

УДК 622.3.002.5

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО КОНВЕЙЕРА

*Ставицкий В.Н., доц., к.т.н., Маренич К.Н., доц., к.т.н.  
Донецкий национальный технический университет  
Gea-step@fizmet.dgtu.donetsk.ua*

*It is proved the principle of control for electric drive of a mining tape conveyor to purpose the best power parameters. It is offered realization of the specified principle.*

Эффективность работы конвейера зависит, прежде всего, от эксплуатационных показателей его электропривода (ЭП), который в большинстве случаев является нерегулируемым и представлен простыми, надежными и компактными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором (АД). Как правило, ЭП конвейера эксплуатируется в длительном режиме при нагрузке, которая в зависимости от количества поступающего груза может изменяться в широких пределах [1] - от максимальной  $P_{max}$  (определяемой натяжением и углом обхвата лентой приводного барабана) до близкой к холостой  $P_{min}$ :

$$P = (L \cdot w \cdot (q + q_p' - q_p'')) \cdot v ; \quad (1)$$

$$P_{max} = (F_n + L \cdot w \cdot (q_{л} + q_p'')) \cdot (e^{\mu\beta} - 1) \cdot v ; \quad (2)$$

$$P_{min} = (L \cdot w \cdot (q_p' - q_p'')) \cdot v ; \quad (3)$$

где  $F_n$  – сила натяжения грузонесущего органа (ленты);

$L$  – длина конвейера;

$v$  – скорость ленты;

$w$  – коэффициент сопротивления движению;

$\mu$  – коэффициент сцепления между лентой и барабаном;

$\beta$  – угол обхвата барабана лентой;

$q, q_{л}, q_p', q_p''$  – удельный вес перемещаемого груза, ленты и роликов на порожней и грузовой ветвях ленты.

Широкий диапазон варьирования тягового усилия влияет на энергетические показатели приводного электродвигателя. Наивысшие значения основных из них – КПД и коэффициента мощности – соответствуют нагрузке АД  $(0.7...0.9)P_{ном}$  [2]. При уменьшении нагрузки полезная активная мощность АД снижается в большей степени, чем мощность потерь и реактивная мощность, расходуемая на создание вращающегося магнитного поля, обуславливая уменьшение КПД и коэффициента мощности двигателя. Об этом свидетельствуют рабочими характеристиками АД [2]. В итоге, эксплуатация АД в составе ЭП конвейера при изменяющемся грузопотоке сопряжена с нерациональным энергопотреблением при работе в области малых нагрузок.

Известно [1], что наиболее высокие показатели функционирования ЭП конвейера могут быть достигнуты при регулировании частоты вращения АД в функции грузопотока. В этом случае при снижении объема груза, поступающего в единицу времени, соответственно снижается и скорость грузонесущего органа. В результате удельная масса перемещаемого груза, а, следовательно, и момент на валу АД остаются неизменными (при независимой вентиляции двигателя), чем обеспечиваются оптимальные значения энергетических показателей ЭП. Помимо этого при снижении скорости уменьшается частота огибаний лентой приводных барабанов, увеличивая срок ее службы.

Реализация данной идеи может быть осуществлена за счет использования каскадных схем регулирования скорости АД с фазным ротором, либо за счет применения частотного принципа управления скоростью короткозамкнутого АД. Первый способ нашел применение для управления магистральными конвейерами. В ЭП ленточных конвейеров малой и средней мощности, составляющих подавляющее большинство, двигатели с фазным ротором не применяются, в связи с чем единственным возможным вариантом создания регулируемого по скорости привода остается система "преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором" (ПЧ – АД).

В условиях шахты реализация указанной системы привода сопряжена с необходимостью решения следующего комплекса задач:

- обеспечение высокого качества и широкого диапазона регулирования параметров выходного напряжения ПЧ;
- малые габариты, высокая надежность, низкая стоимость ПЧ;
- специфическое взрывобезопасное исполнение ПЧ при обеспечении пылевлагозащиты и условий охлаждения силовых полупроводниковых приборов (СПП).

Вышеперечисленные задачи носят противоречивый характер, обуславливая проблематичность создания малогабаритного, надежного и недорогого ПЧ в рудничном исполнении. Следствием этого является отсутствие практических средств регулирования механических и энергетических параметров АД с короткозамкнутым ро-

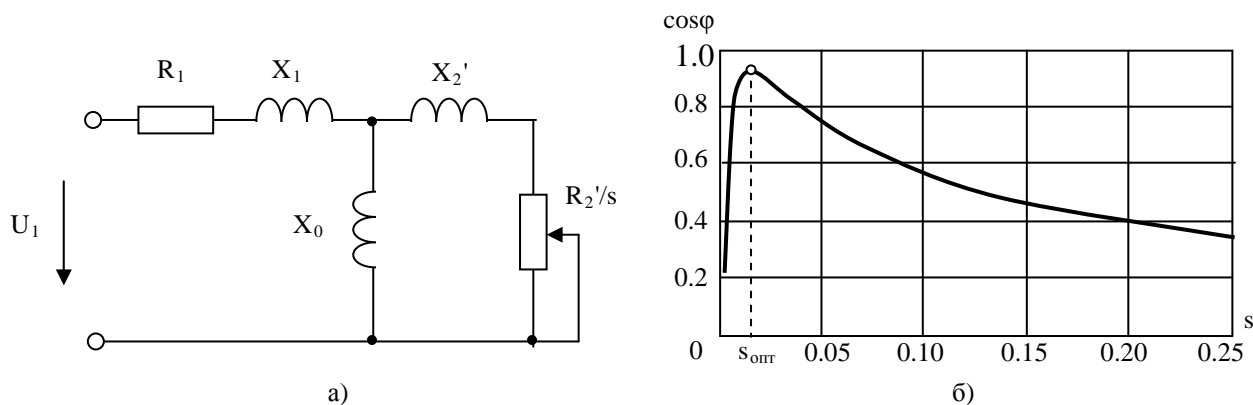


Рисунок 1 – Схема замещения АД (а) и зависимость коэффициента мощности АД от скольжения (б)

тором, пригодных для использования в ЭП шахтных конвейеров. Данная проблема может быть решена за счет использования принципа управления асинхронным ЭП, отличного от частотного. Он должен обеспечивать оптимальные значения КПД и коэффициента мощности во всем диапазоне варьирования нагрузки и должен иметь возможность практической реализации относительно простыми средствами.

Таким образом, целью исследований является обоснование принципа оптимального управления электроприводом шахтного ленточного конвейера с целью обеспечения наилучших энергетических показателей приводных асинхронных электродвигателей, а также обоснование приемлемых для условий шахты технических решений, позволяющих реализовать указанный принцип управления.

Решение поставленной задачи производится на основании допущений о постоянстве величин активных сопротивлений обмоток статора и ротора, индуктивности намагничивания АД, а также ряда известных из теории асинхронных машин положений [2]:

- при питании АД синусоидальным напряжением электромагнитные процессы с высокой точностью могут быть описаны на основании анализа Т-образной схемы замещения (рис.1.а);
- механические координаты АД (скольжение, момент) в статическом режиме связаны между собой уравнением Клосса (4):

$$M = \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s}; \quad (4)$$

где  $M_k, s_k$  – соответственно критические момент и скольжение.

- перегрузочная способность АД (критический момент) пропорциональна квадрату напряжения статора (5):

$$\lambda(u^*) = \lambda_{АД} \cdot u^{*2}; \quad (5)$$

где  $\lambda_{АД}$  – паспортное значение перегрузочной способности АД;

$u^* = U_1/U_{1H}$  – относительное напряжение статора АД.

- максимум КПД и коэффициента мощности наблюдается приблизительно при одном и том же скольжении. При оптимизации режима работы асинхронного ЭП целесообразно привязываться только к одному из этих показателей (например,  $\cos\phi$ ).

Коэффициент мощности АД определяется, исходя из схемы замещения (рис.1.а), параметрами обмоток двигателя (активные и реактивные сопротивления) и скольжением ротора (6):

$$\cos\phi(s) = \frac{\text{Re}(Z_{\text{эКВ}}(s))}{\sqrt{(\text{Re}(Z_{\text{эКВ}}(s)))^2 + (\text{Im}(Z_{\text{эКВ}}(s)))^2}}; \quad (6)$$

где  $Z_{\text{эКВ}}(s) = (R_1 + jX_1) + \frac{jX_0 \cdot (R_2'/s + jX_2')}{R_2'/s + j(X_2' + X_0)}$  – эквивалентное полное сопротивление АД;

$R_1, X_1$  – активное и реактивное сопротивления обмотки статора;

$R_2', X_2'$  – приведенные активное и реактивное сопротивления обмотки ротора;

$X_0$  – реактивное сопротивление ветви намагничивания.

Для электродвигателя типа 4А225М4 мощностью 55 кВт зависимость  $\cos\phi(s)$  имеет вид, представленный на рис.1.б. Максимум  $\cos\phi$  соответствует скольжению  $s_{\text{опт}}$ , близкому к номинальному. Уменьшение массы груза, обуславливающее снижение нагрузки, при постоянстве параметров питающего напряжения приводит к уменьшению скольжения, а, следовательно, и  $\cos\phi$ . Диапазон изменения скольжения при этом относительно неширокий – от  $s_{\text{хх}}$  до  $s_k$ .

Улучшить энергетические показатели ЭП можно за счет поддержания скольжения АД на уровне  $s_{\text{опт}}$  независимо от момента нагрузки  $M_c$  на валу. Достичь этого можно за счет регулирования питающего напряжения,

меня тем самым перегрузочную способность (5), а, следовательно, и жесткость механической характеристики АД (4). Совместное использование соотношений (4) – (5) позволяет получить зависимость, связывающую скольжение двигателя со статическим моментом нагрузки и величиной питающего напряжения:

$$M_c = \frac{2 \cdot \lambda_{AD} \cdot M_n \cdot u^{*2}}{s/s_k + s_k/s}; \quad (7)$$

где  $M_n$  – номинальный момент АД.

Последняя зависимость позволяет определить величину напряжения, которым необходимо питать АД, нагруженный статическим моментом  $M_c$ , для обеспечения работы двигателя со скольжением  $s_{opt}$ , соответствующим максимальному коэффициенту мощности:

$$u^* = \sqrt{k \cdot M_c}; \quad (8)$$

$$\text{где } k = \left( \frac{s_n(\lambda_{AD} + \sqrt{\lambda_{AD}^2 - 1})}{2\lambda_{AD}M_n s_{opt}} + \frac{s_{opt}}{2\lambda_{AD}M_n s_n(\lambda_{AD} + \sqrt{\lambda_{AD}^2 - 1})} \right);$$

$s_n$  – номинальное скольжение АД.

Таким образом, для любого АД на основании его паспортных данных ( $s_n, M_n, \lambda_{AD}, s_{opt}$ ) может быть установлен закон изменения питающего напряжения в функции нагрузки на валу ( $M_c$ ).

Аналогичный вывод следует из закона М.П. Костенко:

$$u^* = f^* \cdot \sqrt{m^*}; \quad (9)$$

где  $f^* = f_1/f_{1n}$  – относительная частота напряжения статора АД.

$m^* = M_c/M_n$  – относительный момент на валу АД.

Выполнение соотношения (9) обеспечивает постоянную перегрузочную способность. Сопоставление соотношений (8) и (9) свидетельствует о том, что при управлении АД по закону Костенко помимо перегрузочной способности обеспечивается постоянство энергетических показателей. Т.е. зависимость (8) является частным случаем закона Костенко, оптимизирующим коэффициент мощности АД.

Реализация обоснованного принципа оптимального управления ЭП конвейера требует обеспечения обратной связи по моменту нагрузки. Непосредственное измерение момента представляет собой сложную техническую задачу. Простого и надежного решения, приемлемого для условий рудничного ЭП, в настоящее время не имеется. Использование с этой целью данных только о потребляемом токе не обеспечивает приемлемой точности. Однако существует возможность косвенного определения момента на основании данных о фазных токах и напряжениях статора АД. В основе данного способа лежит зависимость, связывающая электромагнитный момент двигателя с векторами тока и потокосцепления статора  $\vec{\Psi}_1$  и  $\vec{I}_1$  [2]:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot |\vec{\Psi}_1 \times \vec{I}_1| = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{1\alpha} I_{1\beta} - \Psi_{1\beta} I_{1\alpha}); \quad (10)$$

где  $I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}$  – проекции векторов тока и потокосцепления статора на вещественную и мнимую оси неподвижной системы координат, связанной со статором.

Определение проекций вектора тока статора производится на основании данных о мгновенных значениях фазных токов, контролируемых соответствующими датчиками. Проекция вектора  $\vec{\Psi}_1$  могут быть определены путем интегрирования уравнений, описывающих электрический баланс фазы статора в неподвижной системе координат, составленных на основании второго закона Кирхгофа:

$$\vec{\Psi}_1 = \int (\vec{U}_1 - R_1 \cdot \vec{I}_1) dt; \quad (11)$$

Таким образом, контролируя фазные токи и напряжения статора АД, а также зная величину активного сопротивления фазной обмотки статора, можно путем несложных преобразований вычислить значение момента двигателя. Функции измерения, преобразования и вычислительной обработки сигналов обратной связи выполняет блок вычислитель момента (ВМ). Полученная информация об электромагнитном моменте АД используется системой управления преобразователем напряжения (СУПН). С учетом сказанного структурная схема, реализующая алгоритм оптимального управления ЭП ленточного конвейера будет иметь конфигурацию, представленную на рис.2.

Функцию управления величиной напряжения, подаваемого на статор АД, выполняет импульсный регулятор переменного напряжения (ИРПН) (рис.2). Известные тиристорные схемы ИРПН с фазовым регулированием (аппарат АПМ) [3] не позволяют получить ожидаемого эффекта вследствие значительного потребления реактивной мощности самим регулятором, что обусловлено принципом естественной коммутации тиристорных ключей - при понижении напряжения на выходе коэффициент мощности привода снижается, поскольку непосредственно определяется углом управления тиристорами  $\alpha$ . Помимо этого работа ЭП на основе подобных ИРПН характеризуется значительным содержанием 5-й, 7-й, 11-й и т.п. гармоник в выходном напряжении и токе и, как следствие, ухудшением режима работы остальных электропотребителей сети и значительной ам-

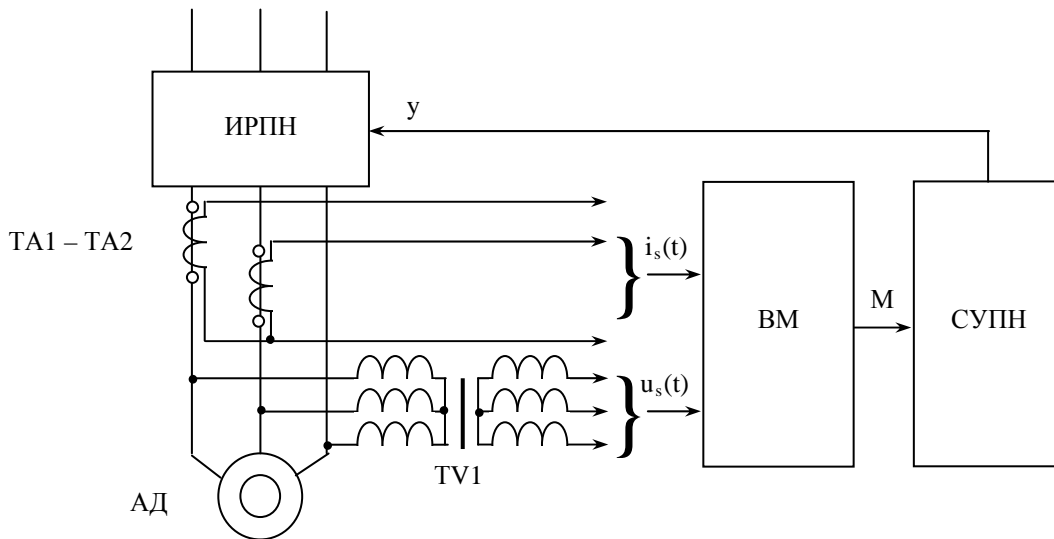


Рисунок 2 – Структурная схема автоматизированного электропривода ленточного конвейера

плитудой пульсаций электромагнитного момента АД.

Реальной альтернативой фазовому принципу регулирования напряжения является широтно-импульсное преобразование (ШИП) сетевого напряжения [4]. Силовые ключи (СК) между источником и нагрузкой коммутируются с высокой (несущей) частотой в течение периода сетевого напряжения. Управляемая величина - длительность включенного состояния СК при постоянстве несущей частоты (рис.3.а). Среднее значение напряжения на нагрузке за период несущей частоты определяется скважностью импульсов управления и мгновенными значениями напряжения сети. С целью его технической реализации авторами статьи предложена схема ИРПН с ШИП (рис.3.б). Она представлена тремя главными СК с полной управляемостью, включенными в каждую фазу сети и коммутируемыми одновременно. Для обеспечения протекания отрицательных полуволн фазных токов СК шунтируются обратными диодами. Одновременное отключение главных СК обуславливает необходимость принятия мер по их защите от перенапряжений, возникающих вследствие коммутации индуктивного тока нагрузки. В составе силовой схемы предусмотрен неуправляемый трехфазный выпрямитель, подключенный непосредственно к выходу схемы и коммутируемый дополнительным СК с полной управляемостью. Для защиты от лавинного пробоя каждый СК шунтируется емкостным снаббером, представляющим собой RC-цепь, которая формирует траекторию выключения. Для улучшения гармонического состава токов потребляемых ИРПН из сети и АД от ИРПН на входе и выходе схемы установлены дроссели. Значительная величина несущей частоты (от 1 кГц и выше) обуславливает малые габариты указанных элементов. Предлагаемая схема позволяет обеспечить широкодиапазонное регулирование переменного напряжения при сохранении благоприятного гармониче-

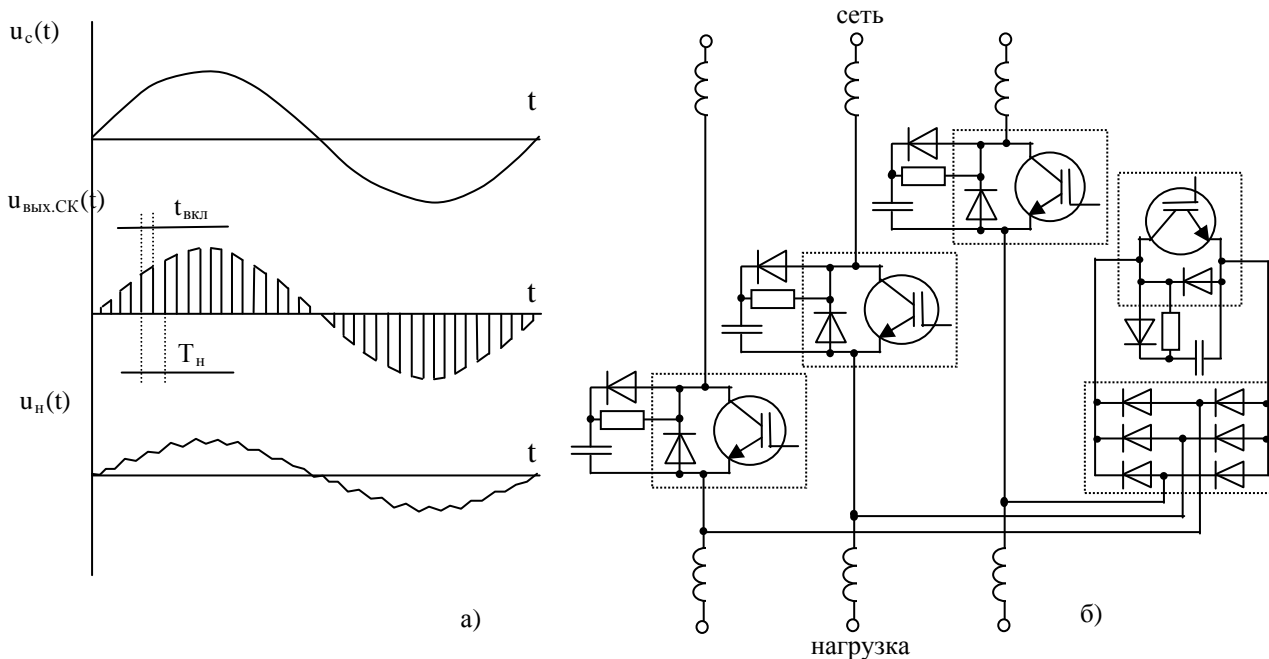


Рисунок 3 – Перспективная схема ИРПН с ШИП

ского состава (рис.3.а) и отсутствии влияния на коэффициент мощности ЭП.

Реализация данного способа стала возможной с появлением СК на основе транзисторов с изолированным затвором (IGBT), характеризующихся высокими энергетическими и динамическими показателями. Объединение в одном модуле транзистора и обратного диода минимизирует количество силовых приборов и упрощает их монтаж.

Таким образом, применение обоснованного принципа управления, а также предложенной в качестве технической реализации силовой схемы ИРПН, в составе ЭП ленточного конвейера позволяет:

- минимизировать потребление приводом реактивной мощности за счет повышения коэффициента мощности АД при варьировании нагрузки в диапазоне от нуля до номинальной;
- повысить КПД привода за счет снижения потерь активной мощности при обеспечении требуемой мощности на валу.

Обоснованный алгоритм (8) и схема могут быть использованы при разработке системы управления ЭП ленточного конвейера.

Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть направлены на уточнение полученного аналитического соотношения за счет учета влияния активного сопротивления статора, температурной зависимости активных сопротивлений статора и ротора, а также учета нелинейного характера индуктивности намагничивания АД.

#### ЛИТЕРАТУРА:

- 1.Малиновский. А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 277 с.
- 2.Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.
3. Ляшенко Н.И., Панасенко А..В., Зеленецкий В.Н. Некоторые результаты эксплуатации аппарата АПМ управления пуском электропривода ленточного конвейера. Уголь Украины, 1997, №12, С. 35-37.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника, - Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.