

ЭКОНОМИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.В. Давтян

Национальный политехнический университет Армении

Обоснована необходимость экономии расхода электроэнергии, используемой в процессе измельчения руды, для повышения эффективности производства металлических концентратов. Путем анализа известных работ произведена классификация основных способов экономии расхода электроэнергии, применяемых в технологическом процессе. Для решения задачи экономии потребляемой электроэнергии выбрано направление, позволяющее использовать возможности реактивной мощности, вырабатываемой синхронными двигателями для работы асинхронных двигателей. Выявлены особенности использования компенсирующей способности реактивной мощности в процессе измельчения топологических схем, применяемых в данном производстве. Приведены алгоритмы, позволяющие получить зависимости, характеризующие изменения реактивной мощности, вырабатываемой синхронными и потребляемыми асинхронными двигателями, от нагрузки и напряжения питающей сети. Исследовано также изменение реактивной мощности при разных значениях коэффициента мощности. На примерах одно- и двухстадийной топологических схем процесса измельчения руды оценены возможности компенсирующей способности синхронных двигателей. Произведен расчет, позволяющий рассматривать возможности использования компенсирующей способности синхронных двигателей при разных топологических схемах измельчения минерального сырья с применением двигателей разных мощностей.

Выявлено, что при разных значениях коэффициента нагрузки коэффициент мощности на шине питающей сети не претерпевает значительных изменений, и, кроме того вырабатываемые синхронными двигателями реактивные мощности полностью компенсируют необходимую для потребления реактивную мощность, вырабатываемую асинхронными двигателями, используемыми в технологической схеме измельчения руды.

Ключевые слова: экономия, расход электроэнергии, компенсирующая способность, двигатель, нагрузка, коэффициент мощности.

Введение. Рациональное электропотребление является одним из факторов, способствующим устойчивому развитию экономики во всех отраслях промышленности. Одной из наиболее энергоемких сфер промышленности является горно-обогатительное производство, в частности, производство металлических концентратов. Повышение эффективности производства металлических концентратов в основном зависит от экономии расхода электроэнергии, используемой в

процессе измельчения руды. В основе такого утверждения лежат обоснования, сделанные со стороны авторов разных научных работ [1-3], из которых следует, что наибольшая доля расхода электроэнергии приходится на процесс измельчения. В частности, до 42% всей электроэнергии потребляется асинхронными и синхронными электроприводами, используемыми в процессе измельчения.

Анализ известных работ, направленных на экономию расхода электроэнергии, применяемой в технологическом процессе измельчения руды, позволил проинвестировать классификацию следующих способов:

- оптимальное управление технологическими процессами;
- снижение потерь электроэнергии в системах энергоснабжения;
- организационные мероприятия;
- нормирование расхода электроэнергии;
- уменьшение перетоков реактивной энергии за счет компенсации реактивной мощности.

Получение требуемого класса измельчения достигается последовательной переработкой минерального сырья на стадиях измельчения и классификации. В процессе измельчения минерального сырья используются разнотипные синхронные и асинхронные приводные двигатели, обеспечивающие работу мельниц, классификаторов и насосов для перекачки сырья. Следует также отметить, что число и мощность используемых приводных двигателей зависят от технологической схемы, используемой в данном производстве.

Учитывая, что потери электроэнергии в процессе измельчения руды в значительной степени связаны с потреблением реактивной мощности, вырабатываемой синхронными двигателями, в данной статье рассматриваются возможности уменьшения перетоков реактивной энергии за счет компенсации реактивной мощности.

Цель работы и постановка задачи. Целью настоящей работы является исследование и выявление возможностей использования реактивной мощности, вырабатываемой синхронными двигателями для работы асинхронных двигателей, направленной на экономию потребляемой электроэнергии.

Для решения поставленной задачи возникает необходимость оценки изменения реактивных мощностей, потребляемых и создаваемых соответственно асинхронными и синхронными двигателями, используемыми в данной топологической схеме процесса измельчения.

Результаты исследования. В зависимости от особенностей процесса измельчения минерального сырья, используемого в технологическом процессе, приводные асинхронные и синхронные двигатели в данный момент имеют различные величины коэффициента мощности и коэффициента полезного действия (КПД),

которые зависят от величины нагрузки всех двигателей и токов возбуждения синхронных двигателей. Исходя из вышесказанного, приводятся зависимости, характеризующие изменения реактивной мощности от нагрузки и напряжения питающей сети. На рис. 1-3 приведены зависимости двух типов асинхронных двигателей, имеющих соответственно мощности 15; 10 кВт.

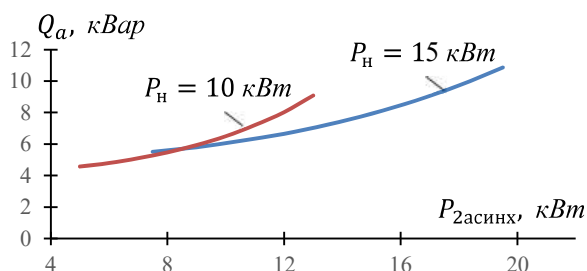


Рис. 1. Зависимость потребляемой реактивной мощности асинхронного двигателя от нагрузки: $P_n = 10 \text{ кВт}$, $P_n = 15 \text{ кВт}$

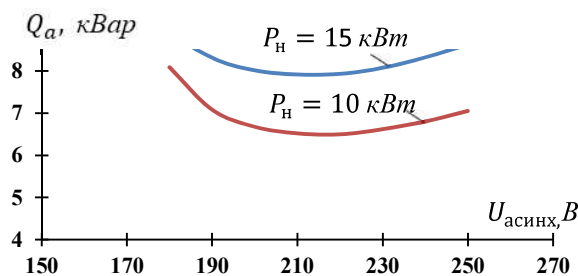


Рис. 2. Зависимость потребляемой реактивной мощности асинхронного двигателя от напряжения питающей сети: $P_n = 10 \text{ кВт}$, $P_n = 15 \text{ кВт}$

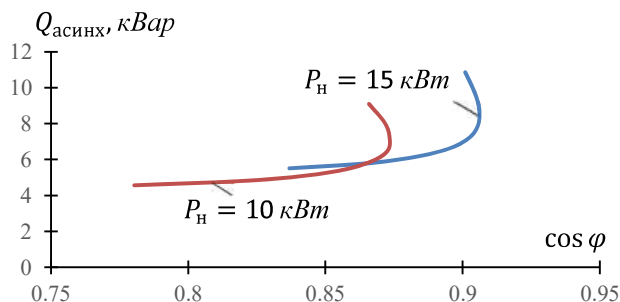


Рис. 3. Зависимость потребляемой реактивной мощности асинхронного двигателя от коэффициента мощности: $P_n = 10 \text{ кВт}$, $P_n = 15 \text{ кВт}$

Указанные зависимости построены благодаря нижеприведенному алгоритму.

1. Определяются полные механические потери асинхронного двигателя:

$$P_{AMX} = P_A + P_{Amex} + P_{Adop}.$$

Здесь использованы следующие обозначения:

P_{Amex} - механические потери асинхронного двигателя, определяемые в виде

$$P_{Amex} = k_T (I_0 D_a)^3,$$

где k_T - расчетные значения коэффициента согласно табл.1; D_a - наружный диаметр статора.

Таблица 1

Расчетное значение коэффициента k_T

$2p$	2	4	6	8	10	12
n_1	3000	1500	1000	750	600	500
k_T	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Добавочные потери асинхронного двигателя P_{Adop} определяются в виде

$$P_{Adop} = P_{AN} k_{dop}.$$

Здесь k_{dop} - коэффициент добавочных потерь, который обычно принимают 0,5% от мощности; P_{AN} - номинальная потребляемая мощность; P_{A2} - полезная мощность на валу двигателя, равная

$$P_{A2} = P_{AN} k_N,$$

где k_N учитывает вес загруженного сырья.

2. Определяются электромагнитный момент и, соответственно, скольжение при данной нагрузке.

Согласно энергетической диаграмме и Т-образной схеме замещения асинхронного двигателя (рис. 4), можно составить систему уравнений электромагнитного момента асинхронного двигателя M_{AEMi} :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{AEM} = \frac{pm_1 U_c^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_c \left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(x_{li} + c_1 x_2' \right)^2} \\ M_{AEM} = \frac{P_{AMX}}{2\pi(1-s)n_c} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где n_c - синхронная скорость двигателя; r_2' , x_2' - приведенные активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора асинхронного двигателя; $c_1 = 1 - \frac{x_l}{x_m}$ - коэффициент приведения Т - образной схемы замещения к Г - образной схеме замещения асинхронного двигателя.

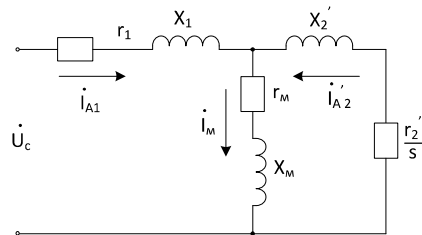


Рис. 4. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Решением системы уравнений (1) определяются M_{AEM} и s_N , что позволяет вычислить токи статора I_{A1} , ротора I_{A2} и потери в этих обмотках, используя схему замещения асинхронного двигателя.

3. Определяется реактивная мощность асинхронного двигателя при данной нагрузке:

$$Q_{Ai} = m_1 U_c I_{Ai} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{Ai}} ,$$

где $\cos \varphi_A = \frac{P_{Ao}}{m_1 U_c I_{A1}}$; m_1 - число фаз; P_{Ao} - мощность на зажимах статора асинхронного двигателя; $\cos \varphi_A$ - коэффициент мощности при данной нагрузке.

На рис. 5-7 приведены зависимости двух синхронных двигателей, имеющих соответственно мощности 380 и 800 кВт, от нагрузки, напряжения питающей сети и коэффициента мощности.

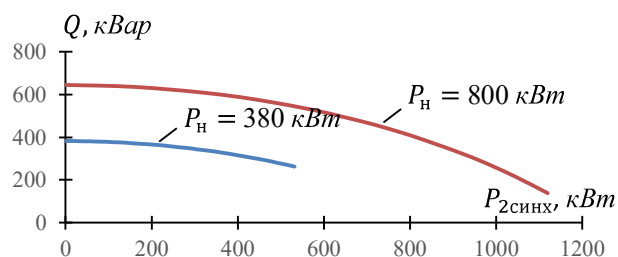


Рис. 5. Зависимость вырабатываемой реактивной мощности синхронного двигателя от нагрузки: $P_n = 380 \text{ кВт}$, $P_n = 800 \text{ кВт}$

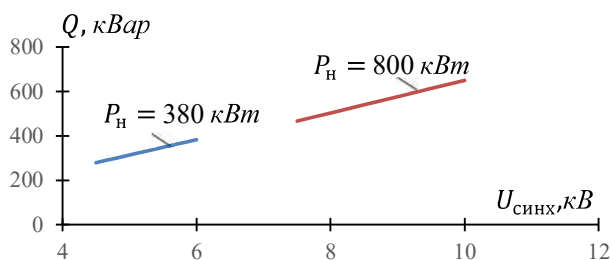


Рис. 6. Зависимость вырабатываемой реактивной мощности синхронного двигателя от напряжения питающей сети: $P_n = 380 \text{ кВт}$, $P_n = 800 \text{ кВт}$

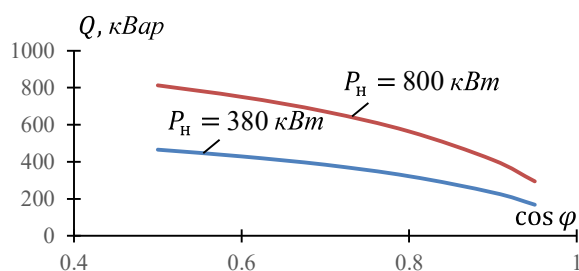


Рис. 7. Зависимость потребляемой реактивной мощности асинхронного двигателя от коэффициента мощности: $P_n = 380 \text{ кВт}$, $P_n = 800 \text{ кВт}$

Указанные на рис. 5-7 зависимости построены благодаря нижеприведенному алгоритму:

1. Определяются постоянные потери (потери в яме и в зубцах статора, поверхностные, механические и вентиляционные потери).
2. Определяются электрические потери в обмотке статора, добавочные потери и потери на возбуждение.
3. Определяются электромагнитная мощность, $\cos \varphi_c$ и ток статора.
4. Определяются реактивная мощность, вырабатываемая синхронным двигателем.

В качестве примера были исследованы две топологические схемы, приведенные на рис. 8 и 9. В табл. 2 и 3 приведены расчетные данные при разных нагрузках приводного двигателя. Как видно из таблиц, при разных значениях коэффициента нагрузки коэффициент мощности на шине питающей сети ($\sum \cos \varphi$) не претерпевает значительных изменений. В случае применения одностадийной схемы измельчения, имеющей топологию, приведенную на рис. 8, реактивную мощность, необходимую для потребления асинхронными двигателями, можно полностью компенсировать реактивной мощностью, вырабатываемой приводным двигателем мельницы, и, кроме того, около 82% реактивной мощности можно использовать для других внутрицеховых источников, в частности, для асинхронного приводного двигателя дробилки. В случае применения двухстадийной схемы (рис. 9) также вырабатывается достаточная реактивная мощность, которую можно использовать для других источников.

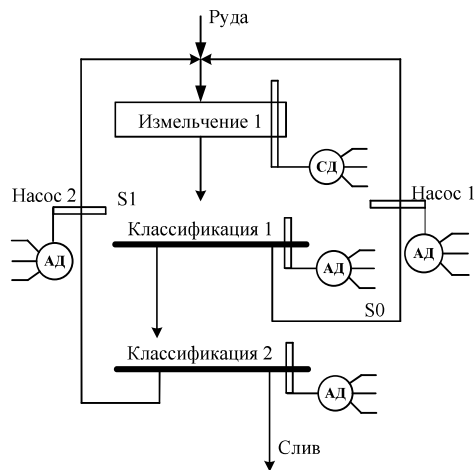


Рис. 8. Топология одностадийной схемы процесса измельчения

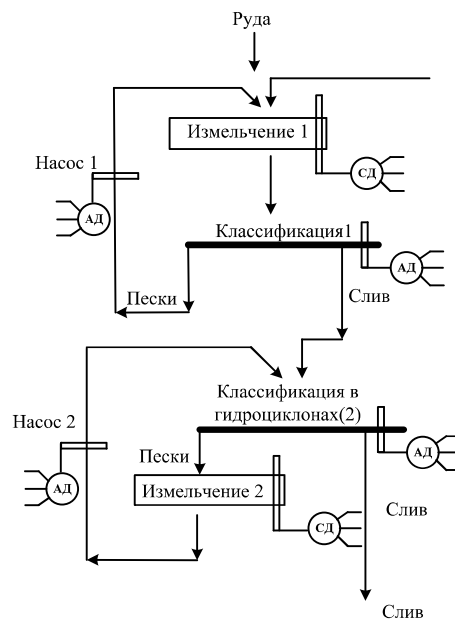


Рис. 9. Топология двухстадийной схемы процесса измельчения

Таблица 2

Расчетные данные одностадийной схемы измельчения

Двигатели	Номинальная активная мощность, P_H , кВт, при $k_N = 1$	Номинальная реактивная мощность, Q , Вар, при $k_N = 1$	Коэффициент мощности на шине, $\sum \cos \varphi$			$\cos \varphi$	КПД
			$k_N=0,7$	$k_N=1,0$	$N=1,3$		
Насос 1	10	6495,5	0,858	0,886	0,892	0,873	0,861
Насос 2	13	6741,7				0,907	0,896
Классификатор 1	15	7928,6				0,905	0,886
Классификатор 2	75	37253,91				0,912	0,905
Мельница	380	322398,19				0,8	0,884

Таблица 3

Расчетные данные двухстадийной схемы измельчения

Двигатели	Номинальная активная мощность, P_n , кВт, при $k_N=1,0$	Номинальная реактивная мощность, Q , Вар, при $k_N=1,0$	Коэффициент мощности на шине, $\sum \cos \varphi$			$\cos \varphi$	КПД
			$k_N=0,7$	$k_N=1,0$	$k_N=1,3$		
Насос 1	10	6495,5	0,941	0,931	0,940	0,873	0,861
Насос 2	15	7928,6				0,905	0,886
Классификатор 1	13	6741,7				0,907	0,896
Классификатор 2	75	37253,91				0,912	0,905
Мельница	800	409142,2				0,9	0,947
Мельница 2	380	322398,19				0,8	0,884

Заключение. Полученные результаты показывают, что без дополнительных расходов можно обеспечить необходимую реактивную мощность, используемую асинхронными двигателями в процессе измельчения руды, тем самым обеспечивая экономию расхода электроэнергии.

Литература

1. **Зайцев А.И., Плехов А.С.** Минимизация потерь электроэнергии в промышленном и сельскохозяйственном производстве // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2008. - № 2. - С 4- 8.
2. **Титов В.Г., Охотников М.Н., Плехов А.С.** Оптимизация электропотребления посредством управления возбуждением группы синхронных двигателей // Труды 5-й Межд. (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, 8-21 сентября 2007г. - СПб., 2007. - С. 502-504.
3. **Токочакова, Н.В., Мороз Д.Р.** Анализ показателей энергетической эффективности промышленных потребителей // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2006. - № 3. -С. 66-76.
4. **Baghdasaryan M., Mailyan A., Davtyan D.** Using the Possibility of the Synchronous Motor Compensation in the Production Processes with Synchronous and Induction Motors // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. - 2017. -№ 9-10. - P. 80-84.

Поступила в редакцию 10.09.2018.
Принята к опубликованию 14.12.2018.

**ՍԻՆԽՐՈՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՆՈՂ ՀԱՏԿՈՒԹՅԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ
ՀԱՆՔԱՔԱՐԻ ՄԱՆՐԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾՆԵԹԱՑՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐՈՒԵՆԵՐԳԻԱՅԻ ԾԱԽՍԻ
ՏՆՏԵՍՈՒՄԸ**

Դ.Վ. Դավթյան

Հիմնավորված է հանքաքարի մանրացման գործընթացում սպառվող էլեկտրաէներգիայի տնտեսման անհրաժեշտությունը մետաղական խտանյութերի արտադրման արդյունավետության բարձրացման համար: Էլեկտրաէներգիայի ծախսերի տնտեսման հայտնի աշխատանքների վերլուծությունից հետո կատարվել է տեխնոլոգիական պրոցեսում կիրառվող հիմնական եղանակների տեսակավորումը: Սպառվող էլեկտրաէներգիայի տնտեսման խնդրի լուծման համար ընտրվել է ուղղություն, որը թույլ է տալիս օգտագործել սինխրոն շարժիչի կողմից արտադրվող ռեակտիվ հզորության հնարավորությունները ասինխրոն շարժիչի աշխատանքի համար: Բացահայտվել են մանրացման գործընթացում ռեակտիվ հզորության կոմպենսացման ունակության կիրառման առանձնահատկությունները սովյալ արտադրությունում օգտագործվող տոպոլոգիական սխեմաներում: Բերված են ալգորիթմներ, որոնք թույլ են տալիս ստանալ արտադրվող սինխրոն և սպառող ասինխրոն շարժիչների ռեակտիվ հզորության փոփոխությունները բնութագրող կախվածություններ՝ բեռնվածքից և ցանցի սնող լարումից կախված: Հետազոտվել են նաև ռեակտիվ հզորության փոփոխությունները հզորության գործակցի տարբեր արժեքների դեպքում: Հանքաքարի մանրացման պրոցեսի միափուլ և երկփուլ տոպոլոգիական սխեմաների օրինակներով գնահատված են սինխրոն շարժիչների կոմպենսացման հնարավորությունները: Կատարված է հաշվարկ, որը թույլ է տալիս դիտարկել սինխրոն շարժիչների կոմպենսացման հնարավորությունները հանքային հումքի մանրացման տարբեր տոպոլոգիական սխեմաների ժամանակ տարբեր հզորությունների շարժիչների կիրառման դեպքում:

Բացահայտվել է, որ բեռնվածքի գործակցի տարբեր արժեքների դեպքում հզորության գործակիցը սնող ցանցի հաղորդաձողի վրա շատ փոփոխությունների չի ենթարկվում, և դրանից բացի, սինխրոն շարժիչի կողմից արտադրված ռեակտիվ հզորությունը ամբողջությամբ կոմպենսացնում է սպառման համար անհրաժեշտ ռեակտիվ հզորությունը, որն արտադրվում է հանքաքարի մանրացման տոպոլոգիական սխեմայում օգտագործվող ասինխրոն շարժիչների կողմից:

Առանցքային բաներ. տնտեսում, էլեկտրաէներգիայի սպառում, կոմպենսացման հնարավորություն, շարժիչ, բեռնվածք, հզորության գործակից:

**ECONOMY OF POWER CONSUMPTION IN THE PROCESS OF ORE GRINDING
BY USING THE COMPENSATING ABILITY OF SYNCHRONOUS MOTORS**

D.V. Davtyan

The necessity of saving energy consumption used in the process of ore grinding to improve the efficiency of production of metal concentrates is substantiated. By analyzing the known

works, the main methods for saving energy used in the process have been classified. To solve the problem of saving the consumed energy, a direction has been chosen that allows to use the possibilities of the reactive power generated by synchronous motors for the operation of induction motors. The peculiarities of using the compensating ability of the reactive power in the grinding process of topological schemes used in this production are revealed. Algorithms are given that allow to obtain dependencies, characterizing the changes in the reactive power generated by synchronous and consumed by induction motors on the load and voltage of the supply network. The change in the reactive power at different values of the power factor has also been investigated. Using the examples of one- and two-stage topological diagrams of the ore grinding process, the possibilities of the compensating ability of synchronous motors are estimated. A calculation is made, allowing to consider the possibility of using the compensating capabilities of synchronous motors for different topological schemes of grinding mineral raw materials, using motors of different powers.

It is revealed found that at different values of the load factor, the power factor on the mains bus does not undergo significant changes, and, besides, the reactive power generated by synchronous motors completely compensates for the reactive power required for consumption produced by induction motors used in the ore grinding process.

Keywords: saving, power consumption, compensating ability, motor, load, power factor.