

УДК 621.316

А.М. Королев, канд. техн. наук, В.В. Срибный
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ЗАЩИТА РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ КВАЗИСТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАГРУЗКИ

По воздействию на наиболее слабое звено тяговой подстанции - полупроводниковый выпрямитель – тяговая нагрузка в шахтных условиях имеет свои особенности, которые должны быть учтены при проектировании и эксплуатации подстанций:

- 1) наличие длительных (30 – 60 мин) максимумов в период наиболее интенсивной работы рудничного транспорта (в наиболее загруженный час смены);
- 2) наличие резко выраженных кратковременных максимумов (длительностью до 10–15 с), возникаю-

щих в результате наложения пусковых токов одного или нескольких электровозов, а также при неправильных пусках. Кратковременные перегрузки могут вызвать перегрев и выход из строя полупроводниковых вентилялей выпрямителя, не представляя опасности для прочего электрооборудования подстанции;

3) резкопеременный характер тяговой нагрузки, вызванный вероятностным характером наложения токов отдельных электровозов. Колебания температуры $p-n$ переходов вентилялей (термоцикличность), возникающие при этом, могут преждевременно вывести их из строя;

4) частые короткие замыкания, токи которых могут достигать 10-кратных значений по отношению к номинальному току подстанции.

Существующие конструкции рудничных тяговых подстанций достаточно хорошо защищены от длительных перегрузок и коротких замыканий.

Степень воздействия кратковременного максимума на вентиль определяется амплитудой и длительностью этого максимума, а также состоянием вентиля в момент появления максимума (предварительный нагрев, качество охлаждения и т. д.). В случае абсолютно жесткой внешней характеристики подстанции участие пусковых токов электровозов в максимуме нагрузки сводится к суммированию токов, потребляемых отдельными электровозами. Гораздо сложнее выразить процесс наложения токов, если подстанция обладает внешней характеристикой.

В этом случае при появлении пускового тока или другом скачкообразном увеличении тяговой нагрузки выпрямленное напряжение резко снижается, а токи работающих электровозов постепенно уменьшаются до тех пор, пока существует рассогласование между значениями выпрямленного напряжения и скоростью движения состава. Вследствие этого суммарный ток в тяговой сети остается примерно на том же уровне, т. е. наблюдается некоторая стабилизация суммарного тягового тока и тем самым предотвращается перегрузка выпрямителя пусковыми токами электровозов.

Степень взаимодействия тяговой подстанции, имеющей не жесткую внешнюю характеристику, с движущимися электровозами, часть из которых находится в состоянии пуска, можно проанализировать, если рассматривать подстанцию, тяговую сеть и электровозы как замкнутую систему автоматического регулирования. Структурная схема такой системы изображена на рис. 1, а.

Рассмотрим пока наиболее простой случай, когда из общего количества N электровозов, находящихся под током, один в состоянии пуска $N_n=1$. Сопротивление движению всех N электровозов является задающим воздействием принятой нами системы регулирования, так как однозначно определяет статический ток системы I_c .

Система охвачена отрицательной обратной связью по току нагрузки, действующей только в переходных режимах таким образом, что при скачкообразном увеличении суммарного тягового тока выпрямленное напряжение быстро уменьшается в соответствии с внешней характеристикой подстанции.

Внешняя характеристика подстанции для нашей задачи может быть описана передаточной функцией вида:

$$W_2 = \frac{\Delta U(p)}{\Delta I(p)} = K_2 .$$

Сниженному напряжению соответствует меньшая скорость электровоза. Поскольку последняя не может снизиться мгновенно, то ток, потребляемый из тяговой сети движущимися электровозами, будет уменьшаться.

Связь между изменением тока, потребляемого электровозами, и изменением напряжения выпрямителя может быть описана передаточной функцией электровоза W_3 , равной удвоенной передаточной функции тягового двигателя, структурная схема которого представлена на рис. 1, б.

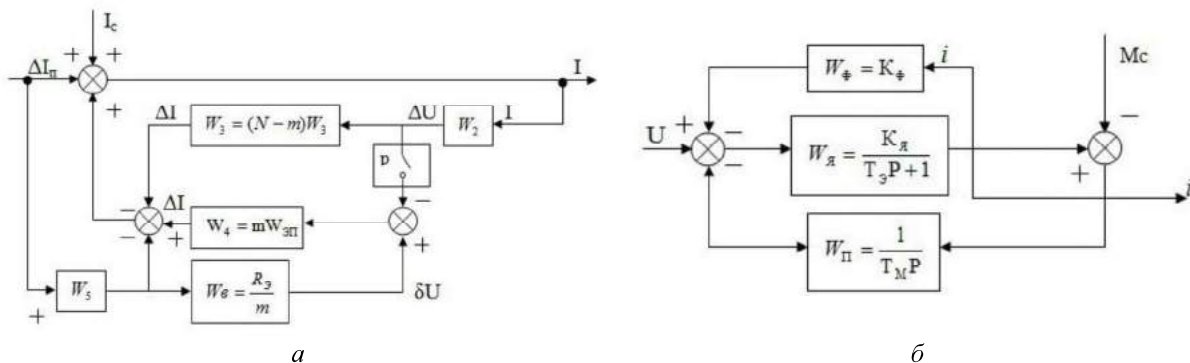


Рис. 1. Структурные схемы автоматического регулирования

системы выпрямитель – электровозы (а) и тягового двигателя электровоза (б), $W_5 = e^{-ptn}$.

После окончания переходного процесса, когда скорость достигнет установившегося значения, обратная связь перестает действовать, так как потребляемый электровозом ток при установившейся скорости определяется сопротивлением движению поезда.

Наиболее вероятным возмущающим воздействием принятой нами системы является пусковой ток электровоза $Nn\Delta I_n$ (рис. 2, а). При этом следует учитывать уровень пусковых токов на параллельном соединении тяговых двигателей (рис. 2, б), поскольку при последовательном соединении соответствуют величине средних тяговых токов электровоза.

На основании сказанного, возмущающее воздействие системы можно представить как мгновенное скачкообразное воздействие тока $+\Delta I_n$ в момент перехода электровоза на параллельное соединение двигателей (момент t_1 на рис. 2, а).

Снижение пускового тока после выхода двигателей на естественную характеристику (интервал $t_1 \dots \infty$) отражено в структурной схеме (рис. 1, а) задержанными (соответственно передаточной функции W_5) на время пуска ($t_n = t_2 - t_1$) воздействиями. Таких воздействий два:

- ΔI_n – мгновенный обратный скачок тока, поступающего на сумматор входа системы;
- + δU – соответствующий этому току мгновенный скачок напряжения, поступающего на пускаемый электровоз.

При анализе необходимо учитывать, что неизменность пускового тока в промежутке времени $t_1 \dots t_2$ поддерживается машинистом в процессе пуска соответствующим изменением сопротивления в цепи якоря. В системе регулирования последнее условие может быть отражено изменением передаточной функции W_4 пускаемого электровоза (Nn пускаемых электровозов) или указанным более простым способом.

Точное решение полученной системы ввиду нелинейности входящих в нее звеньев получить затруднительно, поэтому принята упрощенная линеаризованная передаточная функция тягового двигателя, не вносящая существенных погрешностей в узкую область регулирования:

$$W_{\dot{A}} = \frac{\Delta I(p)}{\Delta U(p)} = \frac{K_{\dot{A}} p}{\dot{\alpha} \dot{\gamma} \dot{\beta} \delta^2 + \dot{\alpha} \dot{\gamma} p + 1} \quad (1)$$

Электрическая постоянная времени двигателя

$$\dot{\alpha} \dot{\gamma} = \frac{L}{R} \quad , \quad (2)$$

где L, R – индуктивность и активное сопротивление двигателя.

Электромеханическая постоянная времени двигателя

$$\dot{\beta} \dot{\delta} = m \frac{R n_0}{E_0 \alpha_0} \quad , \quad (3)$$

где m – масса поезда, которая приходится на один двигатель; E_0, n_0 – среднее значение ЭДС и скорости тягового двигателя в области регулирования; α – тангенс угла наклона тяговой характеристики двигателя в диапазоне регулирования ,

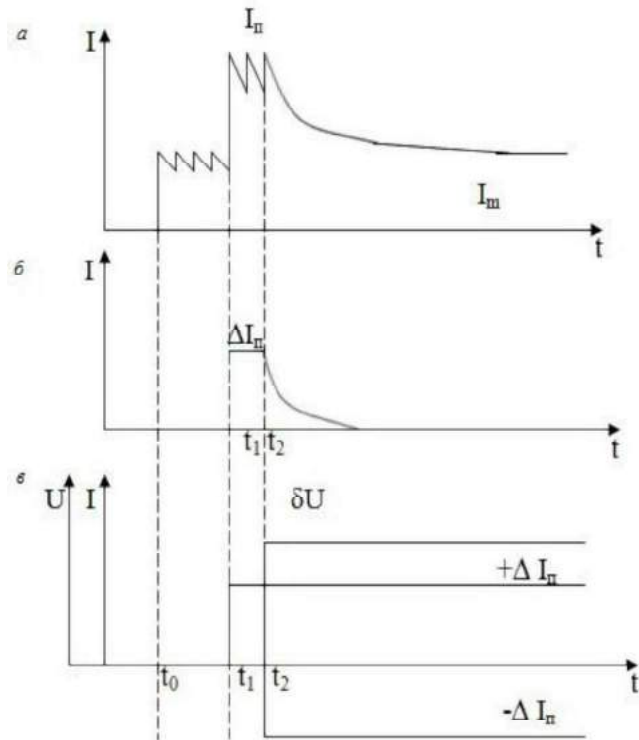


Рис. 2. Характеристики действительного (а), расчетного (б) и приведенного к структурной схеме (в) возмущающих воздействия системы автоматического регулирования

$$\alpha = \frac{\Delta F}{\Delta I} .$$

Коэффициент усиления двигателя в динамическом режиме

$$\hat{E}_{\bar{A}} = \frac{\dot{O}_i}{R} .$$

Постоянная времени тягового двигателя

$$\dot{O}_Z = (1 + \frac{Cn_0\beta_0}{R})T_M = (1 + \frac{E_0\beta_0}{\dot{O}_0R})T_M , \quad (4)$$

где Φ_0 – среднее значение потока двигателя в диапазоне регулирования; β_0 – тангенс угла наклона кривой намагничивания двигателя в диапазоне регулирования,

$$\beta_0 = \frac{\Delta \hat{O}}{\Delta^2} .$$

Для анализа работы системы приняты некоторые допущения, позволяющие использовать аналитические методы решения:

- 1) перевод двигателей на параллельное соединение при пуске электровоза производится без изменения тока тяговых двигателей. Ток электровоза при этом мгновенно удваивается (рис. 2, а);
- 2) дальнейший разгон электровоза вплоть до выхода на естественную характеристику при неизменном токе соответствует плавному выводу пускового реостата (рис. 2, б);
- 3) сопротивление движению поезда в диапазоне регулирования не зависит от скорости движения состава;
- 4) внешняя характеристика тяговой подстанции в диапазоне регулирования линейна, выпрямитель безынерционен.

Изменение тока тяговой подстанции в функции пускового скачка описывается передаточной функцией W_t .

Так, для интервала времени $t_1 \dots t_2$ передаточная функция имеет следующий вид:

$$W_{t_1 \dots t_2} = \frac{\Delta I(p)}{\Delta I_i(\delta)} = \frac{1}{1 + W_2 W_3} \quad (5)$$

или

$$W_{t_1 \dots t_2} = \frac{\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + T_z p + 1}{T_y T_i \delta^2 + [\dot{O}_z + (N-1)K_2 K_y] p + 1} ,$$

где K_3 – коэффициент усиления электровоза с двумя двигателями,

$$\hat{E}_{\dot{y}} = 2\hat{E}_{\bar{A}} ;$$

N – количество электровозов, потребляющих ток.

Пренебрегая в первом приближении электрической постоянной времени электровоза (так как $T_s \ll T_m$), для передаточной функции системы получим

$$W_{t_1 \div t_2} = \frac{T_z p + 1}{[\dot{O}_z + K_2 K_y (N-1)] p + 1} \quad (6)$$

корень уравнения

$$\delta = \frac{1}{\dot{O}_z + K_2 K_y (N-1)} .$$

Постоянная времени переходного процесса системы

$$\dot{O}_I = \dot{O}_z + K(N-1), \quad (7)$$

где $K=K_2K_3$ – коэффициент усиления системы.

Зависимость (7) может быть использована при выборе параметров электровозной откатки. Обеспечив достаточно большой коэффициент усиления K_2 (угол наклона внешней характеристики выпрямителя), можно получить результирующую постоянную T_n , намного превосходящую длительность пуска t_n , и добиться, чтобы приращение тока в тяговой сети за время пуска электровозов было незначительным.

Для интервала времени $t_2 \dots \infty$ передаточная функция описывается выражением:

$$W_{t_2 \div \infty} = \frac{\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + T_z p + 1}{T_y T_i \delta^2 + [\dot{O}_z + (N-1)K_2 K_y] p + 1} \cdot \frac{[\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + (\dot{O}_z - T_i) p + 1] \exp(-pt_i) + \dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + \dot{O}_z \delta + 1}{\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + (\dot{O}_z + KN) p + 1}. \quad (8)$$

Если пренебречь, так же как и в первом случае, электрической постоянной, ($T_s \ll T_m$), то для корней и постоянных времени процесса, получим упрощенные зависимости:

$$\delta_1 = -\frac{1}{T_z + NK} \quad \delta_2 = -\frac{1}{T_z + (N-1)K}; \quad \dot{O}_1 = \dot{O}_z + NK \quad \dot{O}_2 = \dot{O}_z + (N-1)K. \quad (9)$$

Анализ выражений (8) и (9) показывает, что скорость электровозов после окончания переходного процесса восстановится практически с той же постоянной времени T_n , что и нарастание тока в тяговой сети при пуске электровозов.

Практическое значение установленной зависимости заключается в возможности создания по этому принципу защиты тяговых выпрямителей от кратковременных перегрузок. Сущность такой защиты сводится к формированию специальной внешней характеристики тяговой подстанции (рис.3), приводящей к ограничению кратковременных перегрузок выпрямителя за счет снижения потребления тока движущимися электровозами.

Снижение скорости движения электровозов, которое имеет место при срабатывании защиты, несущественно и не оказывает заметного влияния на производительность электровозной откатки, тем более, что скорости движения электровозов не достигает предельных значений.

Связь параметров системы регулирования с формой внешней характеристики выпрямителя можно выразить на основании рис.3 и выражений (8), (9):

$$\hat{E}_2 = \frac{dU}{dI} = tg\alpha, \quad tg\alpha = \frac{T_i - T_z}{(\dot{O} - 0,5)\hat{E}_y}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что жесткая внешняя характеристика подстанции существенно улучшает распределение нагрузки параллельно работающим двигателям.

Наклон внешней характеристики выпрямителя можно изменением угла регулирования выпрямителя или параметров преобразовательного трансформатора.

Вывод. Формирование специальной внешней характеристики тяговых выпрямителей, приводящей к ограничению кратковременных перегрузок за счет снижения потребления тока движущимися электровозами, обеспечивается, как описывалось выше, уменьшением выпрямленного напряжения при возникновении перегрузки, большей тока установки I_y . Полное отключение произойдет при перегрузках, превышающих ток отсечки I_{omc} . Эта дает возможность уменьшить число отключений и повысить использование мощности тяговой подстанции (увеличить количество электровозов, питающихся от подстанции).

Список литературы

1. Електрифікація гірничих робіт: підручник / Г.Г. Півняк, М.М. Белий, Л.П. Ворохов та ін.; за ред. акад. НАН України Г.Г. Півняка. – 2-ге вид. переробл. і доп. – Д.: Національний гірничий університет, 2005. – 615 с.

Електропостачання та електроустаткування

2. Проектирование и конструирование транспортных машин и комплексов / под ред. И.Г. Штокмана. – М.: Недра, 1986. – 392с.
3. Гетопанов В.Н. Горные и транспортные машины и комплексы / В.Н. Гетопанов, Н.С. Гудилин, Л.И. Чугреев. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
4. Подземный транспорт шахт и рудников: справочник / под ред. Г.Я. Пейсаховича, И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1985. – 565 с.

Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.