

ференциальных уравнений. Для применения этой математической модели в целях исследования переходных процессов при управляемом пуске или получении регулировочных характеристик системы «ТРН-АД», модель должна быть дополнена условиями переключения ТКЭ (условиями существования тока в цепи с ТКЭ).

При фазовом управлении тиристор открыт, если текущий электрический угол  $\theta$ , отсчитываемый от начала положительной полуволны фазного напряжения, больше угла управления  $\alpha$ , или же выполняется условие  $i \cdot u < 0$  при угле  $\theta < \alpha$ , когда ток поддерживается за счет накопленной энергии в индуктивностях цепи.

При квазичастотном управлении питание статорной цепи осуществляется системой выпрямленных токов переменной полярности, частота изменения которых определяется количеством положительных и отрицательных полупериодов напряжения, пропускаемых ТКЭ. Открытое состояние тиристора определяется условиями:

$$(\theta \geq \alpha) \text{ and } (u \cdot F > 0);$$

$$(i \cdot u < 0) \text{ and } (u \cdot F < 0),$$

где *and* – оператор логического «И»; *F* - дополнительная функция переключения:

$$F = \begin{cases} 1 \cdot \text{sign}(u_v) \text{ and } (i = 0); \\ 1 \cdot \text{sign}(i) \text{ and } (i \neq 0). \end{cases}$$

В приведенном выражении переменная  $u_v$  определяет эквивалентное напряжение требуемой частоты.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования пуска электродвигателя ДКВ45 мощностью 45 кВт созданием ненулевых начальных электромагнитных условий [2] на основе описанной выше модели.

Из результатов моделирования с использова-

нием разработанной модели, можно сделать вывод, что пуск АД с созданием ненулевых начальных электромагнитных условий приводит практически к полному подавлению знакопеременной составляющей переходного момента, обусловленной подключением статорной обмотки АД к сети, не вызывая снижения быстродействия привода.

На рис. 3 представлены результаты моделирования управляемого пуска электродвигателя ДКВ45 ограничением скорости нарастания приложенного напряжения путем изменения в процессе пуска угла управления по линейному закону, с синхронизацией по напряжению.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что этот вид управляемого пуска приводит к снижению как знакопеременной, так и вынужденной составляющей электромагнитного момента, что приводит к снижению быстродействия привода. Однако, при этом достигается плавное нарастание момента, что благоприятно сказывается на ресурсе активных механических частей промышленной установки.

Таким образом, разработанная математическая модель системы «ТРН-АД» позволяет исследовать переходные процессы в асинхронном электроприводе при различных законах управления пуском АД с учетом влияния коммутации ТКЭ на электромагнитные процессы в АД, а также проводить анализ эффективности пуска асинхронного электропривода конкретной промышленной установки.

Результаты моделирования с использованием представленной модели подтверждены экспериментальными испытаниями тиристорного устройства для управляемого пуска АД, разработанного на кафедре электропривода и автоматизации КузГТУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. -М.: Высш. шк., 2001. -327 с.
2. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. - М.: Энергоиздат, 1981. - 184 с.

□ Авторы статьи:

Каширских

Переверзев

Вениамин Георгиевич

Сергей Сергеевич

- канд. техн. наук, зав. каф. электропривода и автоматизации

- аспирант каф. электропривода и автоматизации

**УДК 622.012:621.316.9**

**А.Г. Захарова, Г.А. Казунина**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

В последние годы на шахтах Кузбасса существенно возросла производительность забойных машин и увеличилась мощность их электродвига-

телей. Это обстоятельство выдвинуло новые задачи перед системами электроснабжения очистных забоев (СЭС ОЗ) по обеспечению их экономично-

сти и надежности. С целью выявления фактических характеристик СЭС были изучены 86 схем питания очистных забоев на шахтах, разрабатывающих пологие и наклонные (до 30°) пласты мощностью 2,3 - 3,2 м, как наиболее представительных для бассейна в целом.

Из всего многообразия применяемых на практике СЭС ОЗ выделены две наиболее характерных. Одна из них приведена на рис. 1 и условно названа «через очистной забой». Здесь по высоковольтному кабелю  $L_{\text{вк}}$ , проложенному по вентиляционному штреку, получают питание три подстанции ТСВП, мощность которых в сочетании (630+400+400) кВ·А; (630+630+400) кВ·А или (630+630+630) кВ·А определяется мощностями двигателей технологически связанных потребителей ОЗ: комбайна, забойного конвейера, дробилки и перегружателя.

От одной из них по двум кабелям питаются электродвигатели комбайна. От другой - электродвигатели забойного конвейера. При использовании двухскоростных конвейерных электродвигателей к каждому из них прокладывается по два самостоятельных кабеля. Вся нагрузка на сопряжении ОЗ и конвейерного штрека получает питание через кабель, прокладываемый вдоль забоя и передвигаемый вместе с секциями крепи. Нагрузка на сопряжении конвейерного штрека и уклона (брюмсберга) получает электроэнергию от ТСВП мощностью 400 или 630 кВ·А.

Общая мощность подстанций, обслуживающих один ОЗ, составляет 1830-2520 кВ·А. При такой СЭС ОЗ нет необходимости прокладывать кабель по конвейерному штреку, вследствие чего

снижаются потери электроэнергии в целом по участку. Эта СЭС находит применение при установке по конвейерному штреку ленточных конвейеров 1ЛТ100, 1ЛТ100-01 или 2ЛТ-100, средняя длина поставки которых составляет 1200 - 1500 м, что примерно равно средней длине столба по простианию на начало его отработки.

Разделение питания потребителей ОЗ от разных подстанций позволяет применять для каждой из них группу свой уровень номинального напряжения, например, для электродвигателей комбайна и забойного конвейера - 1140 В, а для других, менее мощных - 660 В. Недостаток схемы состоит в необходимости прокладки по очистному забою нескольких (от 5 до 7) гибких кабелей сечением 50-70 мм<sup>2</sup>.

Вторая разновидность СЭС ОЗ применяется при наличии на конвейерном штреке двух и более ленточных конвейеров (рис. 2). В этом случае два головных электродвигателя забойного конвейера получают питание от подстанции со стороны конвейерного штрека, а хвостовой электродвигатель (электродвигатели) забойного конвейера, двигатели комбайна и другие потребители - от подстанций на вентиляционном штреке, мощность которых составляет (630+630) кВ·А или (630+400) кВ·А, при общей мощности подстанций участка 1660-1890 кВ·А. Здесь электродвигатели всех потребителей могут питаться напряжением 660 В, а комбайна - 1140 В. Для управления магнитными пускателями электродвигателей забойного конвейера по забою прокладывается специальный контрольный кабель, служащий для их взаимной блокировки и обеспечения нужной последовательности включения.

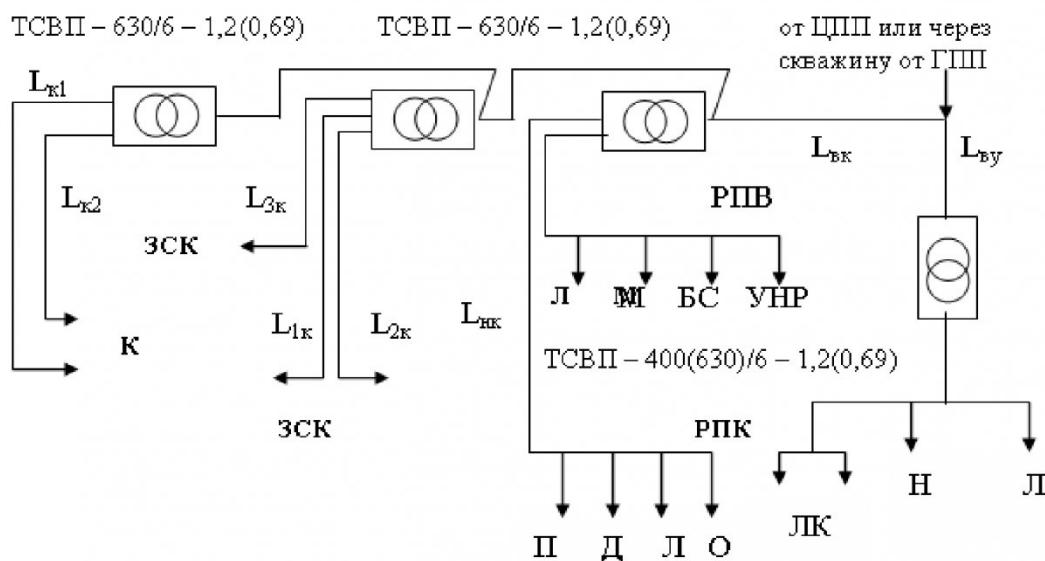


Рис. 1. Схема электроснабжения «через очистной забой»:

*K - комбайн; ЗСК - забойный конвейер; Л - лебедка; М - маслостанция; БС - буровой станок; УНР - установка нагнетания воды в пласт; Д - дробилка; П - перегружатель; О - освещение; ЛК - ленточный конвейер; Н - насос; L<sub>k1</sub>, L<sub>k2</sub> - комбайновые кабели; L<sub>1k</sub>, L<sub>2k</sub>, L<sub>3k</sub> - кабели забойного конвейера; L<sub>вк</sub>, L<sub>бк</sub> - высоковольтный бронированный кабель по вентиляционному штреку и по уклону (брюмсбергу); РПК и РПВ - распределункты, соответственно, на конвейерном и вентиляционном штреках; L<sub>нк</sub> - кабель питания нагрузки конвейерного штрека*

тельности запуска. Длина комбайнового кабеля обычно на 30 - 80 м превышает длину очистного забоя. Недостатком такой схемы являются повышенные потери электроэнергии в связи с большой длиной низковольтного бронированного кабеля по конвейерному штреку.

Обычно выбор СЭС производят по минимуму приведенных (годовых) затрат, в которые входит стоимость потерь электроэнергии. Однако этим показателем не всегда можно воспользоваться, поскольку в условиях рыночной экономики стоимость потерь электроэнергии может быть несравнимо меньше затрат на кабельные сети. Между тем, сами по себе потери электроэнергии могут служить мерилом выбора СЭС.

Потери электрической энергии в кабельной сети очистного забоя состоят из постоянной  $\Delta\mathcal{E}_{post}$  и переменной  $\Delta\mathcal{E}_{nep}$  составляющих:

$$\Delta\mathcal{E}_{o3} = \Delta\mathcal{E}_{post} + \Delta\mathcal{E}_{nep}.$$

Постоянная составляющая потерь обусловлена не изменяющейся за все время работы ОЗ нагрузкой (число двигателей, их установленная мощность и длина гибких кабелей остаются постоянными). Переменная составляющая определяется тем, что по мере подвигания забоя уменьшается (при отработке столба обратным ходом) или увеличивается (при прямом ходе) длина низковольтных и высоковольтных бронированных (фидерных) кабелей, а также изменяется (соответственно, уменьшается или растет) нагрузка ленточных конвейеров за счет периодического их сокращения или наращивания.

Например, при питании ОЗ по схеме на рис. 1, при подвигании ОЗ будет периодически сокращаться высоковольтный кабель  $L_{vk}$  на длину  $l_c$ , соответствующую шагу перемещения подстанции, а также будет снижаться нагрузка ленточного конвейера ЛК за счет также периодического уменьшения его длины. Таким образом, переменная часть потерь изменяется по величине и во времени. При питании ОЗ по схеме рис. 2 будет

сокращаться высоковольтный  $L_{vk}$  и низковольтный  $L_{kk}$  бронированные кабели, а также нагрузка ленточного конвейера ЛК2, а по мере того, как он будет выведен из работы, будет происходить периодическое постепенное снижение нагрузки ЛК1.

Вместе с тем, в гибких кабелях, питающих электродвигатели комбайна забойного конвейера, дробилки, перегружателя и другого ГШО, длина которых остается неизменной, потери электроэнергии определяются режимом работы потребителей и характером нагрузки.

Если бы высоковольтный бронированный кабель не сокращался, то годовые потери электроэнергии в нем могли составить:

$$\Delta\mathcal{E}_e = \Delta P_{vk} \tau_e,$$

где  $L_{vk}$  - длина бронированного кабеля, м;  $\tau_e$  - годовое время максимальных потерь, ч;  $\Delta P$  - потери мощности, кВт:

$$\Delta P = \frac{3I_m^2 \cdot 10^{-3}}{gs},$$

где  $I_m$  - максимальный ток, А;  $g$ ,  $s$  - проводимость медного кабеля, м/(Ом·мм<sup>2</sup>), и сечение, мм<sup>2</sup>.

При годовом подвигании забоя  $L_e$ , м, произойдет  $n = L_e/l_c$  сокращений, где  $l_c$  - подвигание забоя на одно сокращение. На такое же число отрезков сокращается и бронированный кабель. Обозначив через  $\tau_c$  число часов максимальных потерь на одно сокращение кабеля, получим потери электроэнергии, кВт·ч, за это время до первого сокращения при условии, что

$$l_{c1} \approx l_{c2} \approx l_{cn} \approx l_c, \quad L_{vk} = L_e, \quad \tau_c = \tau_e/n;$$

$$\Delta\mathcal{E}_{c1} = \Delta P_{vk} \tau_c L_e;$$

до второго сокращения

$$\Delta\mathcal{E}_{c2} = \Delta P_{vk} \tau_c (L_e - l_c);$$

до третьего сокращения

$$\Delta\mathcal{E}_{c3} = \Delta P_{vk} \tau_c (L_e - 2l_c);$$

до  $n$ -го сокращения

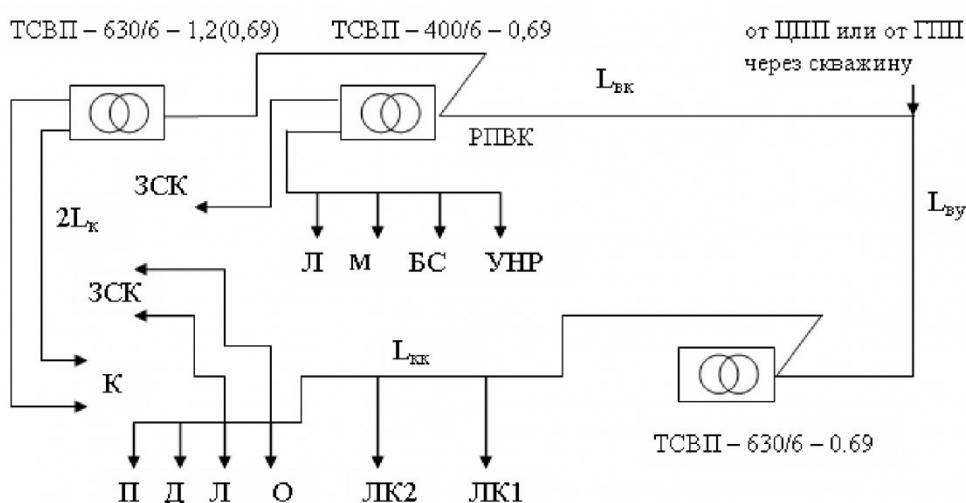


Рис. 2. Схема электроснабжения через конвейерный и вентиляционный штреки:  $L_{kk}$  – низковольтный кабель по конвейерному штреку; ЛК1, ЛК2 – ленточные конвейеры

$$\Delta \mathcal{E}_{cn} = \Delta P_{ek} \tau_c [L_2 - (n-1)l_c].$$

Просуммировав потери после каждого сокращения и выполнив преобразования с учетом того, что  $n l_c = L_2$ , получим

$$\Delta \mathcal{E}_{nep} = \Sigma \Delta \mathcal{E}_{ci} = \Delta P_{ek} \frac{\tau_c}{n} L_2 \left[ 1 + \frac{l_c}{L_2} \frac{n(n-1)}{2} \right]$$

Заменив  $\frac{l_c}{L_2} = \frac{1}{n}$ , окончательно получим:

$$\Delta \mathcal{E}_{nep} = \Delta P_{ek} \frac{\tau_c}{n} L_2 \left[ 1 + \frac{(n-1)}{2} \right].$$

Соотношение (1) отражает процесс уменьшения потерь электроэнергии при сокращении кабеля, когда нагрузка сохраняется постоянной.

Для СЭС, когда при работе ОЗ производят периодическое наращивание кабеля (отработка столба ведется прямым ходом), изменение потерь электроэнергии определено в [1, 2] и может быть подсчитано по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{nep} = \Delta P_{ek} \tau_c L_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2n} \right).$$

Соотношение постоянных и переменных потерь в СЭС ОЗ проиллюстрировано расчетом, выполненным для схемы на рис. 1, где приняты следующие параметры. Комбайновые кабели:  $s=70 \text{ mm}^2$ ,  $L_{k1}=L_{k2}=200 \text{ м}$ , ток нагрузки  $I_{k1}=I_{k2}=126 \text{ A}$ , напряжение 1140 В; кабели забойного конвейера:  $s=70 \text{ mm}^2$ ,  $L_{1k}=L_{2k}=210 \text{ м}$ ,  $L_{3k}=90 \text{ м}$ , ток нагрузки  $I_{1k}=I_{2k}=I_{3k}=100 \text{ A}$ , напряжение 1140 В; кабель питания нагрузки конвейерного штрека:  $s=70 \text{ mm}^2$ , длина  $L_{nk}=220 \text{ м}$ , ток нагрузки  $I_{nk}=230 \text{ A}$ , напряжение 660 В; нагрузка распределенного РПВ:  $I_{RPB}=120 \text{ A}$ ; высоковольтный бронированный кабель:  $L_{ek}=1200 \text{ м}$ , сечение  $s=35 \text{ mm}^2$ ,  $I_{ek}=140 \text{ A}$ ;  $l_c=80 \text{ м}$ ;  $\tau_c=4000 \text{ ч}$ ;  $\cos \varphi=0.8$ .

На рис. 3 показано соотношение потерь постоянных  $\Delta \mathcal{E}_{post}$ , переменных  $\Delta \mathcal{E}_{nep}$  и потерь  $\Delta \mathcal{E}_n$  в трех подстанциях КТПВ 630/6-1,2(0,69) при коэффициенте загрузки  $K_3=0,8$ .

Видно, что потери в гибких и бронированных кабелях становятся соизмеримыми уже при числе сокращений  $n>10$ . По этой причине увеличение числа сокращений кабеля можно рассматривать как одну из мер энергосбережения. Например, увеличение числа сокращений кабеля с  $n_f=2$  до

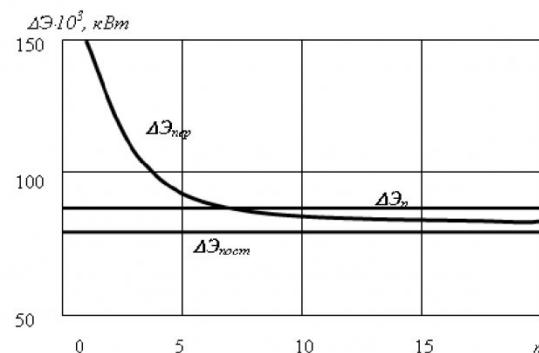


Рис. 3. Зависимость постоянных  $\Delta \mathcal{E}_{post}$  и переменных  $\Delta \mathcal{E}_{nep}$  потерь электроэнергии и потерь в трех подстанциях  $\Delta \mathcal{E}_n$  от числа сокращений н бронированного кабеля

$n_2=8$  может дать экономию электроэнергии до 18,5%. Вместе с тем, при увеличении числа сокращений возникает проблема повторного использования бронированного кабеля, поскольку небольшие по длине отрезки повторно использовать практически невозможно.

Снижение нагрузки по мере отработки запасов угля обратным ходом (от границы столба) происходит за счет сокращения ленточных конвейеров, установленных на конвейерном штреке, т.е. снижается нагрузка на трансформатор подземной участковой передвижной подстанции (ПУПП) и уменьшается длина бронированных кабелей, проложенных по конвейерному штреку, т.е. уменьшаются потери электроэнергии.

При работе прямым ходом, наоборот, по мере увеличения длины конвейерного штрека в нем устанавливают новые ленточные конвейеры, т.е. нагрузка на ПУПП растет, возрастает и длина бронированного кабеля по конвейерному штреку и, следовательно, увеличиваются потери.

Анализ показал, что по конвейерным штрекам устанавливают не более двух ленточных конвейеров общей мощностью 160-400 кВт, что составляет 10-16% общей установленной мощности электродвигателей очистного забоя. Снижение потребляемой ими электроэнергии происходит периодически по мере отработки столба и составляет не более 2-3% на одно сокращение. По этой причине этот процесс не оказывает существенного влияния на общий результат электропотребления очистного забоя и может не учитываться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьев В.П. Расчет электрических сетей угольных предприятий. – М.: Недра, 1974. – 184 с.
2. Захарова А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: Монография / Гос. учреждение Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2002. – 198 с.

□ Авторы статьи:

Захарова  
Алла Геннадьевна  
- канд. техн. наук, доц. каф. электро-  
привода и автоматизации

Казунина  
Галина Алексеевна  
- канд. физ-мат. наук, доц. каф. выс-  
шей математики