 10 показывает, что энергия затрачиваемая ЭАД и ТАД на пуск под нагрузкой составляет 177 кДж и 247,28 кДж соответственно, что в 1,38 раза меньше энергии ТАД, затрачиваемой на разгон волоочильного блока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований позволяют сделать следующие главные выводы:

1. Модернизированный асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности отвечает главному требованию электропривода по пусковому моменту.

2. При работе под нагрузкой в установившемся и динамическом режимах модернизированный асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности является энергосберегающим и энергоэффективным.

3. Повышение энергоэффективности рабочих машин и механизмов метизных предприятий возможно путем массового применения модернизированных асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мугалимов Р.Г., Губайдуллин А.Р., Мугалимова А.Р. Экспериментальные исследования электроприводов волоочильного стана на основе энергосберегающих асинхронных двигателей // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 43-47.
2. Опыт создания энергосберегающих электроприводов волоочильных станов / Губайдуллин А.Р., Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Кретов С.В. // Промышленная энергетика. 2009. №7. С. 11-15.
3. Мугалимов Р.Г., Губайдуллин А.Р., Кретов С.В. Автоматизированный энергосберегающий электропривод на основе применения асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности для волоочильных станов // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». - Иваново, 2012. Т.1. С. 541-545
4. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 Н02 к 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / Р.Г. Мугалимов, А.Л. Савицкий, Л.Д. Савицкая // Открытия. Изобретения. 1998. №15.
5. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та, 2011. 250 с.
6. Мугалимов Р.Г., Губайдуллин А.Р., Мугалимова А.Р. Электроприводы на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности для волоочильных станов // Электротехника. 2009. №10. С. 22-28.
7. Мугалимов Р.Г., Косматов В.И., Мугалимова А.Р. Исследование электропотребления и энергоэффективности насосных агрегатов на основе энергосберегающих асинхронных двигателей // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Ч. 4. С. 65-70.
8. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Определение емкости компенсирующего конденсатора асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Ч. 4. С. 115-120.
9. Мугалимов, Р.Г. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на

их основе // Вестник Магнитогорского государственного технического университет им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 59-63.

10. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университет им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 59-64.

11. Мугалимов Р.Г. Моделирование энергоэффективности электроприводов насосных агрегатов на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Приводная техника. 2011. №1. С. 3-9.

12. Мугалимов, Р.Г. Экспериментальные исследования энергоэффективности нерегулируемых электроприводов насосных агрегатов на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Приводная техника. 2011. №2. С. 2-8.

13. Экспериментальные исследования энергосберегающих электроприводов насосных агрегатов / Р.Г. Мугалимов, В.И. Косматов, А.Р. Мугалимова, А.Р. Губайдуллин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 95-101.

14. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Мугалимова М.Р. Перспективы применения асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности в промышленных электроприводах // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. Вып. 6. С. 114-118.

15. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. К проектированию энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые энергомеханические системы: труды III Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 77-80.

бурж: УГТУ-УПИ, 2007. С. 77-80.

16. Мугалимов Р.Г. Математическая модель энергосберегающего индивидуально-компенсированного асинхронного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 69-73.

17. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и методика их электромагнитного расчета // Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: сб. докл. седьмой международной научно-технической конференции «ЭЛМАШ-2009», М., 2009. С. 149-154.

18. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Методика пересчета электромагнитных параметров традиционного АД на параметры АД с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электроприводы переменного тока: труды Международной 15 научно-технической конференции. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ», 2012. С. 23-26.

19. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Технология реконструкции традиционных асинхронных двигателей на энергосберегающие варианты // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С.56-61.

20. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Математическое описание электропривода на основе энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С.78-89.

21. Косматов В.И., Мугалимов Р.Г. Математическое описание стационарного и динамического режимов работы асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Т. 1 / отв. за вып. И. В. Гуляев. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 206-210.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC DRIVE BASED ON INDUCTION MOTORS WITH INDIVIDUAL REACTIVE POWER COMPENSATION FOR DRAWBENCH

Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Gubaidullin A.R.

The article reviews the options for increasing energy efficiency of electric drives mechanisms in hardware industry. The option of reactive power compensation were researched by the example of drawbench electric drives. It was indicated, that the best option for energy efficiency increasing by individual reactive power compensation is the way of drawbench electric drives based on compensated induction motors creating.

Keywords: energy efficiency, electric drive, induction motor, reactive power, drawbench, reactive power compensation.

REFERENCES

1. Mugalimov R.G., Gubajdullin A.R., Mugalimova A.R. *Jeksperimental'nye issledovaniya jelektroprivodov volochil'nogo stana na osnove jenergosberegajushhij asinhronnyh dvigatelej* [Experimental researches of electric drives for drawbench based on energy saving induction motors]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no. 1, pp. 43-47.

2. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Gubajdullin A.R., Kretov S.V. *Opyt sozdaniya energosberegajushhij elektropriwodov volochil'nyh stanov* [The experience of creation energy saving drawbench electric drives]. *Promyshlennaja energetika* [Industrial power]. 2009, no. 7, pp. 11-15

3. Mugalimov R.G., Mugalimova M.R., Gubajdullin A.R., Kretov S.V. *Avtomatizirovannyj energosberegajushhij elektropriwod na osnove primenenija asinhronnyh dvigatelej s*

individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti dlja volochil'nyh stanov [Automated energy saving electric drive based on using induction motors with individual reactive power compensation for drawbench]. *Trudy VII Mezhdunarodnoj (XVIII Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AJeP-2012* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) automated electric drive conference AED - 2012. 2012, vol. 1, pp. 541-545.

4. The patent 2112307 RU, MCI 6 H02 to 17/28. *Asinkhronnaya kompensirovannaya elektricheskaya mashina* [The asynchronous compensated electrical machine]. R.G. Mugalimov, A.L. Savitsky, L.D. Savitskaya. *Opening. Inventions*. 1998. No.15.

5. Mugalimov R.G. *Asinhronnye dvigateli s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti i elektroprirody na ih osnove* [Induction motors with individual reactive power compensation and electric drives based on them]. Magnitogorsk: The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 250 p.

6. Mugalimov R.G., Gubajdullin A.R., Mugalimova A.R. *Jelektroprirody na osnove asinhronnyh dvigatelej s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti dlja volochil'nyh stanov* [Electric drives based on induction motors with individual reactive power compensation for drawbench]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2009, no. 10, pp. 22-28.

7. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. *Issledovanie elektropotreblenija i energojeffektivnosti nasosnyh*

agregatov na osnove energosberegajushhikh asinhronnyh dvigatelej [Research of power consumption and power efficiency of electric drives of pump units on the basis of energy saving induction motors]. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki* [Proceedings of the TulGU. Technical sciences]. 2010, issue 3, part 4, pp. 65-70.

8. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. *Opreделение emkosti kompensirujushhego kondensatora asinhronnogo dvigatelja s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti* [Calculating of capacity of the compensating condenser of the asynchronous engine with individual indemnification of reactive power]. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki* [Proceedings of the TulGU. Technical sciences]. issue 3, part 4, pp. 115-120.

9. Mugalimov R.G. *Koncepcija povyshenija energojeffektivnosti asinhronnyh dvigatelej i elektroprivodov na ih osnove* [The concept of increasing the energy efficiency of induction motors and electric drives on their basis]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 59-63.

10. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. *Modelirovanie pokazatelej energojeffektivnosti variantov elektroprivodov promyshlennyh ustanovok na osnove primeneniya tradicionnyh i kompensirovannyh asinhronnyh dvigatelej* [The simulation of energy efficiency options for electric drives of industrial systems on the basis of using traditional and compensated induction motors]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 2, pp. 59-64.

11. Mugalimov R.G. *Modelirovanie jenergojeffektivnosti elektroprivodov nasosnyh agregatov na osnove asinhronnyh dvigatelej s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti* [The simulation of energy efficiency of units pump electric drives based on induction motors with individual reactive power compensation]. *Privodnaja tehnika* [Driven equipment]. 2011, no. 1, pp. 3-9.

12. Mugalimov R.G. *Eksperimental'nye issledovaniya energojeffektivnosti nereguliruemym elektroprivodov nasosnyh agregatov na osnove asinhronnyh dvigatelej s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti* [Experimental research of energy efficiency of fixed electric drives of units pump based on induction motors with individual reactive power compensation]. *Privodnaja tehnika* [Driven equipment]. 2011, no. 2, pp. 2-8.

13. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R., Gubajdullin A.R. *Eksperimental'nye issledovaniya energosberegajushhikh elektroprivodov nasosnyh agregatov* [Experimental research of energy saving of electric drives units pump]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 95-101.

14. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Mugalimova M.R. *Perspektivy primeneniya asinhronnyh dvigatelej s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti v promyshlennyh elektroprivodah* [Perspectives of using induction motors with individual reactive power compensation in industrial electric drives]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2012, no. 6, pp. 114-118.

15. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. *K proektirovaniyu*

energoberegajushhego asinhronnogo dvigatelya s individualnoi kompensatsiej reaktivnoi moshhnosti [For the design of energy-efficient induction motor with individual compensation of reactive power]. *Elektromekhanicheskie i elektromagnitnie preobrazovateli energii i upravlyaemie energomechanicheskie sistemy* [Electromechanical and electromagnetic energy converters the managed energy-mechanical systems]: proceedings of the III International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg: Ural State Technical University, 2007, pp. 77-80.

16. Mugalimov R.G. *Matematicheskaja model' energosberegajushhego individual'no-kompensirovannogo asinhronnogo dvigatelja* [Mathematical model of energy saving individually compensated induction motor]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2004, no. 2, pp. 69-73.

17. Mugalimov R.G. *Asinhronnye dvigateli s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti i metodika ih elektromagnitnogo rascheta* [Induction motors with individual reactive power compensation and the method of their electromagnetic calculation]. *Elektrojenergetika i elektrotehnika. Problemy i perspektivy. Sb. dokl. sed'moj mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii «JeLMASH-2009»* [Electromechanics and Electrical engineering. Problems and perspectives. Proceedings of seventh International scientific and technical conference "JeLMASH-2009"]. 2009, pp. 149-154.

18. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. *Metodika perescheta jelektromagnitnyh parametrov tradicionnogo AD na parametry AD s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti* [Procedure of recalculating electromagnetic parameters from traditional induction motor to induction motor with individual reactive power compensation]. *Elektroprivody peremennogo toka: trudy Mezhdunarodnoj 15 nauchno-tehnicheskoi konferencii. Ekaterinburg: UGTU-UPI*. [Electric drives of AC current: proceedings 15th International scientific and technical conference. Ekaterinburg:UrFU]. 2012, pp. 23-26.

19. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. *Tekhnologiya rekonstruktsii traditsionnykh asinhronnykh dvigatelej na energosberegajushchie variant* [Technology for re-construction of traditional induction motors to energy saving variants]. *Mashinostroenie* [Electronic Journal «Engineering»]. 2013, no.1, pp. 56-61.

20. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. *Matematicheskoe opisanie elektroprivoda na osnove energosberegajushhego asinhronnogo dvigatelja s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti* [Mathematical description of the electric drive based on the energy-saving induction motor with individual reactive power compensation]. *Mashinostroenie* [Electronic Journal «Engineering»]. 2013, no. 2, pp. 78-89.

21. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. *Matematicheskoe opisanie stacionarnogo i dinamicheskogo rezhimov raboty asinhronnogo dvigatelja s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti* [Mathematical description of stationary and dynamic work modes of induction motor with individual reactive power compensation]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoj (XIX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AJeP-2014* [Proceedings of VIII International (XIX All-Russian) automatic electric drive conference]. 2014, vol.1, pp. 206-210.