

*Ю.Т. Разумный, д-р техн. наук, А.В. Рухлов, канд. техн. наук, С.А. Крамаренко  
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОВРЕМЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК ШАХТ**

**Постановка задачи.** Шахтные подъемные машины относятся к установкам циклического действия, режим работы которых характеризуется рядом последовательно повторяющихся циклов. Каждый рабочий цикл представляет собой чередование неустановившегося (пуск, разгон, торможение) и установившегося (движение с постоянной скоростью) режимов работы.

Непосредственно количество циклов подъема в сутки зависит от многих факторов, основными из которых являются глубина обслуживаемого горизонта, грузоподъемность скипа и диаграмма скорости движения подъемного сосуда за цикл подъема (тахограмма), которая наиболее полно отражает кинематический режим подъемной системы. Вид реализуемой в каждом конкретном случае тахограммы зависит от ряда особенностей подъемной установки (ПУ) и, в первую очередь, от технологической схемы, типа сосуда, способа его разгрузки и системы электропривода подъемной машины.

**Цель работы** – определение условий энергоэффективного использования регулируемых систем электропривода скиповых подъемных установок шахт.

**Изложение основного материала.** Минимальным расходом электроэнергии будет характеризоваться режим работы ПУ, при котором тахограмма подъема по форме будет приближаться к прямоугольнику (иметь максимально возможные ускорение и замедление). Это достигается путем применения современных систем электропривода на базе тиристорных преобразователей, которые позволяют эффективно регулировать ускорение и замедление в неустановившихся периодах тахограммы подъема (с соблюдением их допустимых значений, приведенных в нормативных документах, таких как Правила безопасности, Правила технической эксплуатации и др.). Это и есть основным отличием таких систем от "традиционной" релейно-контакторной схемы с регулированием скорости подъема с помощью активных сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя (АД).

Основным достоинством системы регулируемого электропривода по сравнению с реостатным регулированием скорости подъема является экономия электроэнергии, величина которой может достигать 10–20%. Кроме того, такие системы имеют и ряд других "технологических" преимуществ. Это:

- повышение безопасности, надежности и бесперебойности работы ПУ, что обеспечит нормальную ритмичную работу всего предприятия;
- более точное и плавное регулирование частоты вращения электродвигателя, что позволяет отказаться от использования редукторов и другой дополнительной аппаратуры, а также значительно упрощает механическую (технологическую) схему, повышает ее надежность и снижает эксплуатационные расходы;
- регулируемый пуск управляемого двигателя, что обеспечивает плавный без повышенных пусковых токов и механических ударов разгон, снижает нагрузку на двигатель и, соответственно, увеличивает срок его эксплуатации;
- повышение производительности ПУ на 10–15% за счет "сжатия" и строгого соблюдения заданной тахограммы подъема, выдерживания пауз между циклами при загрузке-разгрузке скипов, автоматизации вспомогательных операций и др.;
- визуальный контроль большого количества технологических и электрических параметров ПУ (например, положение скипа в стволе, количество циклов подъема за сутки, изменение значений питающего напряжения и тока).

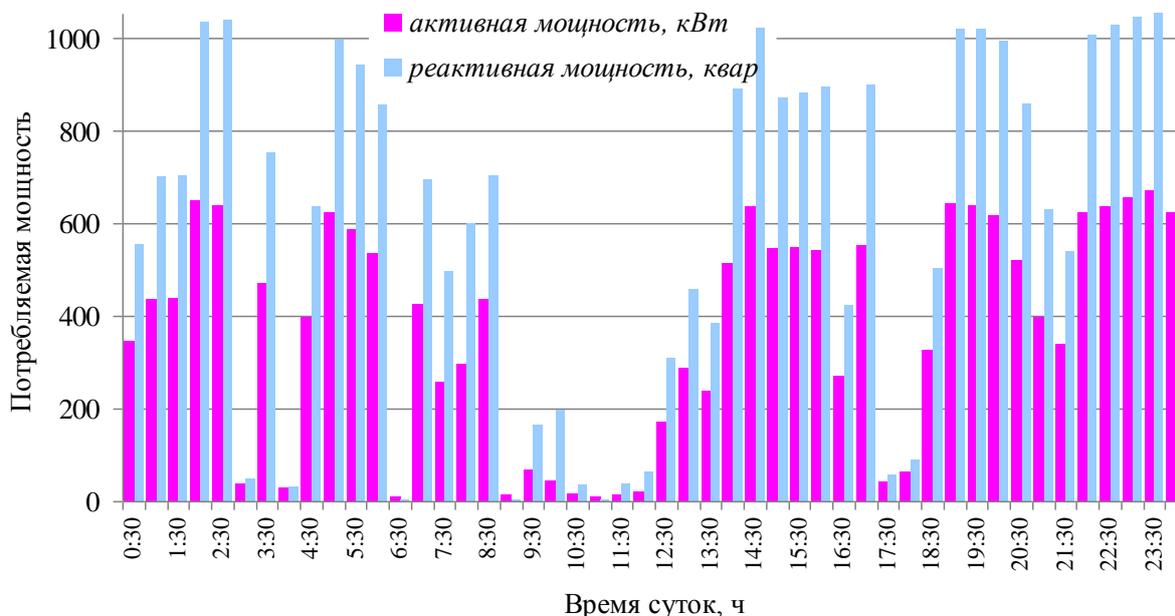
К основным недостаткам в результате применения систем регулируемого электропривода на базе тиристорных преобразователей следует отнести:

- генерирование значительных электромагнитных помех, которые проявляются в искажении синусоидальности кривых питающего напряжения и тока;
- низкий коэффициент мощности, особенно при глубоком регулировании скорости подъема, что проявляется в значительном потреблении ПУ реактивной мощности;
- возможное уменьшение коэффициента полезного действия и срока службы двигателей, дополнительные потери мощности и энергии, связанные с ухудшением качества электроэнергии;
- значительные капитальные затраты и др.

Наличие существенных преимуществ, полученных в результате применения преобразователей энергии, обусловило их широкое внедрение в системы электропривода различных технологических процессов, в том числе и для скиповых ПУ угольных шахт Украины. На рис. 1 приведен фактический суточный

график электрической нагрузки (ГЭН) скипового подъема с системой регулируемого электропривода "асинхронный тиристорный каскад" (АТК) на базе АД мощностью 800 кВт.

Для электропривода с такой системой регулирования характерно подключение к сети 6 кВ и статора (напрямую), и ротора (через специальный трансформатор). Поэтому на рис. 1 приведены совместно диаграммы активной и реактивной мощностей для статора и ротора АД. Кроме того, на ГЭН не показан объем генерируемой электроэнергии за счет ее рекуперации в электрическую сеть (что характерно для каскадных схем, таких как АТК), поэтому величина генерируемой активной мощности не превышает 1–2% от потребляемого значения.



**Рис. 1. Фактический суточный ГЭН скиповой ПУ с асинхронным электроприводом мощностью 800 кВт на базе системы АТК**

Общий вид свидетельствует о существенной неравномерности ГЭН угольной скиповой ПУ (среднее значение коэффициента формы  $K_f = 1,2 - 1,25$ ), которая определяется разным количеством циклов подъема за получасовой интервал осреднения (среднеквадратичное отклонение достигает 30% от номинальной мощности двигателя); характерном низком уровне электропотребления в ремонтную смену, вызванном отсутствием транспортируемого угля из-за перерыва в ведении добычных работ; превышении потребления реактивной мощности по сравнению с активной, которое определяет низкое значение среднего коэффициента мощности на уровне 0,4 – 0,55 (один из основных недостатков систем регулируемого электропривода на базе тиристорных преобразователей).

Наглядно подтвердить последний недостаток помогут фрагменты замеров в виде кривых изменения энергетических показателей в характерном цикле работы скиповой ПУ с асинхронным электроприводом на базе системы АТК, приведенные на рис. 2. Виды кривых свидетельствуют о значительном потреблении реактивной мощности в периоды неустановившегося движения скипа, т.е. в процессе его разгона, торможения и разгрузки. В эти периоды реактивное электропотребление в 2–2,5 раза больше активного (рис. 2, а). В процессе установившегося движения скипа набросов потребления реактивной нагрузки не наблюдается, и ее величина сопоставима с активной. Среднее значение  $\cos\varphi$  для цикла подъема составляет 0,4–0,45, что недопустимо мало (рис. 2, б). Кроме того, только в периоды неустановившегося движения скипа (при регулировании скорости подъема) проявляется негативное влияние преобразователей на систему электроснабжения, которое заключается в генерации значительных по уровню высших гармоник напряжения и тока. В результате этого коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  может превысить допустимые значения (рис. 2, в). Приведенные фрагменты изменения фактических энергетических показателей подтверждают, что "глубокое" регулирование технологических параметров ПУ с помощью тиристорных преобразователей значительно снижает коэффициент мощности и увеличивает несинусоидальность питающего напряжения.

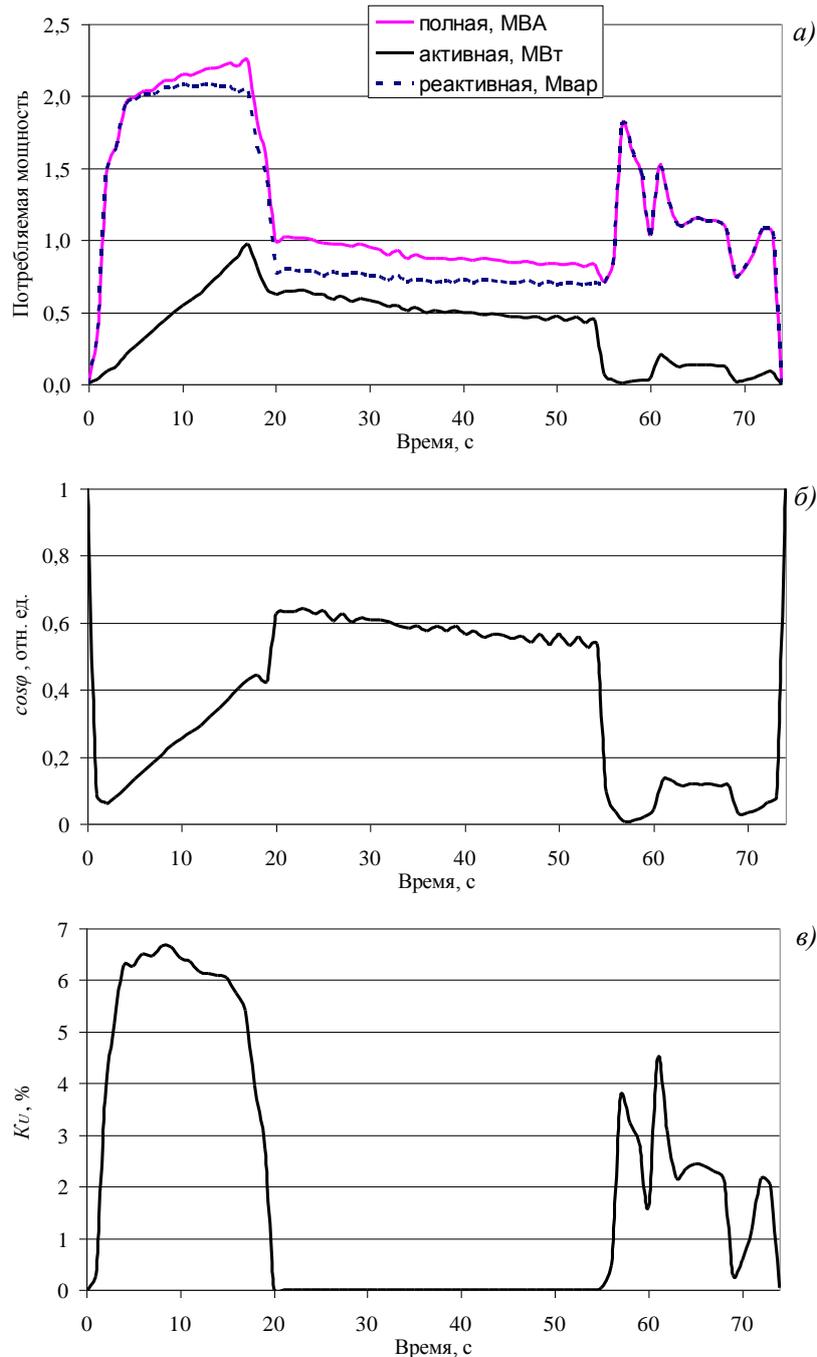


Рис. 2. Кривые изменения энергетических показателей скиповой ПУ с асинхронным электроприводом на базе системы АТК

На рис. 3 приведены кривые изменения энергетических показателей для фактического цикла подъема той же скиповой ПУ, параметры которой взяты из рис. 1 и 2, только при ее работе на основе релейно-контакторной схеме управления с активными сопротивлениями в цепи ротора. Вид кривых кардинально отличается от рассматриваемых рис. 2. Во-первых, потребление реактивной мощности по величине сопоставимо с активной для всех периодов тахограммы, что увеличивает среднее значение коэффициента мощности за цикл подъема до величины 0,75–0,77 (рис. 3, а, б).

Во-вторых, продолжительность движения скипа возрастает на 3 с (с 74 до 77 с) по сравнению с электроприводом на базе системы АТК, что подтверждает преимущество со стороны применения регулируемого электропривода в части повышения производительности ПУ. К тому же активное электропотребление повышается на 11,9% по сравнению с системой АТК за счет незначительного увеличения средней мощности (с 403,8 до 440,5 кВт) и продолжительности цикла подъема. Для данной скиповой установки внедрение системы регулируемого электропривода позволило увеличить количество подъемов за сутки на 20–30 циклов.

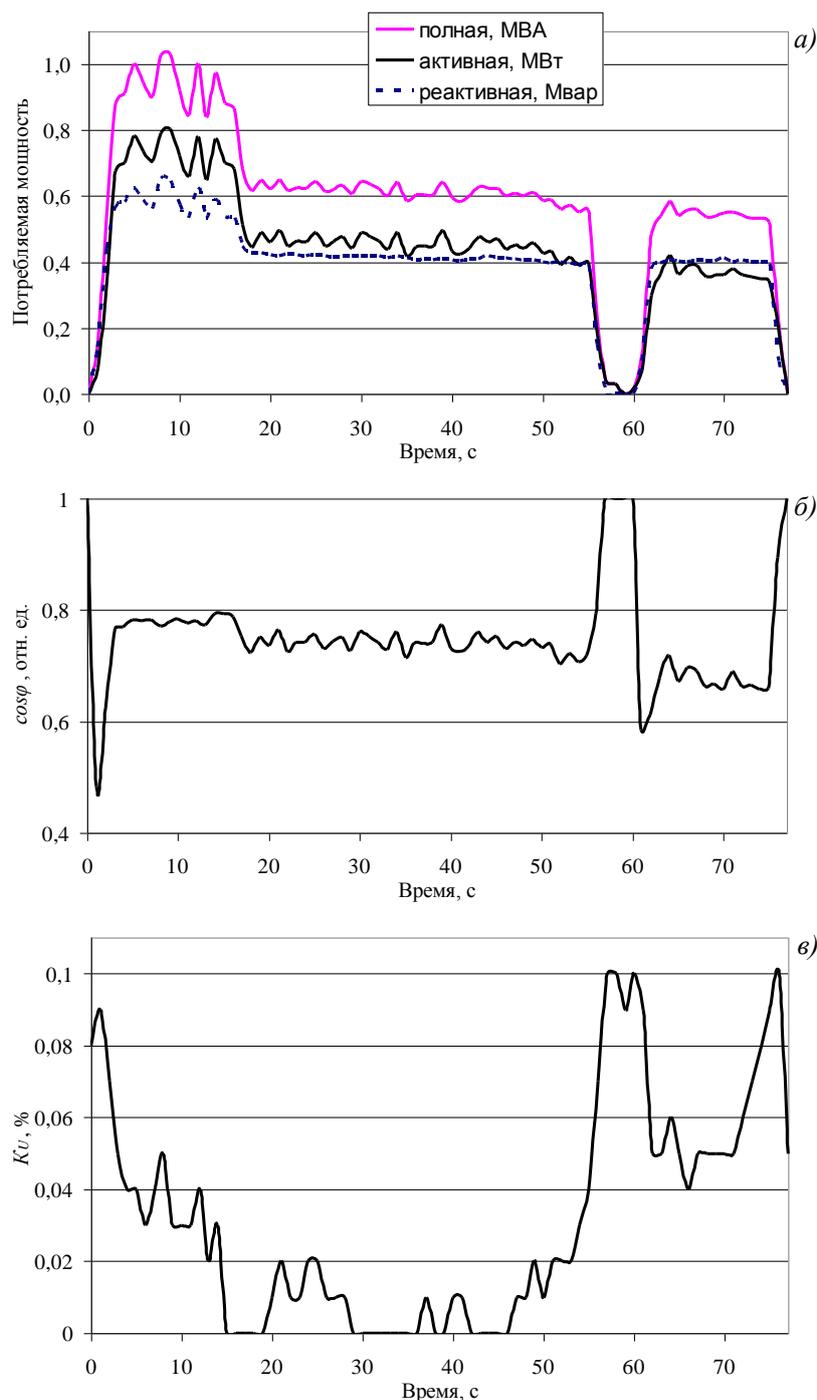


Рис. 3. Кривые изменения энергетических показателей в цикле подъема скиповой ПУ с асинхронным электроприводом на базе релейно-контакторной схеме управления

В-третьих, отсутствие тиристорных преобразователей в релейно-контакторной схеме управления дает возможность избежать негативных последствий, связанных с генерацией высших гармоник напряжения и тока в электрическую сеть. В результате этого величина коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_U$  не превышает величины 0,1%, а вид кривой не зависит от величины других показателей (мощностей и  $\cos\varphi$ ), что подтверждает отсутствие корреляции между ними (рис. 3, в).

Сравнение характеристик приведенных на рис. 2 и 3, подтверждает два основных достоинства системы АТК в результате ее применения (снижение потребления электроэнергии и повышение производительности ПУ) и в то же время говорит о ее недостатке (значительное уменьшение коэффициента мощности и генерация высших гармоник напряжения и тока). Для минимизации негативных последствий в системе электроснабжения необходима установка специальных устройств компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник.

При несинусоидальности напряжения и тока в электрической сети компенсация реактивной мощности для повышения  $\cos\varphi$  с помощью наиболее распространенных батарей статических конденсаторов значительно осложняется или вообще оказывается невозможной. Это связано с несколькими основными причинами. Во-первых, батареи конденсаторов могут долгое время работать при перегрузке токами высших гармоник не более чем на 30%, но при этом допустимое повышение напряжения на их зажимах составляет 10%. Однако сопротивление именно конденсаторов значительно уменьшается с увеличением частоты, поэтому в таких условиях срок их службы сокращается (особенно для батарей, которые подключаются к сети непосредственно, т.е. без защитных реакторов). Во-вторых, величины емкости конденсаторов и индуктивности электрической сети могут спровоцировать в системе электроснабжения режим, близкий к резонансу токов на частоте любой из гармоник. Конечно, такой режим приводит к перегрузке батарей конденсаторов и соответственно к выходу их из строя. В-третьих, резкопеременный режим потребления реактивной мощности (кратковременные броски и провалы – см. рис. 2, а) при применении системы электропривода на базе тиристорных преобразователей делает неэффективным использование нерегулируемых или ступенчато регулируемых конденсаторных установок. Для таких условий необходимо внедрение фильтрокомпенсирующих устройств, величина генерируемой реактивной мощности которых изменяется в реальном времени. Регулируемое фильтрокомпенсирующее устройство обеспечивает снижение несинусоидальности кривых напряжения и тока за счет фильтрации соответствующих гармоник, а также поддерживает на постоянном уровне высокое (близкое к единице) значение коэффициента мощности на шинах подстанции, к которой оно подключается. Необходимо отметить, что существует положительный опыт внедрения таких устройств на угольных шахтах Украины.

### Выводы

1. Режимы работы скиповых подъемных установок с системами регулируемого электропривода на базе тиристорных преобразователей характеризуются низкими значениями коэффициента мощности 0,4–0,45 и высокими уровнями коэффициента несинусоидальности напряжения, который достигает 8% и более.

2. Проблема повышения качества электроэнергии в электрических сетях с нелинейной нагрузкой, которая обостряется в последнее время из-за широкого внедрения систем электропривода на базе тиристорных преобразователей, требует комплексного решения как в части снижения несинусоидальности, так и в части компенсации реактивной мощности. Одним из эффективных способов ее разрешения является применение в системе электроснабжения регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*

УДК: 621.31

**В.В. Кузнецов канд. техн. наук**

*(Украина, Днепрпетровск, Национальная металлургическая академия Украины)*

## О ВЛИЯНИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ВЫБОР СРЕДСТВ ДЛЯ ИХ ПОВЫШЕНИЯ

### Введение

Негативное влияние некачественного питающего напряжения на показатели электромеханических систем хорошо известно [1,2]. В асинхронном электроприводе при наличии несинусоидальности и (или) несимметрии питающего напряжения появляются пульсации момента, развиваемого двигателем, повышается вибрация, приводящая к снижению надежности агрегата. Кроме того, наблюдается увеличение внутренних потерь, что отрицательно сказывается на энергетических показателях установки. Асинхронные двигатели малой и средней мощности (до 100 кВт), как правило, работают в составе нерегулируемого привода вспомогательных производственных механизмов. Установка частотных преобразователей для регулирования их производительности, безусловно, является решением проблемы некачественности питающего напряжения, однако в большинстве случаев она экономически нецелесообразна.

Между тем, количество таких приводов и доля потребляемой ими энергии в процессе производства довольно велики. Вследствие этого меры по энергосбережению в таких агрегатах, а тем более не требующие значительных материальных затрат, будут иметь существенный экономический эффект. Учитывая, что ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего