

ла α (зона загрузки материала) в напрямленні разгрузочной щели амплітуда коливаний корпусу збільшується, а коливаний щекі – монотонно зменшується. Однак, для процесу дроблення матеріала важна амплітуда коливаний щекі відносно корпусу дробилки ($\Delta a_{\text{щ}}$), що дозволяє змінювати швидкість транспортування матеріала і величину його силового навантаження.

Найбільше вплив на динаміку дробилки викликає зміщення центра мас корпусу вздовж продольної осі симетрії, маса і момент інерції приймаються, виходячи з силових параметрів, і перевіряються по динамічним параметрам.

Список литературы

1. Вайсберг Л.А. Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения / Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 306с.
2. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. – М.: Наука, 1981, – 320 с.
3. Франчук В.П. Влияние параметров корпуса на динамику вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления / Франчук В.П., Плахот-

ник В.В., Федоскина Е.В. // Вибрації в техніці та технологіях. – 2008. – № 2 (51). – с. 46–48

Представлено розрахункову схему дробарки з похилою камерою дроблення. Розглянуто вплив на рух елементів дробарки величини маси і моменту інерції щокі, положення її центру мас і віброзбудника. Розглянуто вплив на кут повороту рухомої щокі і корпусу дробарки розташування її центру мас. Надано рекомендації з раціонального вибору розглянутих параметрів.

Ключові слова: *вібраційна щекова дробарка, амплітуда коливань, центр мас, кут установки*

The calculation chart of crusher is presented with the sloping chamber of crushing. Influence on motion of elements of crushing, size, mass and moment of inertia of the cheek, position of its centre of mass and vibroexciter, is considered. Influence on rotation angle of mobile cheek and frame of crusher and location of its centre of mass is considered. Recommendations on the rational choice of the considered parameters are given.

Keywords: *vibration cheek crusher, vibrations amplitude, center of mass, angle of setting*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.П. Франчуком. Дата надходження рукопису 16.03.11

УДК 62-83:621.313.323

**О.С. Бешта, д-р техн. наук, проф.,
С.Г. Фурса, А.І. Прохоров**

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: beshtaA@nmu.org.ua

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ ПУЛЬСАЦІЙ МОМЕНТУ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ НА БАЗІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ВБУДОВАНИМИ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

**O.S. Beshta, Dr. Sc. (Tech.), Professor,
S.G. Fursa, A.I. Prokhorov**

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: beshtaA@nmu.org.ua

TORQUE RIPPLE COMPENSATION SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE IN INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Розглянуто проблему виникнення пульсації моменту в електроприводі на базі синхронного двигуна з вбудованими постійними магнітами (ІРМСМ). Досліджено ефективність використання стандартних законів компенсації при застосуванні закону енергозбереження „Максимальний момент на ампер“ (ММРА). За результатами моделювання встановлено, що одночасне застосування обох законів призводить до збільшення пульсації реактивного моменту. Для усунення даного ефекту запропоновано модифікований закон компенсації пульсації моменту.

Ключові слова: *електропривід, синхронний двигун із вбудованими постійними магнітами, пульсації моменту*

Вступ. Впровадження частотно-регульованого електропривода змінного струму вже давно є головним технічним рішенням як у промисловості, так і в побутовому господарстві. Переважно він реалізовується на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Альтернативою таким системам виступає електропривід на базі синхронних двигунів з по-

стійними магнітами (СДПМ). Кількість даних систем інтенсивно збільшується і складає сьогодні за різними даними до 30-40% від загального числа регульованого електропривода змінного струму, що виробляється щорічно [1, 2]. Це обумовлено тим, що СДПМ мають просту і надійну конструкцію, високу питому потужність, енергетичні та динамічні показники, а також не потребують постійного обслуговування.

Одним із недоліків СДПМ є наявність пульсацій електромагнітного моменту. Дані пульсації негативно позначаються на точності керування, динаміці електропривода та спричиняють додаткові втрати. У динамічних режимах вони викликають додаткові акустичні шуми, вібрації та резонансні явища. Тому в сучасних електроприводах накладається обмеження на величину пульсацій електромагнітного моменту, яка повинна складати 1-2% від номінального моменту.

Аналіз попередніх досліджень. Існуючі пульсації електромагнітного моменту в найбільшій мірі обумовлені наявністю періодичних складових основного електромагнітного моменту та зубцевого реактивного моменту. Перші спричинені взаємодією вищих гармонік поля ротора з вищими гармоніками струму статора. Другий виникає через взаємодію постійних магнітів із зубцями статора.

Для зменшення даних пульсацій моменту існує багато технічних рішень, які можливо розділити на дві великі групи. Першу групу складають заходи, які ґрунтуються на цілеспрямованому вдосконаленні конструкції СДПМ [3]. Найбільш дієвими серед них є скіс постійних магнітів на ширину зубця статора α_z в аксіальному напрямі або виконання спеціальної форми зовнішнього контуру ротора для IPMSM. Незважаючи на високу ефективність конструктивних змін, вони ускладнюють конструкцію електричної машини та зменшують номінальний момент. Все це призводить до збільшення вартості електропривода. Альтернативним рішенням є використання спеціальних законів керування СДПМ. Такі системи не забезпечують повної компенсації коливань моменту, але вони є більш дешевими в реалізації.

Найбільшого розповсюдження отримали системи керування з живленням СДПМ попередньо запрограмованим полігармонічним струмом статора [4-7]. Таким чином створюються додаткові періодичні складові електромагнітного моменту, які знаходяться в протифазі до існуючих. Необхідна форма струму є функцією положення ротора і може бути отримана різними способами. У більшості випадків для цього використовують аналіз Фур'є ЕРС, яка пропорційна потокозчепленню поля ротора з обмоткою статора.

У [4] представлена система керування електропривода, побудована на теоретичному розрахунку пульсацій моменту. Недоліком даної системи є прийняті спрощення, які не дозволяють врахувати всі особливості електромагнітних процесів. Значно кращих результатів можливо досягти при визначенні коливань моменту та ЕРС за допомогою спеціалізованих пакетів САПр для розрахунку електричних машин методом кінцевих елементів (FEM) або експериментальних досліджень на вимірювальному стенді. Недоліком розглянутих систем є висока чутливість до зміни параметрів електропривода під час експлуатації. Окрім цього, при серійному виробництві, через виробничі допуски, параметри окремих електричних машин відрізняються. Тому стандартне налаштування системи керування не забезпечує оптимальну компенсацію коливань моменту.

Для вирішення даної проблеми [5] запропонована система керування СДПМ з функцією визначення параметрів при ініціалізації електропривода (self-commissioning). Для підвищення швидкодії регуляторів струму використовуються спеціальні регулятори deadbeat controller, які використовують додатковий зворотній зв'язок для максимально швидкого відпрацювання помилки на вході. У [6] запропонована адаптивна система керування для визначення гармонічного складу ЕРС у реальному часі. Недоліком розглянутих систем є висока чутливість до точності визначення параметрів моделі СДПМ. Похибки при ідентифікації призводять до того, що запрограмована форма взагалі може збільшити пульсації моменту. Для вирішення даної проблеми були розроблені складні системи компенсації зі зворотнім зв'язком. Вони реалізуються як за допомогою регулятора струму/моменту, так і регулятора швидкості.

У [7] запропоновано всі складові моменту, які створюють пульсації, об'єднати в єдиний вектор збурень. Для його оцінки та компенсації використовують декілька варіантів спостерегачів. Усі запропоновані варіанти суттєво зменшують пульсації моменту та підвищують точність визначення швидкості. Але найкращі показники забезпечує система з використанням датчика прискорення. Головним недоліком такої системи є використання додаткового датчика, що підвищує собівартість електропривода.

Усі розглянуті системи керування були розроблені для СДПМ з поверхневими магнітами. При цьому в першоджерелах немає жодної інформації про їх ефективність для IPMSM. Даний тип двигунів характеризується наявністю додаткового реактивного моменту, який обумовлений нерівномірністю магнітного опору по повздовжній та поперечній осях. Окрім цього, ці двигуни є більш дешевими та технологічними у виробництві, а також мають ряд додаткових переваг [8].

Мета роботи. Розробка закону компенсації пульсацій моменту для електропривода на базі СДПМ із вбудованими магнітами.

Матеріал та результати досліджень. Як відомо, аналітичний опис зубцевого реактивного моменту є досить складним завданням [6]. Мінімізація реактивного моменту, як правило, виконується за допомогою конструктивних змін СДПМ. Тому в даній роботі будуть розглянуті лише пульсації, які обумовлені наявністю періодичних складових основного моменту. При цьому відомо [5], що коливання моменту низької частоти автоматично компенсуються стандартною системою регулювання швидкості, а коливання високої частоти мають дуже низьку амплітуду та демпфуються інерційністю ротора. Таким чином, необхідно звернути увагу на пульсації моменту з частотою 0,1-2 кГц.

У такому випадку загальна математична модель IPMSM описується наступними рівняннями в обертовій системі координат d, q

$$u_d = R_1 \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_e \cdot (L_q \cdot i_q + \Psi_d(\theta));$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_e \cdot (L_d \cdot i_d + \Psi_q(\theta));$$

$$M = M_{осн} + M_p;$$

$$M_{осн} = 1,5 \cdot p \cdot (i_q \cdot \Psi_q(\theta) + i_d \cdot \Psi_d(\theta)); \quad (1)$$

$$M_p = 1,5 \cdot p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q; \quad (2)$$

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

де u_d, u_q, i_d, i_q – проєкції векторів напруги та струму статора на осі d, q ; $\Psi_d(\theta), \Psi_q(\theta)$ – проєкції вектору потокозчеплення поля ротору з урахуванням вищих гармонік; R_1 – опір обмотки статора; L_d, L_q – індуктивності обмотки статора по повздо-вжній та поперечній осях; ω_e – електрична кутова швидкість ротора; p – число пар полюсів; θ – електричний кут положення ротора; M – електромагнітний момент; M_c – статичний момент навантаження; J – приведений момент інерції СДПМ та механізму.

Для спрощення моделювання система компенсації пульсацій моменту реалізовувалась без гармонічного аналізу ЕРС у реальному часі. Для моделювання використовувались параметри експериментального зразка IPMSM компанії BAUER GmbH (Німеччина), створеного на базі класичного асинхронного двигуна [8]. Також для даного двигуна достатньо обмежитись розглядом перших чотирьох гармонік, оскільки більш високі гармоніки чинять незначний вплив на загальні пульсації моменту. У такому випадку для проєкцій потокозчеплення поля ротора справедливо

$$\Psi_d = \Psi_{d6} \cdot \sin 6 \cdot \theta + \Psi_{d12} \cdot \sin 12 \cdot \theta; \quad (3)$$

$$\Psi_q = \Psi_{q1} + \Psi_{q6} \cdot \cos 6 \cdot \theta + \Psi_{q12} \cdot \cos 12 \cdot \theta. \quad (4)$$

Відповідні параметри IPMSM наведені в таблиці.

Загальновідомо, що використання стандартного закону керування з підтриманням складової струму статора $i_d = 0$ для IPMSM не забезпечує оптимального режиму роботи [9]. Більш ефективним є формування складової $i_d < 0$, що дозволяє використати реактивний момент IPMSM. Завдяки цьому можливо досягти вищих показників питомої потужності та суттєво підвищити загальний ККД електропривода.

Вибір необхідного закону керування залежить від діапазону регулювання швидкості та відповідних обмежень у частотно-регульованому електроприводі. Для сучасних електроприводів на базі СДПМ розрізняють три робочі зони регулювання швидкості. У нашому випадку обмежимося розглядом лише першої зони. Для неї характерне виконання лише обмеження максимального струму

$$I_1 = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max}$$

тому, що напруга не досягає максимальних значень через відносно низькі частоти обертання. У такому випадку найбільш доцільно використовувати закон керування ММРА [9]

$$i_d = -\frac{\Psi_{q1}}{2 \cdot (L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\Psi_{q1}}{4 \cdot (L_d - L_q)} + i_q^2}. \quad (5)$$

Таблиця

Параметри експериментального зразка IPMSM

Параметри		Значення
Активний опір фази статора, R_1 , Ом		1,42
Індуктивності обмотки статора по повздо-вжній осі, L_d , Гн		0,025
Індуктивності обмотки статора по попере-чній осі, L_q , Гн		0,060
Число пар полюсів		3
Складові потокозчеплення поля ротора	Ψ_{q1} , Вб	0,73
	Ψ_{d6} , Вб	0,0179
	Ψ_{q6} , Вб	0,0055
	Ψ_{d12} , Вб	0,0449
	Ψ_{q12} , Вб	0,16

На рис. 1 представлені моментні характеристики IPMSM з використання стандартного закону керування $I_d = 0$ та запропонованого закону ММРА. Як видно, використання закону ММРА дозволяє розвинути необхідний момент при меншому струмі статора. Завдяки цьому суттєво знижуються втрати в міді, які в даному режимі роботи становлять більшу частину загальних втрат. Окрім цього знижуються втрати в ключах перетворювача частоти, а також втрати в сталі через дію негативної складової струму статора, що розмагнічує.

Для компенсації існуючих коливань необхідно забезпечити певний гармонічний склад струму статора. При цьому його вищі гармонічні складові повинні бути в протифазі до існуючих гармонічних складових потокозчеплення

$$i_q = i_{q1} + \underbrace{i_{q6} \cdot \cos(6\theta + \pi) + i_{q12} \cdot \cos(12\theta + \pi)}_{i_{qком}}. \quad (6)$$

У такому випадку вищі гармоніки струму створюють з першою гармонікою потокозчеплення складові моменту, які знаходяться в протифазі до складових, утворених основною гармонікою струму та вищими гармоніками потокозчеплення. Підставивши вираз (6) в (1) та з урахуванням (3-4), розрахуємо ос-

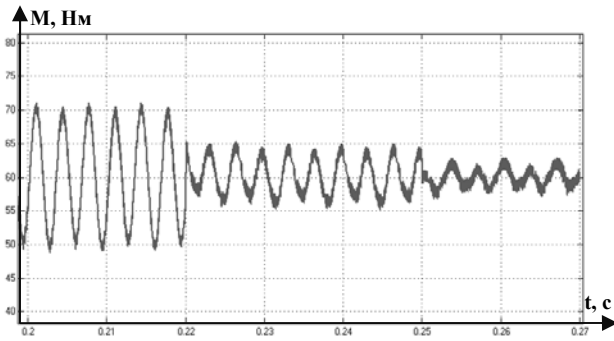


Рис. 3. Графік електромагнітного моменту IPMSM: M – електромагнітний момент; t – час

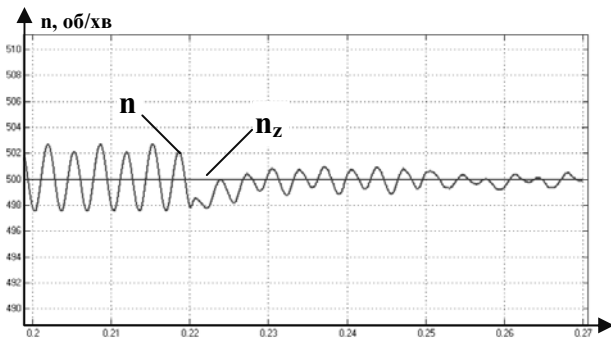


Рис. 4. Графік частоти обертання IPMSM: n – частота обертання; t – час

На рис. 3–4 представлені отримані діаграми електромагнітного моменту та частоти обертання IPMSM в усталеному режимі. До моменту часу $t_1 = 0,22$ с використовувався лише закон енергозбереження ММРА. При цьому коливання моменту становили близько 17,5%. У момент часу $t_1 = 0,22$ с додатково була ввімкнена система компенсації пульсацій моменту. Це дозволило досягти майже повної компенсації періодичних складових основного моменту (рис. 5). Але величина загальних коливань при цьому становить близько 7,5%, що є неприйнятним значенням. Це обумовлено тим, що одночасна робота законів ММРА та компенсації пульсацій моменту призводить до відчутного збільшення коливань реактивного моменту.

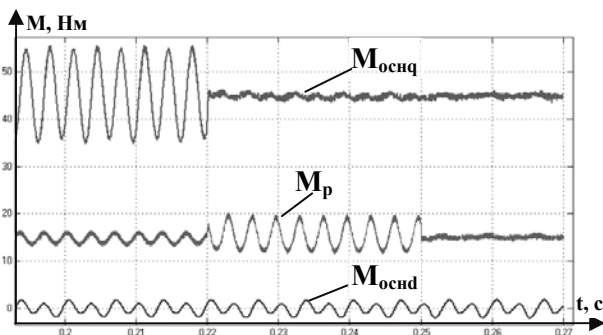


Рис. 5. Складові електромагнітного моменту IPMSM: M – електромагнітний момент; t – час

Для їх пригнічення необхідно забезпечити гармонічний склад струму i_d , який буде знаходитись у протифазі до струму i_q

$$i_d = i_{d1} + \underbrace{i_{d6} \cdot \cos 6\theta + i_{d12} \cdot \cos 12\theta}_{i_{dkom}}. \quad (9)$$

Підставивши вирази (6) та (9) у рівняння (2), а також враховуючи, що $\cos(\theta + \pi) = -\cos\theta$, отримаємо

$$\begin{aligned} M_p = & 1,5 \cdot p \cdot (i_{q1} \cdot i_{d1} + i_{q1} \cdot i_{d6} \cdot \cos 6 \cdot \theta + \\ & + i_{q1} \cdot i_{d12} \cdot \cos 12 \cdot \theta - i_{q6} \cdot i_{d1} \cdot \cos 6 \cdot \theta - \\ & - 0,5 \cdot i_{q6} \cdot i_{d6} \cdot \cos 12\theta - i_{q6} \cdot i_{d12} \cdot \cos 6\theta \cdot \cos 12\theta - \\ & - i_{q12} \cdot i_{d1} \cdot \cos 12 \cdot \theta - i_{q12} \cdot i_{d6} \cdot \cos 6 \cdot \theta \cdot \cos 12 \cdot \theta - \\ & - 0,5 \cdot i_{q12} \cdot i_{d12} \cdot \cos 24 \cdot \theta). \end{aligned}$$

За аналогією до стандартної системи компенсації визначимо амплітуди відповідних гармонічних складових струму i_d

$$i_{d6} = i_{d1} \cdot \frac{i_{q6}}{i_{q1}}.$$

Запропонований закон компенсації був реалізований в системі керування IPMSM, що розглядається. Його робота відображена на рис. 3–5 після включення в момент часу $t_1 = 0,25$ с. Як видно з рис. 5, вдалося досягти майже повної компенсації коливань реактивного моменту. При цьому рівень загальних пульсацій знизився майже в 2 рази до 3,8%.

Висновки:

1. Закон енергозбереження ММРА для електроприводів на базі IPMSM дозволяє суттєво підвищити загальний ККД електропривода за рахунок використання реактивного моменту.

2. Одночасне застосування законів енергозбереження ММРА та компенсації пульсацій моменту не забезпечує необхідних показників коливань загального моменту. Це обумовлено збільшенням коливань реактивного моменту.

3. Для усунення даного ефекту необхідно використовувати закон компенсації пульсацій моменту, який передбачає введення сигналів корегування у функції положення ротора по обох каналах керування складовими струму статора i_d, i_q . При цьому амплітуди гармонічних складових струму i_d, i_q визначаються відповідними значеннями гармонік ЕРС.

4. Напрямок подальших досліджень є розробка алгоритмів ідентифікації ЕРС у режимі реального часу, що дозволить урахувати зміну параметрів IPMSM під час експлуатації.

Список літератури

1. Колпаков А.И. Перспективы развития электропривода / Колпаков А.И. // Силовая электроника. – 2004. – №1. – С. 46-48.

2. Hocheffizienter Synchronmotor, kompakt und günstig / Nolle E., Fursa S., Neuberger N., Beshta A. // Spektrum. – 2010. – №31. – P. 33–37.
3. Zhu Z.Q. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines / Zhu Z.Q., Howe D. // IEEE Transaction on energy conversion, vol. 15, 2000. – P. 407–412.
4. Grotstollen H. Die Unterdrückung der Oberwellendrehmoment von Synchronmotoren durch Speisung mit überschwingungsbehaftetem Strom / Grotstollen H. // Archiv für Elektrotechnik. – 1984.– №67. – P. 17–27.
5. Holtz J. Identification and compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives / J. Holtz, L. Springob // IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, April 1996., pp. 309–320.
6. Design and Implementation of an Adaptive Controller for Torque Ripple Minimization in PM Synchronous Motors / V. Petrovic, R. Ortega, A.M. Stanovic, G. Tadmor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 15, No. 5, 2000. – pp. 871-880.
7. Wertz H. Rundlaufoptimale Regelung von elektrischen Antrieben / Wertz H., Pottharst A. // SPS/IPC/DRIVES 2000, Nov. 2000, Nürnberg, Germany, P. 831–840.
8. Бешта О.С. Обґрунтування доцільності використання СДПМ з вбудованими магнітами / Бешта О.С., Балахонцев О.В., Фурса С.Г. // Вісник КДПУ: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 4/2010(63). – Ч.2 – Кременчук: КДПУ, 2010. – С. 73–75.
9. Schröder D. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Schröder D. – Springer Verlag, 3 Auflage, 2009.

Рассмотрена проблема возникновения пульсаций момента в электроприводе на базе синхронного двигателя со встроенными постоянными магнитами (IPMSM). Исследована эффективность применения стандартных законов компенсации при использовании закона энергосбережения „Максимальный момент на ампер“ (ММРА). По результатам моделирования установлено, что одновременное применение обоих законов приводит к увеличению пульсаций реактивного момента. Для устранения данного эффекта предложен модифицированный закон компенсации пульсаций момента.

Ключевые слова: электропривод, синхронный двигатель со встроенными постоянными магнитами, пульсации момента

The problem of torque ripple occurrence in electric drive for interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) is considered. Usage efficiency of standard compensation principles with energy-saving principle “maximal torque per ampere” (ММРА) utilization is analyzed. Reactionary torque ripple gain under circumstances of using of both principles is proved by the modeling results. To eliminate reactionary torque ripple gain effect a modified compensation principle is proposed.

Keywords: electric drive, interior permanent magnet synchronous motor, torque ripple

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Ф.П. Шкрабцем. Дата надходження рукопису 21.03.11

УДК 658.562.64:621.311.22:622.33

Е.П. Пилова, канд. экон. наук

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепрпетровск, Украина

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА КАМЕННЫХ УГЛЕЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Ye.P. Pilova, Cand. Sc. (Econ.)

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine

COAL QUALITY INFLUENCE ON ECONOMIC PERFORMANCE OF POWER GENERATION AND RESOURCE-SAVING

Определена роль угля в производстве электрической энергии. Выделены основные факторы, определяющие качество угля. Рассмотрено взаимовлияние факторов, определяющих качество угля. Определено влияние топливной составляющей на себестоимость производства электроэнергии на тепловых электростанциях через стоимость полезной тепловой энергии. Оценено влияние качества каменных углей на экономические показатели производства электроэнергии и ресурсосбережение.

Ключевые слова: качество угля, производство электроэнергии, себестоимость электроэнергии, ресурсосбережение

Производство электрической энергии является одним из основных секторов потребления первичных энергоресурсов. Этот сектор является типичной (классической) конкурентной средой, где могут и на самом

деле используются разнообразные технологии производства электроэнергии, которые основываются на всем без исключения спектре природных энергоносителей.

Доля угля в производстве электроэнергии является очень высокой в странах, располагающих этим ресурсом. В последнее время наблюдается мировая