

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ

Особенностью работы тяговой сети является непрерывное изменение значения нагрузки и места ее приложения. ЭПС движется с разной скоростью по участку ЭЖД, имеющему переменный план и профиль пути. Такой характер нагрузки вызывает непрерывные изменения падения напряжения в системе электроснабжения, подстанциях и тяговой сети. Падение напряжения определяется значением нагрузок и расположением их между подстанциями. Изменение падения напряжения, а следовательно, и напряжения на токоприемниках движущихся ЭПС и на его тяговых двигателях вызывают изменение режима движения поезда при тяге и рекуперации.

Т.о. на условия работы ЭПС существенно сказывается режим работы системы электроснабжения и, наоборот, работа каждого ЭПС влияет на режим работы системы электроснабжения и соседние ЭПС. Поэтому работу отдельных локомотивов нельзя рассматривать изолировано от системы электроснабжения и друг от друга.

Отклонения и колебания напряжения. Одним из основных показателей качества электроэнергии, получаемой ЭПС, является уровень напряжения, от которого зависит скорость движения поездов. Под отклонениями напряжения понимают изменение его такой длительности, которые приводят к изменению скорости движения поездов. *Отклонение напряжения* представляет собой разность между фактическим и номинальным напряжением на токоприемнике. *Колебания напряжения* – это изменение его на короткий срок, за который скорость движения измениться не успевают.

Диаграмма изменения напряжения в тяговой сети. Напряжение х.х. на шинах тяговой подстанции устанавливается в том случае, когда тяговая нагрузка ее равна нулю. При увеличении нагрузки напряжение на шинах ТП будет падать. Эта зависимость напряжения от нагрузки называется внешней характеристикой подстанции.

Если предположить, что при отсутствии нагрузок напряжение х.х. на шинах всех ТП будет одинаковым и равным U_0 , то в какой-то момент времени, когда на линии находятся поезда, изменение напряжения вдоль тяговой сети будет иметь вид, показанный на **рис.5.1,а**. Как видно из диаграмм, напряжение на тяговых подстанциях при движении поездов по участку становится ниже напряжения х.х. U_0 . Это снижение будет тем значительнее, чем больше нагружена подстанция. Непосредственно у поезда напряжение дополнительно уменьшается из-за потерь в тяговой сети.

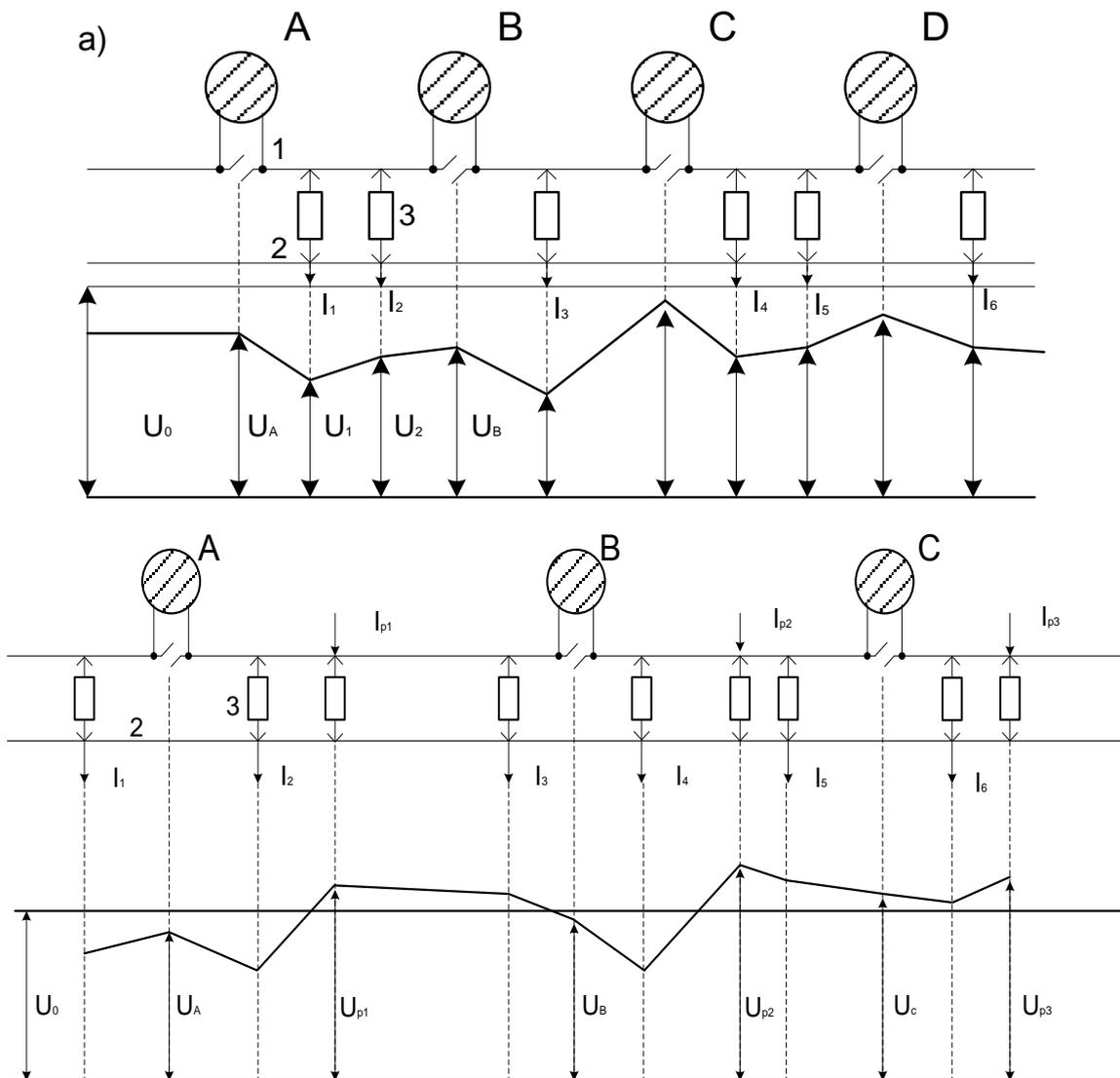


Рисунок 5.1 - Схемы и диаграммы изменения напряжения вдоль электрифицированного участка при отсутствии рекуперации (а) и при рекуперации (б):

А,В,С,Д – тяговые подстанции; U_0 – напряжение холостого хода подстанции; $I_1 – I_6$ – токи электровозов в режиме тяги; U_A, U_B, U_C – напряжение на тяговых подстанциях А,В и С; U_1, U_2 – напряжение на электровозах; 1 - контактная сеть; 2 - рельсы; 3-электровоз;
 I_{p1}, I_{p2}, I_{p3} - токи рекуперирующих электровозов;
 U_{p1}, U_{p2}, U_{p3} - напряжение на рекуперирующих электровозах

Если отдельные электровозы работают в режиме рекуперативного торможения, то при постоянном токе напряжение в тяговой сети в месте расположения рекуперирующего поезда и на шинах некоторых ТП может превышать напряжение х.х. U_0 (рис.5.1,б). Из приведенных диаграмм видно, что напряжение у локомотива зависит от . напряжения х.х. U_0 тяговой подстанции и потерь

напряжения в тяговой сети. Напряжение х.х.тяговой подстанции постоянного тока нетрудно определить по номинальному напряжению и по эквивалентному сопротивлению подстанции (сопротивлению самой подстанции и системы внешнего электроснабжения). Для этого к номинальному напряжению надо добавить произведение эквивалентного сопротивления на номинальный ток ТП.

Номинальные напряжения на шинах тяговых подстанций. Для ЭЖД эти напряжения регламентируются стандартом. На участках постоянного и переменного тока номинальные напряжения определяются по-разному. Для постоянного тока номинальное напряжение – это среднее значение выпрямленного напряжения при номинальных значениях выпрямленного тока и напряжений электрической сети, питающей тяговую подстанцию (без применения регулирования в преобразователе). Это значение принято равным 3,3 кВ.

Для дорог переменного тока номинальным напряжением на шинах тяговых подстанций считают напряжение на выводах тяговой обмотки тр-ра подстанции при холостом ходе и номинальном напряжении на выводах его первичной обмотки. Это напряжение принято равным 27,5 кВ.

Номинально напряжение на токоприемнике ЭПС также нормировано. Для системы постоянного тока оно принято равным 3 кВ, для переменного тока – 25 кВ.

Условия работы ЭЖД таковы, что напряжение на токоприемнике локомотива поезда изменяются сравнительно в больших пределах за счет изменения потери напряжения в устройствах электроснабжения. Поэтому предусмотрены нормы, ограничивающие эти нормы.

Нормы минимальных и максимальных напряжений. В соответствии с ПТЭ напряжение на токоприемнике ЭПС на любом перегоне или блок-участке не должно быть ниже 2,7 кВ при постоянном токе и 21 кВ при переменном токе. Эти нормы относятся к среднему значению напряжения за время потребления поездом энергии на перегоне или блок-участке.

Исходя из требований надежности работы ЭПС переменного тока в целях обеспечения устойчивости работы вспомогательных устройств стандартом установлено, что минимальное напряжение на токоприемнике при всех эксплуатационных условиях не должно быть ниже 19 кВ. Установлены следующие значения максимальных напряжений на токоприемнике ЭПС: для дорог постоянного тока без применения рекуперативного торможения = 3,85 кВ, 4 кВ – для тех участков, на которых используется рекуперативное торможение, 29 кВ – для переменного тока.

Режим напряжения в тяговой сети. Напряжение на токоприемнике является основным фактором, определяющим работу ЭПС и его скорость. По скорости движения устанавливают время занятия лимитирующего перегона и наименьший интервал между поездами, т.е пропускную способность перегона.

Толчки тока и тягового усилия, вызываемые резкими изменениями напряжения на токоприемнике ЭПС при тяге и рекуперативном торможении, очень опасны, т.к. могут вызвать нарушение нормальной работы тяговых двигателей, боксование, обрыв автосцепки при следовании поезда в тяговом режиме или колебание тормозного момента и срыв торможения при рекуперации.

Преодоление инерционных подъемов, т.е подъемов больше руководящего, при электрической тяге зависит не только от параметров электровоза и веса поезда, но в большей степени и от режима напряжения тяговой сети при движении поезда. Иногда подъем, к-й не явл руководящим при одном режиме напряжения, может оказаться руководящим при другом режиме.

Объем энергией между электровозами, находящимися в режиме тяги и в режиме рекуперативного торможения, и возврат в первичную сеть избыточной энергии рекуперации определяется режимом напряжения. От уровня напряжения зависит возможность рекуперативного торможения. Нагревание тяговых двигателей во многом определяет устойчивость работы и надежность эксплуатации ЭПС, а также обеспечение установленных весов поездов. Условия нагревания и охлаждения тяговых двигателей также зависят от режима напряжения.

Влияние уровня напряжения на условия движения поезда. Рассмотрим случай снижения напряжения до U_2 . Предположим, что электровоз при напряжении U_1 двигателя постоянного тока следует с установившейся скоростью ϑ_1 и силой тяги F_1 при потребляемом токе I_1 (рис. 5.2). Такому режиму соотв точки a_1 на кривой скорости $\vartheta(I)$ и v_1 на кривой силы тяги $F(I)$. Если при этом режиме движения напряжение на токоприемнике снизится до U_2 , то в первый момент времени из-за большой массы поезда скорость его не изменится, ток и сила тяги упадут соответственно до I_2 и F_2 . Рабочими точками теперь будут a_2 на скоростной характеристике при напряжении U_2 и v_2 на характеристике силы тяги. Если профиль пути, по которому движется поезд, не изменяется, а пониженное напряжение сохраняется, то сила тяги будет меньше сопротивления движению. Это замедлит скорость поезда. Со снижением скорости движения растет сила тяги и несколько уменьшается сопротивление движению. Процесс продолжается до тех пор, пока не наступит равновесие, т.е. равенство силы тяги и сопротивления движению. Ток двигателей при движении поезда с установившейся

скоростью по одному и тому же профилю пути почти не зависит от напряжения.

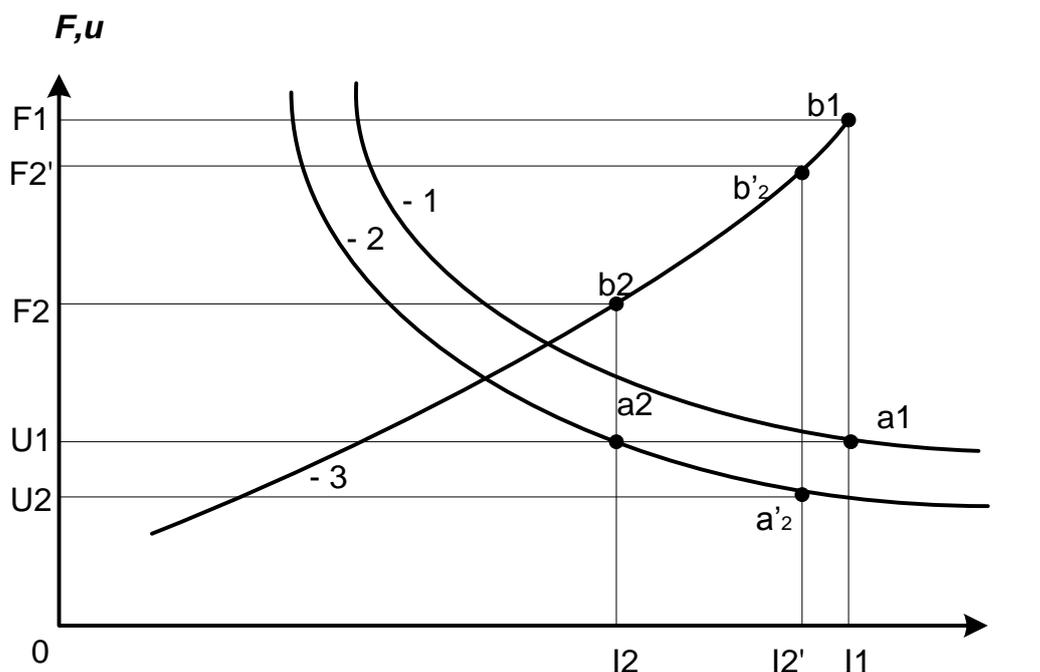


Рис.5.2 Характеристики электровоза с тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения для разных напряжений:

1,2 – кривые зависимости $v(I)$ соответственно при напряжениях U_1 и U_2 ; 3 – кривая зависимости $F(I)$

Если напряжение вновь поднимется до U_1 , то описанные процессы будут происходить в обратном порядке. В первый момент скорость v_2 не изменится, а сила тяги и ток резко возрастут. Толчок тока будет больше в тех случаях, когда изменение напряжения произошло в момент потребления электровозом большого тока, т.е. при более тяжелых условиях работы (пологая часть характеристики). Найденное по кривой (рис. 3) приращение тока будет соответствовать моменту времени после затухания электрических переходных процессов. Действительное значение броска тока будет значительно выше из-за того, что при неустановившемся режиме в частях магнитопровода двигателя возникают вихревые токи, которые задерживают изменение магнитного потока.

ЭДС двигателя при увеличении напряжения в сети вначале не меняется, т.к. скорость электровоза остается практически той же. Т.о. бросок напряжения в начальный период уравнивается только увеличением падения напряжения в сопротивлениях и ЭДС самоиндукции.

Все изложенное относится к электротяге на постоянном токе. Качественно картина не меняется при тяге на переменном токе с выпрямительными электровозами.

Влияние уровня напряжения на условия движения по инерционному подъему. Режим напряжения существенно отражается на условиях движения поезда по подъемам пути. Масса состава определяется возможностью движения поезда по руководящему подъему. На таком подъеме скорость поезда достигает установившегося значения при наибольшей допустимой силе тяги. При входе поезда на подъем скорость поезда снижается, а сила тяги и ток возрастают. По мере подъема поезда его кинетическая энергия переходит в потенциальную. Если скорость при входе на подъем соответствовала начальной v_n , и снизилась до какой-то конечной v_k , то часть кинетической энергии поезда, использованная при движении по подъему,

$$\Delta W_k = 0,5 M(v_n^2 - v_k^2),$$

где M – приведенная масса поезда.

Чем ниже конечная скорость v_k , тем больше может быть использована кинетическая энергия при неизменной начальной скорости v_n . В эксплуатации не следует допускать, чтобы при движении поезда на подъеме скорость v_k была ниже значения, соответствующего наибольшей допустимой силе тяги F_k , например, по сцеплению. В тех случаях, когда скорость поезда станет ниже допустимой, локомотив начнет боксовать, так как сила тяги превзойдет силу сцепления.

Если поезд полной массы входит на руководящий подъем, то установившаяся скорость будет равна $v_{k \min}$, т.к. именно из этого условия выбирают массу состава. На руководящем подъеме после снижения скорости до $v_{k \min}$ поезд продолжает движение с максимально допустимой по сцеплению силой тяги. Если поезд входит на затяжной подъем, крутизна которого меньше крутизны руководящего подъема, то установившаяся на нем скорость будет выше $v_{k \min}$, а сила тяги меньше максимально допустимой.

Следовательно, подъем любой длины, если он по крутизне меньше или равен руководящему, всегда может быть пройден без ограничения по сцеплению. Ограничение может быть только по нагреву тяговых двигателей локомотива.

Обычно на участке пути имеются более крутые и короткие подъемы, чем руководящие. Они преодолеваются за счет кинетической энергии, накопленной поездом перед подъемом, поэтому такие подъемы наз *инерционными*. Инерционные подъемы могут быть пройдены поездом только при условии, что длина их сравнительно невелика и скорость движения не успеет снизиться до $v_{k \min}$. Если

поезд войдет на инерционный подъем с невысокой скоростью, т.е. будет иметь недостаточную кинетическую энергию, то он не преодолеет подъема и остановится. А остановившись на таком подъеме, электровоз не сможет тронуть с места весь состав, и машинист будет вынужден просить резерв или вывозить состав по частям.

Изменение напряжения на участке перед подъемом оказывает сильное влияние на возможность преодоления подъема за счет запаса кинетической энергии, в то время как снижение напряжения в тяговой сети на самом подъеме при неизменной скорости в начале его часто не оказывает существенного влияния на возможность прохода подъема.

Т.о. на разгонных участках перед инерционным подъемом желательно поддерживать в пределах допустимого более высокое напряжение, чтобы предотвратить остановку поезда на подъеме.

Выше допускалось, что напряжение в тяговой сети при движении по подъему остается неизменным. В действительности это напряжение непрерывно изменяется в зависимости от местонахождения поезда на подъеме, а так же из-за увеличения тока, потребляемого локомотивом при снижении скорости поезда, движущегося по подъему. Характер изменения напряжения на токоприемнике локомотива может быть различным и зависит от взаимного расположения и режима работы других ЭПС, расстояния поезда до смежных тяговых подстанций и начальной скорости поезда при входе на подъем.

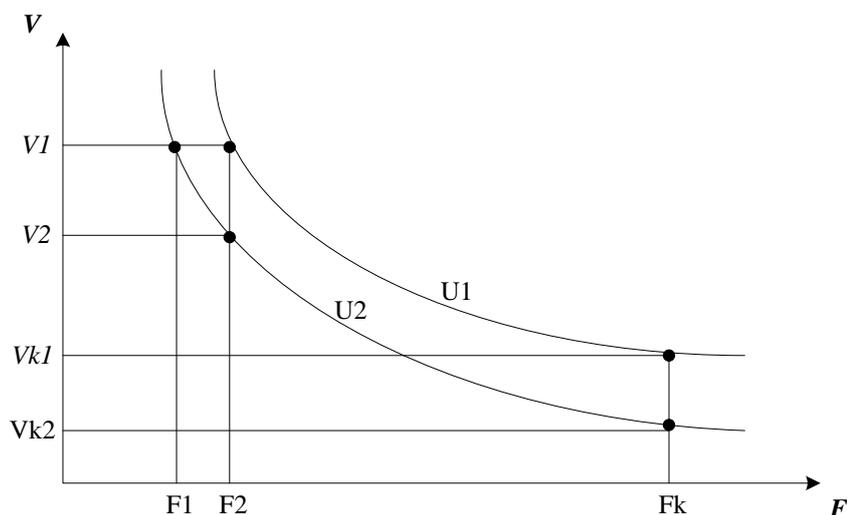


Рис. 5.3. Характеристики электровоза при напряжениях U_1 и U_2

Влияние напряжения на пропускную способность дороги. Большой интерес представляет время прохода поезда по отдельным перегонам и блок-участкам, к-е зависят от его средней скорости.

На электровозах переменного тока поддерживать напряжение на тяговых двигателях в необходимых пределах при длительных изменениях в тяговой сети можно переключением числа витков электровозного трансформатора, если при нормальном напряжении высшие ступени не используют. На электровозах постоянного тока такой возможности нет.

При тяговых расчетах задаются некоторым условным напряжением, т.е. не учитывают, что в эксплуатации тяговые двигатели работают при непрерывно изменяющемся напряжении в тяговой сети. Следовательно, полученные в результате расчета время хода поезда и средние скорости его движения по перегону не могут соответствовать действительному режиму напряжения в тяговой сети и являются поэтому условными.

Рассмотрим работу ЭПС при двух разных напряжениях, условно приняв, что напряжение не изменяется во времени. Средняя скорость движения поезда при одинаковом режиме ведения его по перегону будет тем меньше, чем ниже напряжение. При этом необходимо учитывать, что уровень напряжения в тяговой сети оказывает влияние на скорость движения поезда только в тот период, когда электровоз идет под током при соответствующем режиме ведения поезда.

Для оценки влияния напряжения в тяговой сети на скорость движения поезда рассмотрим диаграммы скорости поезда при неизменном профиле пути (рис.5.4). Кривая 1 соответствует движению с более высоким напряжением. Все время движения поезда разбито на следующие периоды: пуск, движение по автоматической характеристике, выбег и торможение. При пуске до выхода на автоматическую характеристику скорость поезда не зависит от напряжения в тяговой сети, т.к. на двигателях напряжение регулируется автоматически или машинистом. Напряжение в тяговой сети также не влияет на скорость движения поезда во время выбега и торможения при соответствующем изменении режима его ведения.

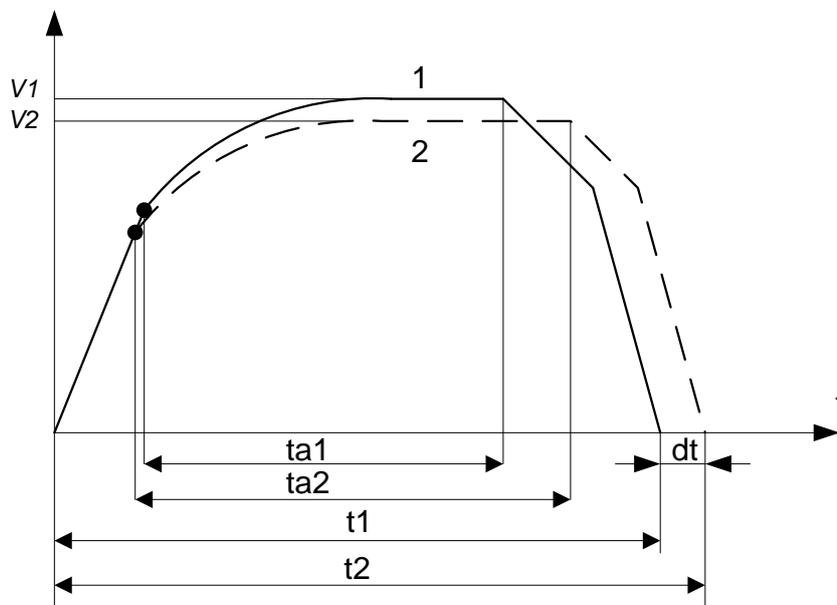


Рис. 5.4. Диаграмма изменения скорости движения поезда для двух значений напряжения

Следовательно, скорость зависит от напряжения в течение времени хода поезда по автоматической характеристике (когда скорость установилась), скорость пропорциональна напряжению.

Для практических расчетов принимают, что скорость пропорциональна времени хода поезда по автоматической характеристике, а само это время обратно пропорционально напряжению.

Усредняют напряжение только за то время, в течение которого напряжение сказывается на скорости. Приняв приблизительно это время t_{a1} , необходимо рассчитать U_{cp} именно за этот промежуток времени. Среднее напряжение U_{cp} на токоприемнике электровоза за время t_{a1} можно найти, зная напряжение х.х. тяговой подстанции U_0 , также средние потери напряжения в преобразователях подстанции $\Delta U_{п ср}$ и в тяговой сети от подстанции до поезда $\Delta U_{тс ср}$ за то же время. Следовательно,

$$U_{cp} = U_0 - \Delta U_{п ср} - \Delta U_{тс ср}.$$

Изменение напряжения непосредственно отражается на скорости движения поездов и, следовательно, на пропускной способности перегонов. Наименьший межпоездной интервал определяется временем занятия перегона при полуавтоматической блокировке или группы блок-участков – при автоблокировке. Пусть этот интервал при напряжении U_1 равен θ_1 . При напряжении U_{cp} интервал

$$\theta_2 = \theta_1 + \left(\frac{U_1}{U_{cp}} - 1 \right) t_{a1}. \quad (1)$$

Перегонная пропускная способность за некоторый расчетный период времени T (час или сутки) при напряжении U_1 определяется числом поездов

$$N_{01} = T / \theta_1.$$

При напряжении U_{cp} пропускная способность

$$N_{02} = T / \theta_2.$$

Общий принцип корректировки пропускной способности по уравнению (1) для однопутных участков с двусторонним движением остается тем же, но расчеты усложняются из-за необходимости учета графика как при расчете пропускной способности, так и при определении среднего напряжения в тяговой сети.

Для определения точного времени хода поезда необходимо проводить тяговые расчеты с учетом изменяющегося напряжения в тяговой сети.

а алгоритма, моделирующего на ЭВМ движение поездов с учетом взаимодействия их с системой электроснабжения:

1, 2, 3, 4, 5, и 6 – блоки алгоритма

Напряжение на токоприемнике поезда зависит не только от потребляемого им тока, но и от токов других поездов и их расположения в фидерной зоне. Все эти величины непрерывно изменяются.

Точное решение этой задачи возможно только с помощью метода, позволяющего учитывать влияние нагрузок всех поездов, одновременно следующих по рассматриваемому участку, на потери напряжения в тяговой сети и на подстанциях. Напряжение же на шинах тяговых подстанций меняется в зависимости от тяговой нагрузки и отклонений, вызываемых в питающей системе рядом причин. Такой метод может быть реализован только с помощью ЭВМ. Для рассмотрения основных зависимостей применяется менее точный, но более простой способ. Определяется поперегонное время хода с учетом действительного режима напряжения, необходимое для построения графика движения. Все время хода поезда складывается из времени пуска и разгона поезда по автоматической характеристике t_1 , движения с установившейся скоростью t_2 , времени на выбег t_3 и на торможение t_4 .

Частота вращения якоря двигателя в процессе пуска не зависит от напряжения сети у токоприемника, но при меньшем напряжении поезд выходит на автоматическую характеристику при меньшей скорости. За время t_2 отношение скоростей все время остается постоянным и равным отношению напряжений.

В практических условиях, незначительно изменив режим ведения поезда, можно независимо от значения напряжения выйти на те же кривые скорости при выбеге и торможении. Для этого, очевидно, следует только пройти в тяговом режиме при низшем напряжении большие участки пути, чем при высшем напряжении.

Если учесть, что разгон поезда по автоматической характеристике происходит в течение относительно малого времени, то можно считать практически зависящей от напряжения и пропорциональной ему только скорость движения по автоматической характеристике, т.е. при потреблении им энергии, за исключением периода пуска.

Обозначив через t_1 общее время хода поезда в тяговом режиме при напряжении U_1 , а t_2 – то же при напряжении U_2 (при этом $U_1 > U_2$) и t_n – время пуска поезда, можем записать

$$(t'_{t_2} - t_n) / (t'_{t_1} - t_n) = \frac{U_1}{U_2}.$$

Так как время хода поездов по автоматической характеристике на одних и тех же участках пути при двух разных напряжениях обратно пропорционально скоростям, соответствующим этим напряжениям. Обозначим $t'_{t_1} - t_0$ через t_{T1} и $t'_{t_2} - t_0$ через t_{T2} , можем определить

$$t_{T2} = t_{T1} \cdot \frac{U_1}{U_2}.$$

В действительных условиях работы электрического локомотива на участке напряжение на его токоприемнике не остается постоянным, колеблется; следовательно, для возможности практического применения выражения его следует в несколько ином виде, учесть изменение напряжения у движущегося поезда. Если бы между скоростью и непрерывно изменяющимся напряжением существовала линейная зависимость, то средняя скорость по участку и, следовательно, время его прохода определялись бы средним значением напряжения. Однако изменение скорости поезда из-за наличия сил инерции отстает от изменения напряжения.

При колеблющемся напряжении всегда чередуются спады и подъемы напряжения. Следовательно, будут отставания как в росте, так и в снижении скорости, вызываемые указанными изменениями напряжения. Поэтому, если считать, что скорость не связана с какими-либо ограничениями, то можно допустить возможность достаточной взаимной компенсации между задержками роста и понижения скоростей и считать среднюю скорость линейно связанной со средним напряжением у электровоза за время потребления им энергии (исключая время пуска).

Тогда действительное время хода по рассматриваемому участку

$$t_n = (t - t_T) + t_T \cdot \frac{U_p}{U_T}.$$

где t - расчетное время хода поезда по рассматриваемому участку пути (из тяговых расчетов)

t_t - расчетное время хода поезда по тому же участку в тяговом режиме, исключая время пуска;

U_p - расчетное напряжение (принятое в тяговых расчетах);

U_t - действительное среднее напряжение в сети у поезда за время t ,

Среднее напряжение в сети у поезда за время хода по участку в тяговом режиме (исключая время пуска)

$$U_t = U_0 - \Delta U_0 - \Delta U_m - \Delta U_{kc},$$

где U_0 - напряжение холостого хода на шинах постоянного тока тяговых подстанций;

ΔU_0 - среднее значение отклонения напряжения на вводах тяговой подстанции от нормального значения, отнесенное к шинам постоянного тока (положительное или отрицательное), не зависящее от тяговой нагрузки;

ΔU_T - среднее понижение напряжения на шинах постоянного тока тяговых подстанций, вызванное тяговой нагрузкой;

ΔU_{kc} - средняя потеря напряжения в проводах контактной сети и рельсовой цепи от шин подстанции до поезда.

Все средние величины напряжения должны быть определены за соответствующее время T .

При определении перегонной пропускной способности N_0 для параллельного графика движения необходимо учесть действительное напряжение

$$N_0 = \frac{T}{t_0 + t_{ch}},$$

где N_0 - максимальное число поездов, которое может быть пропущено по участку за время T (сутки, часть суток);

t_0 - время хода поезда по ограничивающему перегону, определенное с учетом действительного уровня напряжения;

t_{ch} - минимальное допустимое время между уходом одного поезда с ограничивающего перегона и выходом следующего за этот перегон.

Если рассматривается двустороннее движение с различным временем хода поездов различных направлений по ограничивающему перегону, то расчет пропускной способности делается в парах поездов; тогда t_0 - сумма времени хода пары поездов противоположных направлений и t_{ch} - время для пары поездов. Если имеются в виду пакетные или частично пакетные графики движения, то влияние

напряжения на пропускную способность может измениться, что должно учитываться при определении времени хода по ограничивающему перегону.

При выпрямительных электровозах скорость движения зависит не только от параметров системы электроснабжения, но и от параметров самого электровоза. Для определения действительного времени хода электровоза может быть использована формула, так как при построении на его токоприемнике учитывается потеря скорости, вызванная потерей напряжения в его цепи (в выпрямительном устройстве).

Согласно проведенным исследованиям о возможности регулирования напряжения на трансформаторе электровоза (применительно к электровозам, имеющим двухпериодный выпрямитель) понижение напряжения в тяговой сети может быть компенсировано уменьшением коэффициента трансформации электровозного трансформатора только в определенных пределах.

Как и при постоянном токе, можно считать, что ток, потребляемый тяговыми двигателями электровозов с выпрямителями, в одинаковых условиях продольного профиля остается почти постоянным, т.е. с изменением скорости сопротивление движению изменяется незначительно.

При таких условиях уменьшение коэффициента трансформации на электровозе повышает напряжение на тяговых двигателях и скорость движения до некоторого определенного значения, при котором достигает максимум мощности, передаваемой тяговыми двигателями. Попытка повысить напряжение на тяговых двигателях и, следовательно, потребляемую ими мощность сверх этих пределов приводит к обратным результатам, т.е. к понижению напряжения на двигателях. Это явление объясняется увеличением потерь напряжения, вызванным увеличением тока в первичной обмотке электровозного трансформатора, в тяговой сети в трансформаторе подстанции, кроме того, уменьшением коэффициента мощности.

Известно, что уменьшение коэффициента трансформации трансформатора электровоза для компенсации потерь напряжения в тяговой сети дает эффект только при небольших токах, потребляемых локомотивом, и в пределах не более 10-15 % номинального напряжения. Кроме того, уменьшение коэффициента трансформации на данном электровозе для поддержания его скорости ведет к повышению тока в тяговой сети и трансформаторе подстанции и увеличению потерь напряжения, т.е. к уменьшению скорости других электровозов. К недостаткам регулирования скорости снижением коэффициента трансформации относится также и то, что отключение

других электровозов может вызвать резкое увеличение напряжения на двигателях данного электровоза.

Режим напряжения при рекуперативном торможении поезда. В режиме рекуперативного торможения электровоз становится не потребителем, а генератором эл энергии. Энергия, вырабатываемая его электрическими двигателями, может потребляться другими поездами, находящимися в режиме тяги. Если таких поездов недостаточно, то избыточная часть этой энергии при тяге на переменном токе передается через тяговые подстанции и первичную сеть другим приемникам электрической энергии. При тяге на постоянном токе для приема этой части энергии предусматривают специальные приемники избыточной энергии рекуперации. В качестве таких приемников можно использовать инверторные агрегаты, устанавливаемые на тяговых подстанция, или балластные резисторы, которые могут быть расположены как на ТП, так и на линии. Первые преобразуют постоянный ток в переменный и передают эл энергию в первичную сеть, а вторые – поглощают электроэнергию, преобразуя ее в тепловую и рассеивая.

Рассмотрим случай одностороннего питания тяговой сети от тяговой подстанции, на которой расположен приемник избыточной энергии рекуперации. На схеме (рис. 5.6) показаны 2 электровоза - один в режиме тяги потребляет ток I_T , а другой – в режиме рекуперации отдает в сеть ток I_p .

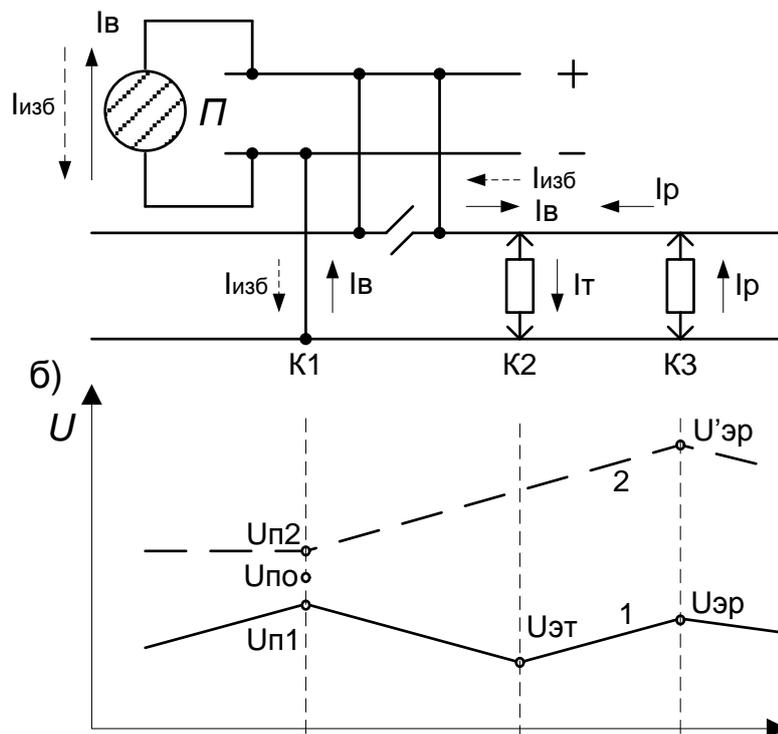


Рис. 5.6. Схема расположения нагрузок (а) и диаграмма изменения напряжения (б) в тяговой сети при рекуперативном торможении

Если $I_T > I_p$, то тяговая подстанция работает в выпрямительном режиме. Направление тока подстанции в этом случае показано сплошной линией. Ток подстанции при этом равен

$$I_B = I_T - I_p .$$

При токе рекуперации большем, чем ток тяги ($I_T < I_p$) на подстанции включается приемник избыточной энергии рекуперации. Избыточный ток рекуперации равен

$$I_{изб} = I_p - I_T .$$

Направление $I_{изб}$ на рис. 5.6 показано штриховой линией.

Диаграмма 1 напряжения в тяговой сети соответствует случаю $I_T > I_p$. Подстанция работает в выпрямительном режиме и дает в сеть ток I_B . Этот ток вызывает снижение напряжения на шинах подстанции до $U_{п1}$ (точка $K1$). Если бы ток подстанции был равен нулю, то на шинах подстанции поддерживалось бы напряжение х.х. $U_{по}$. Ток I_B , протекающий по участку тяговой сети $K1 - K2$, вызывает в ней потерю напряжения. В результате в точке $K2$ у электровоза, находящегося в тяговом режиме, напряжение снижается до $U_{эт}$. На участке $K2 - K3$ напряжение повышается и достигает значения $U_{эр}$ в точке $K3$

$$U_{эр} - U_{эт} = R_{K2-K3} I_p$$

где R_{K2-K3} - сопротивление тяговой сети на участке $K2 - K3$.

Рассмотрим более тяжелый случай с точки зрения обеспечения рекуперативного торможения, когда в рассматриваемой зоне электровозов в режиме тяги нет. Диаграмма напряжений при этом будет иметь вид, показанный кривой 2. Подстанция работает в режиме приема избыточной энергии рекуперации. Напряжение на ее шинах в этом режиме выше напряжения х.х. и равно $U_{п2}$. Для того, чтобы ток шел от электровоза в сеть и далее к приемнику избыточной энергии рекуперации, напряжение у электровоза $U'_{эр}$ должно быть больше $U_{п2}$ на значение потери напряжения в контактной сети $R_{K1-K3} I_p$ (R_{K1-K3} - сопротивление участка $K1 - K3$ тяговой сети), т.е.

$$U'_{эр} - U_{п2} = R_{K1-K3} I_p ,$$

откуда

$$I_p = \frac{U'_{эр} - U_{п2}}{R_{K1-K3}} \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что при определенном значении R_{K1-K3} ток рекуперации зависит от напряжения на токоприемнике

электровоза $U'_{эр}$ и на шинах подстанции. Напряжение на шинах подстанции $U_{п2}$ зависит от внешней характеристики приемника избыточной энергии рекуперации. Напряжение $U'_{эр}$ может регулировать машинист, выбирая ту или иную позицию контроллера. однако оно не должно превышать наибольшего допустимого значения $U_{э\ max}$. Наибольшее значение тока рекуперации в рассматриваемом случае

$$I_{р\ max} = \frac{U_{э\ max} - U_{п2}}{R_{к1-к3}} \quad (2)$$

Выражение (2) наглядно свидетельствует об ограничениях по режиму напряжения на использование рекуперативного торможения. Это ограничение существенно в тех случаях, когда необходимый для рекуперативного торможения ток $I_{р}$ больше $I_{р\ max}$, определяемого из выражения (2). В этом случае необходимо принять меры для повышения $I_{р\ max}$, до необходимого тока рекуперации $I_{р}$. Для этого необходимо снизить напряжение $U_{п2}$ за счет соответствующего изменения внешней характеристики приемника избыточной энергии рекуперации, либо уменьшить сопротивление $R_{к1-к3}$. В отдельных случаях наиболее целесообразно приблизить приемник избыточной энергии к месту рекуперативного торможения. Если же ток $I_{р\ max}$, больше необходимого по условиям торможения, то система электроснабжения не накладывает ограничения на рекуперативное торможение.

Обычно приемник избыточной энергии рекуперации имеет несколько ступеней (рис. 5.7) и может работать на различных характеристиках. Напряжение включения первой ступени U_1 выбирают так, чтобы для ее включения достаточно было поднять напряжение на электровозе не выше допустимого. При этом желательно напряжение U_1 иметь возможно выше, что позволит передавать энергию от рекуперирующего электровоза на большие расстояния более удаленным электровозам, находящимся в режиме тяги. Это снизит избыточную энергию рекуперации, позволит уменьшить число ее приемников и их установленную мощность.

Если при работе на какой-либо ступени ток рекуперации уменьшается, то снижается и напряжение на шинах приемника избыточной энергии. Большое снижение этого напряжения относительно напряжения х.х. $U_{ов}$ недопустимо, т.к. в этом случае на резистор будет работать не только рекуперирующий электровоз, но и выпрямители подстанции. Поэтому отключение ступени регулируют на напряжение, немного меньшее $U_{ов}$, допуская параллельную работу рекуперирующего электровоза и выпрямителей при небольших токах, что обеспечивает плавный переход с одной ступени на другую при их отключении.

Все изложенное относится к линиям, электрифицированным на постоянном токе. На ЭЖД переменного тока нет необходимости предусматривать специальные приемники избыточной энергии, т.к. энергия переменного тока может передаваться через тр-ры ТП в обоих направлениях.

Важно отметить, что при рекуперативном торможении электровоз переменного тока работает в инверторном режиме и является генератором активной мощности, но, как и в режиме тяги, остается потребителем реактивной мощности. За счет потребления реактивной мощности напряжение на токоприемнике электровоза снижается. В связи с этим может получиться, что у токоприемника рекуперирующего электровоза напряжение будет ниже, чем на подстанции.

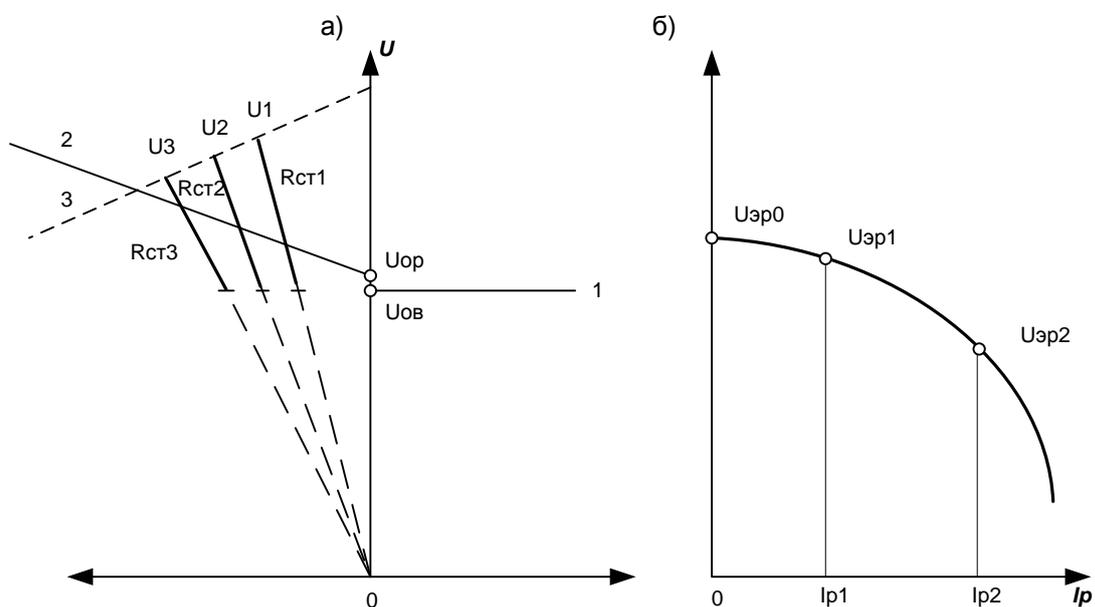


Рис. 5.7. Внешние характеристики тяговой подстанции при различных приемниках избыточной энергии рекуперации (а) и электровоза в режиме рекуперации при неизменной скорости движения (б)