Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного знамени горного института, т. XXXIII, вып. I, 1956 г.

ДВИГАТЕЛИ РУДНИЧНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

А. В. Рысьев

1. Условия работы тягового двигателя

При современном развитии горной электротехники в качестве тягового двигателя на рудничных электровозах применяется сериесный двигатель постоянного тока. Он наилучшим образом удовлетворяет требованиям рудничных электровозов при работе на шахтных откаточных путях.

В настоящее время шахтные откаточные пути характеризуются весьма слабым верхним строением, резко переменной величиной уклонов, наличием кривых малого радиуса закруглений и в ряде случаев обводненностью и загрязненностью рельсов. Такое состояние откаточных путей, естественно, приводит к ухудшению работы подвижного состава, быстрому износу ходовых частей электровоза и вагонов — к увеличению сопротивлений движению всего состава.

Условия работы тягового двигателя рудничных электровозов обычно имеют резко переменную величину нагрузки. Статические сопротивления движению часто принимают отрицательные значения. При наличии других дополнительных сопротивлений движению тяговый двигатель фактически работает все время на переходных режимах — в разгонах и замедлениях. Режим установившегося движения, как правило, отсутствует, так как наличие тяжелых для работы электровоза участков пути вызывает необходимость в заниженном составе поезда, для которого скорость установившегося движения, согласно тяговым характеристикам двигателя, недопустимо велика.

Сериесный двигатель обладает высокой перегрузочной способностью. Его электромеханические характеристики автоматически обеспечивают рациональное изменение скорости движения и величины усилий при изменениях статических сопротивлений. Из существующих типов электродвигателей сериесный обладает наиболее удачными электромеханическими характеристиками для подобных условий работы.

Несмотря на это, труд машинистов рудничных электровозов остается тяжелым и ответственным. При движении состава машинисту непрерывно приходится манипулировать контроллером, пользоваться тормозами и песочницами. Производительность локомотива главным образом зависит от сноровки и умения управления машиниста. Производительность одного и того же типа локомотива может изменяться в два и три раза в зависимости от квалификации машиниста.

При существующем положении электровозной откатки остается недостаточной техника безопасности труда машинистов электровозов и смежных с ним квалификаций трудящихся.

На ряде шахт рудничная электровозная откатка ограничивает увеличение производительности, является узким местом в производстве. В связи с этим возникает неотложная необходимость в коренной реконструкции рудничной электровозной откатки. На базе полной или частичной автоматизации электровозной откатки должны быть созданы условия безаварийной работы рудничных локомотивов с более высокой производительностью и лучшей техникой безопасности для трудящихся.

Переход на все более глубокие горизонты разработки месторождений полезных ископаемых вызовет удлинение шахтных полей, а следовательно, увеличение длин локомотивной откатки — увеличение их производительности.

Резкое увеличение производительности локомотивной откатки с учетом техники безопасности возможно только на базе полной автоматизации управления. Автоматизация управления локомотивами при существующем положении шахтной электровозной откатки трудно осуществима. Сложные схемы маневровой работы электровозов в околоствольных выработках, а иногда и на погрузочных пунктах и сложное управление электровозом в пути требуют постоянного внимания машиниста к каждому локомотиву. Большой процент маневровой работы и возможность случайных задержек приводят к тому, что большее время в течение рейса тратится на непредвиденные простои.

Основными условиями полной автоматизации электровозной откатки являются: упрощение схем откаточных путей, устранение маневровой работы электровозов в околоствольных выработках и на погрузочных пунктах, улучшение верхнего строения профиля откаточных путей. Для автоматизированного рудничного транспорта существующая схема околоствольных выработок должна быть видоизменена. Она должна быть подчинена требованиям автоматического движения и разгрузки вагончиков без электровоза. Движение вагонов в пределах околоствольных выработок должно осуществляться другими механизмами (подвагонными цепями, толкателями и т. п.).

При упрощении схем движения электровоз должен с прибытием состава к пункту погрузки или разгрузки лишь автоматически перецепляться от одного состава к другому. Может быть применена, например, автоматическая передвижка электровоза в бок с одного пути на другой с одновременной автоматической перецепкой составов [1]. Одновременно при помощи толкателя путь освобождается от электровоза для дальнейшего продвижения вагонов под погрузку или разгрузку, и электровоз без всякой маневровой работы становится в голову состава для обратного движения.

Практическое решение вопроса автоматической передвижки электровоза с одного пути на другой может быть осуществлено при помощи существующих конструкций электроприводов цепных толкателей. С такими до минимума простыми схемами «челнокового» движения электровоза (без всяких маневровых работ) по хорошим откаточным путям можно применять автоматическое управление несколькими электровозами из диспетчерского пункта, совершенно освободив машинистов электровозов от их тяжелого и напряженного труда.

При этом средства дистанционного управления должны освобождать диспетчера от необходимости следить за каждым локомотивом. При движении электровозов должен быть полный автоматизм без всяких предварительных разработок маршрутов.

Одним из вариантов практического решения вопроса автоматического управления контактными электровозами может служить вариант питания секционированной тяговой сети от двойных шин тяговой подстанции [1]. При помощи блокировки на каждом секционированном участке тяговой сети обеспечивается нахождение только одного электровоза. Питание всех движущихся электровозов производится от шин тяговой подстанции с постоянным напряжением. Питание электровозов в период разгонов обеспечивается от других шин тяговой подстанции с постепенно увеличивающимся напряжением, чем достигается плавный разгон двигателя в ход без применения средств управления на электровозе.

При помощи блокировок на тяговой подстанции переключение электровозов с одних шин на другие производится также автоматически без участия диспетчера, за которым остается лишь общее наблюдение за мнемосхемой, отражающей движение составов на путях, и принятие соответствующих мер для устранения нарушений.

Полная автоматизация электровозной откатки вызовет изменение условий работы тяговых двигателей. Они должны будут работать преимущественно на установившихся скоростях движения. Искусственное ограничение скорости движения включением секций реостата, переключением двигателей с параллельного соединения на последовательное, тем или иным видом торможения или временным выключением тяговых двигателей в данном случае (без машиниста) осуществить весьма сложно. По своим характеристикам двигатель должен удовлетворять такому режиму работы электровоза, который не требует вмешательства машиниста.

В данном случае предельно простая работа тяговых двигателей может быть только при движении с установившимися скоростями на естественной характеристике (без ослабления магнитного поля и введения сопротивления в якорную цепь), при разгоне с постепенным увеличением подведенного к двигателю напряжения и при замедлении на свободном выбеге. Однако в реальных условиях работы электровозов в шахте режимы работы двигателей усложняются. Даже при самых простейших схемах движения и наилучшем состоянии откаточных путей надо учитывать возможные изменения статических сопротивлений движению поезда, которые могут быть вызваны непостоянной величиной уклонов откаточных путей (часто изменяющейся под действием горного давления), неодинаковой величиной сопротивления движению отдельных вагонов или составов, неодинаковым весом составов поезда, изменением состояния поверхности откаточных путей и, как следствие — изменением коэффициента сопротивления движению и особенно коэффициента сцепления колес с рельсами и рядом других причин. Таким образом, для получения более или менее постоянной величины установившихся скоростей движения, очевидно, потребуется двигатель, обладающий более жесткими характеристиками, чем сериесные. Необходимо автоматическое ограничение скорости движения при снижениях нагрузки, что неосуществимо при сериесном двигателе. При переходе к отрицательным статическим сопротивлениям (что иногда имеет место) двигатель автоматически должен переходить в тормозной режим. Учитывая возможные тяжелые условия работы в моменты разгонов состава, двигатель должен иметь хорошие перегрузочные способности.

Главным условием автоматической электровозной откатки является высокая надежность — безотказность работы тяговых двигателей. Конструкция тяговых двигателей и схема управления ими на электровозе должны быть надежны и до минимума просты. Хотя автоматизированная откатка должна осуществляться в специальных выработках на сильной свежей струе воздуха, где во время движения поездов категорически за-

прещается появление людей, двигатели и схемы управления должны максимально удовлетворять условиям безопасности работы в газовой среде. Кроме того, тяговые двигатели должны соответствовать условиям параллельной работы на ведущих полускатах одного и того же электровоза. В данном случае условия параллельной работы двигателей отличаются от обычных условий, когда двигатели, работающие на общий вал, механически жестко связаны одинаковой скоростью общего вала и одинаковой величиной статических сопротивлений движению. Расхождения в режимах работы таких двигателей могут появиться только при отсутствии подобия электрических характеристик самих двигателей.

При параллельной же работе тяговых двигателей на электровозе различный режим работы двигателей может быть вызван и внешними причинами. Различное число оборотов параллельно работающих двигателей может быть следствием, например, пробуксовки одного из полускатов или разности в диаметре колес ведущих полускатов (при разном износе бандажей колес).

Своеобразные условия возникают в работе тяговых двигателей при последовательном включении в сеть, что применяется на рудничных электровозах с целью уменьшения скорости движения. Несоответствие режимов работы тяговых двигателей при таком включении удобно наблюдать, если приподнять электровоз над рельсами — освободив ведущие колеса от сцепления с рельсами. В этом случае малейшее несоответствие характеристик двигателей или небольшая разница в статических сопротивлениях между двумя полускатами приводит к тому, что один из двигателей начинает увеличивать скорость, тогда как другой будет вращаться все медленнее. Наступает момент, когда один из двигателей совершенно останавливается при очень быстром вращении второго двигателя, включенного последовательно. Физические явления, происходящие в этом случае в тяговых двигателях, могут быть объяснены следующим образом. Малейшее неравенство скорости вращения тяговых двигателей $n_1 \neq n_2$, вызванное неравенством статических сопротивлений или неподобием электромеханических характеристик, приводит к неравенству э. д. с. двигателей $E_1 \neq E_2$. Имея в виду известное выражение э. д. с.,

$$E = \alpha \Phi n, \ в,$$

где α — машинная постоянная;

Φ — магнитный поток машины.

При последовательном включении сериесных машин ток в якорях машин одинаковый, а следовательно, $\Phi_1 \approx \Phi_2$. Таким образом, увеличение n приводит к возрастанию э. д. с. E, а следовательно, и к увеличению подведенного к данной машине напряжения $U = E + I_я R_я$. Второй член последней формулы, выражающий внутренние потери в машине, для обоих двигателей остается при этом примерно одинаковым, так как величина тока в якоре $I_я$ последовательно включенных машин одинакова, а сопротивления якорных обмоток $R_я$ при этом не изменяются.

С увеличением подводимого к двигателю напряжения скорость вращения двигателя еще более возрастает, процесс автоматически принимает затяжной характер. Таким образом, напряжение сети целиком передается на один из последовательно включенных двигателей, второй двигатель останавливается. Напряжение сети уравновешивается при этом согласно выражению

$$U_с = U_{д_1} + U_{д_2} = \alpha_1 \Phi_1 n_1 + I_я R_1 + I_я R_2 =$$
$$= \alpha_1 \Phi_4 n_1 + I_я (R_1 + R_2), \ в.$$

Режимы работы машин при этом можно изменить следующим образом. Если притормозить быстро вращающийся двигатель, то его скорость уменьшится. Часть напряжения сети будет передана на второй последовательно включенный двигатель, который, имея меньшие статические сопротивления, быстро наберет скорость и переведет все напряжение сети на себя.

Реальные условия работы последовательно включенных тяговых двигателей на электровозе отличаются от описанных выше. В нормальном случае оба двигателя, механически связанные через сцепление колес электровоза с рельсами, должны иметь одинаковую скорость вращения, а следовательно, и одинаковую величину э. д. с. и напряжения.

Описанное выше явление в режимах работы машин наступает при наличии устойчивых пробуксовок колес ведущих полускатов. Тяговый двигатель буксующего полуската быстро набирает скорость, переводя все напряжение сети на себя. Двигатель небуксующего полуската, включенный последовательно с первым, в связи с уменьшением напряжения снижает скорость движения электровоза. Это явление в работе электровозов часто можно наблюдать на тяжелых затяжных подъемах. Машинисту удается вывести электровоз из такого режима работы интенсивным подсыпанием песка под колеса.

При параллельном включении тяговых двигателей передача напряжения с одного двигателя на другой невозможна. На оба двигателя подводится одинаковое напряжение U сети. Однако неравенство режимов работы двигателей также возможно, например, при наличии неподобия тяговых характеристик, разницы в диаметрах колес ведущих полускатов и особенно при наличии пробуксовок колес электровоза.

Двигатель буксующего полуската обычно увеличивает скорость вращения, снимая с себя нагрузку. Процесс принимает затяжной характер

$$U_c = \alpha \Phi n + I_я R_я, \ в.$$

При постоянном напряжении сети с уменьшением тока в якоре $I_я$ скорость вращения n еще более возрастает. Этому способствует также уменьшение коэффициента сцепления колес с рельсами при увеличении скорости пробуксовки колес.

Полная автоматизация электровозной откатки должна предусматривать меры, устраняющие возможность устойчивой пробуксовки колес ведущих полускатов. Можно, например, использовать способы автоматического увеличения коэффициента сцепления колес с рельсами при помощи автоматизированных песочниц, действующих в моменты возникновения пробуксовки колес (при возникновении разности в скорости вращения полускатов электровоза), или при помощи автоматических электромагнитных усилителей сцепления колес электровоза с рельсами [2]. Средства увеличения коэффициента сцепления должны действовать лишь при наличии разности в скоростях вращения полускатов и автоматически отключаться при нормальном режиме работы электровоза.

Условия работы электровоза в ряде случаев связаны с тормозным режимом. Торможение применяется как при замедлениях на остановках, так и при движении на затяжных уклонах пути. Оно осуществляется механическими колодковыми тормозами и иногда электрическим реостатным торможением. При решении этого вопроса необходимо иметь в виду следующие требования, предъявляемые к тормозным средствам:

1) тормозной режим должен наступать автоматически и без промедления при возникновении отрицательных статических сопротивлений;

2) тормозные средства должны обеспечивать остановку состава в нужных местах;

3) конструкция и схемы тормозных устройств должны быть предельно просты и надежны.

Выполнение первого требования осуществляется применением тяговых двигателей с характеристиками, обеспечивающими плавный переход из двигательного в генераторный режим без каких-либо дополнительных переключений. Автоматического перехода с двигательного в генераторный режим применяемые на элекровозах сериесные двигатели не дают. Это условие может быть выполнено при компаундных и шунтовых двигателях постоянного тока или асинхронных двигателях переменного тока.

Существующие тормозные средства на электровозах не удовлетворяют также второму и третьему требованиям, предъявляемым автоматизированной электровозной откаткой.

Реостатное торможение и колодковые механические тормоза требуют обязательного индивидуального управления, они конструктивно сложны и для полной автоматизации мало пригодны. Вводить же в схему специальное большое регулируемое сопротивление только для реостатного торможения нецелесообразно.

Для сокращения времени замедления на остановках может быть рассмотрен вариант применения электромагнитных тормозов. Питание катушек электромагнитных тормозов могло бы производиться энергией от двигателей электровоза, работающих в период замедления в качестве генераторов.

2. Электромеханические характеристики тяговых двигателей

В качестве тяговых двигателей для автоматизированной электровозной откатки должны быть применены такие, которые в наибольшей степени удовлетворяют указанным выше условиям работы.

Из двигателей постоянного тока предпочтение должно быть отдано компаундному, который при значительном числе ампервитков сериесной обмотки сохраняет ценные пусковые свойства сериесных двигателей. Вращающий момент его с увеличением нагрузки растет быстрее, чем у шунтовых двигателей, и не только с увеличением силы тока в якоре, но и с увеличением магнитного потока. Это свойство особенно ценно в периоды пуска двигателей в ход. Мягкие характеристики компаундных машин обеспечивают более равномерное распределение нагрузки между параллельно работающими двигателями на электровозе. В шунтовых двигателях постоянного тока, имеющих весьма жесткие характеристики, расхождения в скоростях вращения полускатов электровоза при пробуксовке колес или наличии разницы в диаметрах колес могут привести к недопустимой неравномерности нагрузок машин в двигательном и, особенно, в генераторном режимах работы.

Существенный недостаток сериесных двигателей для автоматизированной электровозной откатки состоит в том, что при малых нагрузках они развивают слишком большую скорость, не имеют пограничной скорости и не позволяют плавного перехода из двигательного в генераторный тормозной режим. Это свойство сериесных машин требует квалифицированного управления, особенно при наличии отрицательных уклонов на откаточных путях. При этом двигатели необходимо периодически отключать от сети и применять тот или иной вид торможения. Автоматизировать полностью все эти процессы весьма сложно.

Компаундный двигатель имеет пограничную скорость и допускает переход в генераторный (тормозной) режим на высоких скоростях движения. Однако при переходе в генераторный режим и изменении напра-

вления тока в якорной цепи сериесная обмотка начинает размагничивать машину, уменьшать магнитный поток. В результате в генераторном режиме скорость движения резко возрастает.

Для устранения этого недостатка при переходе в генераторный режим сериесную обмотку компаундных машин обычно шунтируют или отключают, тогда машина приобретает жесткие шунтовые характеристики.

Применение способа переключения сериесной обмотки при переходе с одного режима на другой в автоматизированной электровозной тяге практически возможно. В качестве начального импульса на переключение обмоток может служить изменение направления тока в якорной цепи. Однако это нежелательно усложнит схему управления электровозом дополнительным реле и тем снизит надежность — безотказность действия автоматизированной схемы энергоснабжения электровоза. Кроме того, при отключении сериесной обмотки компаундной машины в генераторном режиме сохраняются недостатки шунтовых генераторов. Разница в скорости вращения машин или неподобие характеристик приведет к значительному расхождению в нагрузках.

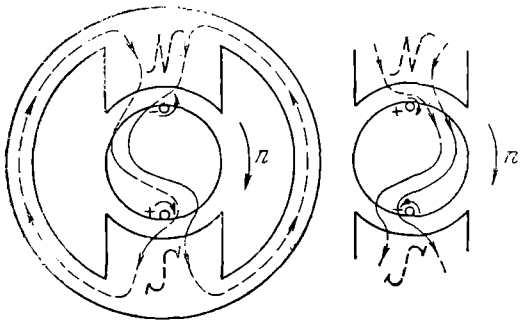
Одним из вариантов решения данного вопроса может служить применение компаундных двигателей с компенсационными обмотками. Такие обмотки должны автоматически ослаблять магнитное поле сериесных обмоток в генераторном режиме и усиливать в двигательном. Питание компенсационных обмоток должно производиться от специальных щеток на коллекторе машины, которые будут снимать э. д. с. якоря машины, наведенную под полюсами (рис. 1).

Компенсационные обмотки должны быть рассчитаны на использование искажения магнитного поля машины при переходе с двигательного на генераторный режим. Как известно, в двигательном режиме магнитные силовые линии сгущаются под набегающей кромкой индукторов, а в генераторном режиме — под сбегающей кромкой. Следовательно, для ослабления сериесного магнитного поля машины в генераторном режиме необходимо встречную компенсационную обмотку питать от щеток, снимающих э. д. с. под сбегающей кромкой полюсов машины. Для усиления сериесного магнитного поля машины в двигательном режиме необходимо согласную (последовательную) компенсационную обмотку питать от щеток, снимающих э. д. с. под набегающей кромкой полюсов машины.

При таком включении компенсационных обмоток соотношение ампервитков шунтовой и сериесных обмоток машины автоматически изменяется в нужном направлении. При больших нагрузках в двигательном режиме будут преобладать ампервитки сериесной обмотки, что благоприятно сказывается на пусковых свойствах тяговых двигателей. Уменьшение нагрузки на двигатель изменяет соотношение ампервитков в пользу шунтовых, характеристики принимают более устойчивую форму. При переходе в генераторный режим, в зависимости от расчета компенсационных обмоток, может быть получена любая форма устойчивых тормозных характеристик (рис. 2).

Указанные характеристики наиболее соответствуют условиям работы тягового двигателя на автоматизированном рудничном электровозе.

В периоды пуска и больших нагрузок скорость двигателя автоматически будет снижаться, а момент вращения — возрастать пропорционально квадрату тока в якоре. При этом нагрузка тяговой сети будет значительно меньше, чем была бы в аналогичных условиях с шунтовыми двигателями. При уменьшении нагрузки на двигатель величина скорости будет автоматически возрастать, а угловой коэффициент характеристики — одновременно уменьшаться. Скорость ограничится постоянной величиной, обусловленной магнитным потоком шунтовой обмотки. При



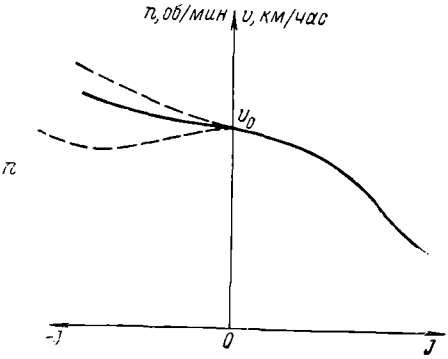


Рис. 2. Скоростная характеристика машины

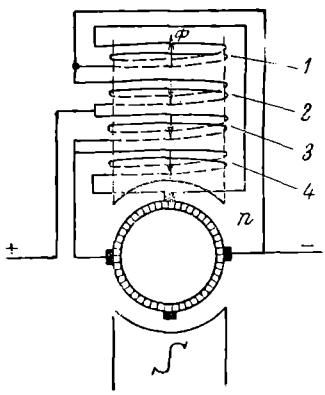


Рис. Схема включения обмоток машины

а — двигатель; *б* — генератор. Обмотки: *1* — компенсационная обмотка сбегающей кромки полюсов; *2* — шунтовая; *3* — сериесная; *4* — компенсационная обмотка набегающей кромки полюсов

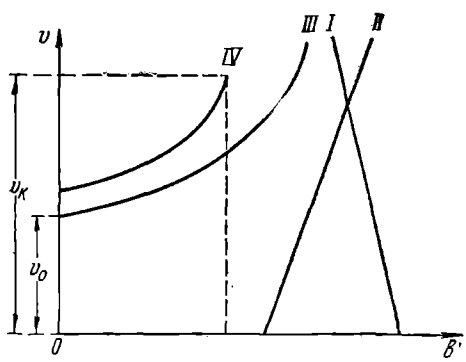


Рис. 3. Механическая устойчивость рекуперативного торможения при различных характеристиках генераторов

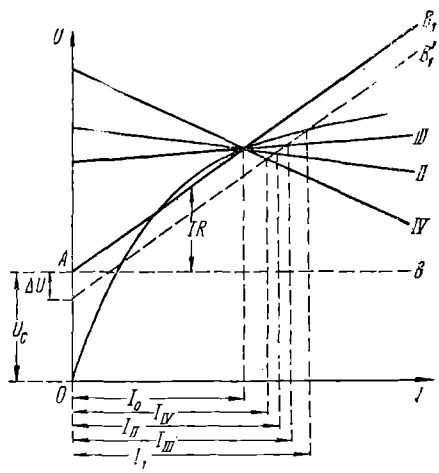


Рис. 4. График электрической устойчивости рекуперативного торможения при различных характеристиках генераторов:

I — сериесного; *II* — шунтового; *III* — компаундного; *IV* — противокомпаундного

переходе статических сопротивлений из положительных значений в отрицательные двигатель автоматически обеспечит тормозной режим с отдачей энергии в сеть.

Использование рекуперативного торможения весьма желательно. При наличии на откаточных путях затяжных отрицательных уклонов рекуперативное торможение одновременно позволит сэкономить часть электрической энергии, расходуемой на откатку.

Однако возможность применения генераторного торможения на тяге обычно весьма ограничена. Для надежного генераторного торможения требуется:

1) чтобы автомеханические характеристики тяговых двигателей обеспечивали как механическую, так и электрическую устойчивость;

2) чтобы энергия, возвращаемая в сеть при торможении, находила себе потребителя;

3) чтобы уклоны откаточных путей не превышали допустимых пределов.

По условиям безопасности движения процесс рекуперативного торможения должен отличаться механической устойчивостью, т. е. при увеличении скорости движения поезда тормозной эффект должен автоматически усиливаться, кладя предел опасному увеличению скорости. Тогда генераторное торможение приобретает значительное преимущество перед торможением колодками, при котором с увеличением скорости, вследствие уменьшения коэффициента трения колодок о бандажи, тормозной эффект падает, и машинист, предотвращая опасное нарастание скорости, должен повторно каждый раз особо воздействовать на колодки.

На рис. 3 приведены типы механических характеристик электрических машин в генераторном режиме в осях координат скорости v тормозных усилий B. Кривая I представляет механически неустойчивый режим торможения, кривая II — умеренно устойчивый, кривая III дает образец резко выраженной устойчивости, а кривая IV — устойчивый режим работы до некоторой предельной критической скорости $V_к$.

Кроме механической устойчивости, при рекуперативном торможении в рудничной электровозной тяге очень важно обеспечить электрическую устойчивость. Все изменения рекуперативного тока, вызываемые колебаниями напряжения в линии (а не изменениями уклона пути), должны быть ограничены по возможности узкими пределами. Иначе резкие изменения величины напряжения в шахтных тяговых сетях могут привести к недопустимо большим величинам рекуперативного тока тяговыми двигателями. В нормальном случае величина тока рекуперации изменяется обратно пропорционально напряжению в тяговой сети.

На рис. 4 изображены характеристики генераторов постоянного тока. Линией AB показана величина напряжения сети $U_с$. Для увеличения электрической устойчивости последовательно с двигателями включено постоянное сопротивление $R_п$, поэтому линия напряжения сети принимает положение AB_1. Ток рекуперации I_0 в этом случае определяется общей точкой пересечения линии AB_1 с характеристиками машин. Если, например, напряжение сети понижается на ΔU, то ток рекуперации при тех же тормозных моментах возрастает. Наименьшее приращение I будет иметь противокомпаундная машина.

Из четырех указанных на графике машин сериесная обладает наихудшей электрической устойчивостью. Ток ее рекуперации при падении напряжения сети получает наибольшее приращение. Наилучшая электрическая устойчивость в генераторном режиме присуща противокомпаундной машине. До определенных пределов ослабления магнитного поля она обладает и хорошей механической устойчивостью.

На втором месте по электрической устойчивости стоит шунтовой генератор, однако в механической устойчивости он уступает как противокомпаундной, так и компаундной машинам.

При автоматизированной электровозной откатке совершенно обязательной для тяговых двигателей является механическая устойчивость. Предпочтение должно быть отдано двигателям со смешанным возбуждением при наличии противокомпаундирования в генераторном режиме. Этому условию удовлетворяет двигатель, указанный на рис. 1.

Генераторное торможение будет устойчивым, если изменение напряжения сети не выйдет за допустимые пределы. Чтобы при генераторном торможении напряжение сети чрезмерно не увеличивалось, рекуперируемая энергия должна немедленно потребляться другими электровозами или передаваться через преобразователи в общую сеть переменного тока.

Как известно из практики, при небольшом числе электровозов (на шахтах) рекуперируемая энергия не всегда находит себе потребителя. Коэффициент одновременности работы электровозов с потреблением тока из сети так мал, что время работы электровоза на генераторном режиме не совпадает со временем работы хотя бы одного электровоза на двигательном режиме с потреблением тока. В результате напряжение сети резко возрастает и рекуперация срывается из-за недопустимо большой величины э. д. с. на коллекторе машины.

Таким образом, этот вид торможения становится ненадежным. Тормозной эффект может исчезнуть при высоких скоростях движения, что недопустимо по условиям техники безопасности. С применением рекуперативного торможения на рудничной откатке необходимо на тяговой подстанции иметь специальные балластные реостаты или буферные аккумуляторы, которые могли бы потреблять избытки энергии из тяговой сети.

Если в качестве преобразователей на тяговой подстанции применять двигатель-генераторы или ртутные выпрямители с управляемыми анодными сетками, можно избыток рекуперируемой энергии из тяговой сети передавать также в общую сеть переменного тока.

Третье обязательное условие устойчивого рекуперативного торможения на электровозной откатке связано с наличием подходящих уклонов откаточных путей. Генераторное торможение в зависимости от типа двигателей и схем включения возможно только в строго определенном диапазоне изменения скоростей движения.

При схемах генератор-двигатель рекуперация возможна на любой скорости от максимальной до нулевой. В нашем случае изменение скорости возможно только от пограничной до максимально допустимой. В неавтоматизированных схемах промышленных электровозов для расширения пределов изменения тормозных скоростей движения применяют регулирование величины магнитного поля машин (ослабление поля). Изменением магнитного поля достигается регулирование пограничной скорости движения. При полной автоматизации электровозной откатки вводить в схему дополнительные регулирующие приспособления (реостаты, реле и пр.) вряд ли целесообразно. Они лишь усложнят схему управления и понизят надежность работы механизма.

Таким образом, для автоматизированного электровоза диапазон изменения скорости при генераторном торможении будет ограничен только угловым коэффициентом естественной характеристики тяговых двигателей. При чисто шунтовой характеристике изменение генераторной скорости весьма мало. Генераторное торможение возможно только при скоростях, близких к пограничной, и на уклонах пути, незначительно превышающих самокатный уклон. Все другие уклоны пути, значительно отличающиеся от самокатного, не могут служить источником возврата энергии в сеть.

Как видно из анализа, рассчитывать на значительную экономию энергии от применения рекуперативного торможения нельзя. Усложнять схему управления электровоза для этой цели не рекомендуется. Особенно при автоматизированной электровозной откатке необходимо стремиться к ровному профилю пути с уклонами ровного сопротивления. Генераторное торможение должно использоваться лишь как средство автоматического возникновения тормозного эффекта при скоростях движения, превышающих пограничную скорость, при случайных возникновениях отрицательных статических сопротивлений движению.

Практически не может быть сомнения в том, что для автоматизированной откатки можно настлать путь и поддерживать его при эксплуатации с уклонами, не превышающими $\pm 5‰$, т. е. не превышающими самокатные.

На автоматизированной рудничной электровозной откатке весьма желательным вариантом было бы применение тяговых двигателей на переменном токе. Асинхронные короткозамкнутые двигатели с глубоким пазом или двойной беличьей клеткой обладают хорошими пусковыми свойствами. Они надежно обеспечивают разгон электровоза под нагрузкой. С увеличением нагрузки на двигатели можно получить значительное смягчение скоростных характеристик.

При увеличении скорости выше синхронной асинхронные двигатели автоматически переходят в генераторный режим с устойчивым тормозным моментом. Они вполне могли бы соответствовать требованиям, предъявляемым к приводу автоматизированного электровоза. Кроме того, отпала бы необходимость в специальных преобразователях переменного тока в постоянный (на тяговой подстанции) и регулировании величины напряжения в тяговой сети при пуске двигателей в ход.

Усложняющим моментом в данном случае является необходимость в трехпроводной тяговой сети и соответственно более сложной конструкции токосъемника. Последнее может быть упрощено применением однофазных асинхронных двигателей. Однако конденсаторные однофазные асинхронные двигатели на рудничных электровозах обнаружили ряд конструкционных недостатков. Жесткость скоростной характеристики двигателей ограничивала возможность применения движения электровоза на повышенной скорости (11 *км/час*). Тяжелые условия работы приводили выходу из строя конденсаторов, к снижению надежности работы электровоза.

Параллельно были обнаружены и положительные качества работы конденсаторных электровозов. Жесткая характеристика тяговых двигателей позволяла полнее использовать сцепной вес электровоза, уменьшать пробуксовки колес полускатов. Ценным свойством этих двигателей явилась возможность автоматического перехода на генераторный режим при сверхсинхронной скорости. Кроме того, значительно упростилась конструкция тяговых двигателей и подстанций по сравнению с конструкциями на постоянном токе.

Невозможность использования высокой скорости электровоза из-за жесткости тяговых характеристик связана главным образом с плохим состоянием откаточных путей на шахте. При наличии хорошего состояния откаточных путей для автоматизированной электровозной откатки, когда отсутствуют отрицательные уклоны больше самокатного, кривые с малым радиусом закруглений, большое число стрелочных переводов и маневровая работа электровозов, можно, очевидно, применять двигатели и с жесткой характеристикой. Причем пусковые приспособления для

однофазных двигателей (конденсаторы, индукционные катушки или др.) должны обладать высокой надежностью, безотказностью в работе. Для получения удовлетворительных пусковых свойств тяговых двигателей можно, при наличии дополнительного нерегулируемого омического сопротивления в роторной цепи, допустить перемоторивание электровозов.

Выводы

1. Тяговые характеристики существующих сериесных двигателей для автоматизированного электровоза обладают рядом недостатков. При малых статических сопротивлениях они развивают чрезмерно большие скорости и не позволяют осуществлять плавный автоматический переход в тормозной режим при ограниченной скорости движения.

2. Шунтовые двигатели постоянного тока, обладая весьма жесткой скоростной характеристикой, для автоматизированной электровозной тяги потребовали бы дополнительных весьма сложных пускорегулирующих приспособлений, снижающих надежность действия схемы.

3. Из двигателей постоянного тока наиболее рациональным для автоматизированного электровоза является компаундный с улучшенными скоростными характеристиками. Недостаток компаундных двигателей — размагничивающее действие сериесных обмоток в генераторном режиме — может быть устранен специальными компенсационными обмотками, которые питаются от переменной э. д. с. якоря при искажении магнитного поля под полюсами машины. Компенсационными обмотками при этом может также производиться изменение числа ампервитков шунтовой и сериесной обмоток машины, а следовательно, изменение скоростной характеристики в нужном направлении — придание мягкости при значительных нагрузках и достаточной устойчивости скорости при уменьшении нагрузок.

4. Из двигателей переменного тока для автоматизированной электровозной откатки может быть рассмотрен вариант применения асинхронных однофазных короткозамкнутых двигателей с сильно смягченной характеристикой с помощью постоянного включенного омического сопротивления в роторную цепь. При этом должны быть предусмотрены надежные приспособления для пуска двигателей в ход.

Литература

1. Рысьев А. В. Проблемы автоматизации рудничной электровозной откатки. Записки Ленинградского горного института, 1955, т. XXXII, вып. I.

2. Янсон О. М. К вопросу электромагнитного способа улучшения условий сцепления колес электровоза с рельсами. Записки Ленинградского горного института, 1955, т. XXXII, вып. I.