

# АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ МОТОРВАГОННЫХ ПОЕЗДОВ

*Кулагин Дмитрий Александрович*

*Андреенко Петр Дмитриевич*

## **Введение**

Вождение машинистом моторвагонного электротранспорта имеет ряд специфических особенностей. Они определяются тем, что на моторвагонной тяге осуществляются в основном пригородные перевозки, для которых характерны частые остановки при высокой плотности движения. В таких условиях моторвагонный подвижной состав должен реализовывать высокие значения разгонного и тормозного ускорений. Вследствие этого моторвагонным поездам присущи более высокие значения мощности на единицу массы поезда. Кроме того, большие скорости движения на коротких перегонах ставят задачу осуществления начала торможения из больших начальных значений скорости движения [15]. Поэтому принципы вождения моторвагонного электротранспорта отличаются от принципов, заложенных в основе формирования рациональных режимов движения поездов с локомотивами. Следует отметить, что данные принципы существенно отличаются даже внутри отдельных групп по видам тяги в зависимости от веса поезда, его типа, особенностей груза и других факторов [16].

На электровозах 77-82% электроэнергии, которая потребляется, идет на преодоление сопротивления движению поезда, а пусковые и тормозные потери энергии составляют лишь 5-8%. Однако, на моторвагонном подвижном составе до 75% электроэнергии тратится на пусковые и тормозные процессы [16]. Современный выпускаемый моторвагонный электротранспорт в большинстве имеет тяговые асинхронные двигатели переменного тока, что позволяет несколько уменьшить общие потери электроэнергии за счет применения для построения тяговой электропередачи узлов с более высоким коэффициентом полезного действия.

Режим вождения поезда выбирается в соответствии с расписанием движения и условиями, которые характеризуют определенные тягово-энергетические показатели. От правильно выбранного режима управления тяговой электропередачей зависит режим вождения поезда и, соответственно, расход первичного энергоносителя [15], а так же условия работы элементов тяговой электропередачи. Поэтому выбор рационального автоматического способа управления тяговой электропередачей является актуальной задачей как с точки зрения экономии энергоресурсов так и с точки зрения оптимизации принципов, закладываемых при построении систем автовождения поездов.

### **1. Определение рациональных подходов к вождению моторвагонных поездов по наклонным элементам профиля железнодорожного пути**

Режим вождения моторвагонного электротранспорта можно разделить на определенные фазы:

- разгон;
- установившееся движение;
- движение в режиме выбега;
- торможение;
- стоянка.

Данные режимы можно проиллюстрировать обобщенной диаграммой движения моторвагонного электротранспорта, которая приведена на рис. 1.

На рис. 1 показаны следующие фазы движения:

- на этапе 1, который относится к режиму разгона и является пусковым этапом, за промежуток времени от 0 до  $t_1$ , поезд набирает скорость до величины  $v_n$ ;
- на этапе 2, за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$ , поезд набирает скорость до величины скорости установившегося движения  $v_y$ ;
- на этапе 3, в течении промежутка времени от  $t_2$  до  $t_3$ , поезд движется с постоянной скоростью установившегося движения  $v_y$ ;

- на этапе 4, за промежуток времени от  $t_3$  до  $t_4$ , поезд движется в режиме выбега. При этом скорость поезда уменьшается до величины  $v_2$ ;

- на этапе 5 поезд, за промежуток времени от  $t_4$  до  $t_5$ , полностью останавливается.

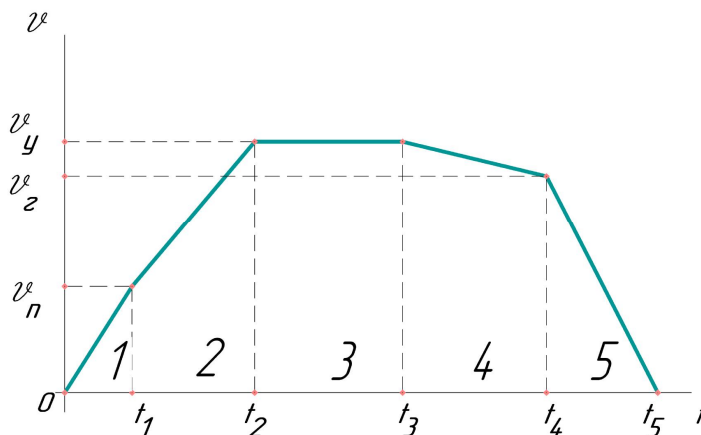


Рисунок 1 - Обобщенная диаграмма движения моторвагонного поезда

После завершения этапа торможения происходит стоянка.

При появлении сигнала задания на движение поезда, исходящего от командоконтроллера машиниста, или от системы автовождения, или от узла управления поездом, формирование импульсов управления ключами тягового автономного инвертора напряжения (ТАИН) происходит по принципу широтно-импульсной модуляции.

При достижении выходного напряжения ТАИН уровня, необходимого для функционирования систем собственных нужд, процесс формирования сигнала управления ключами ТАИН происходит по амплитудному принципу на основе соотношения

$$\frac{E}{f} = const, \quad (1)$$

где  $E$  – электродвижущая сила (ЭДС) тягового двигателя, которая рассчитывается на основе измеренных значений активной составляющей тока и напряжения в шине постоянного тока;

$f$  – фактическая частота тока тягового асинхронного двигателя.

Расчет ЭДС тягового двигателя осуществляется на основе соотношения

$$E = U_d - i_{sy} Z_s, \quad (2)$$

где  $U_d$  – напряжение в звене постоянного тока тягового преобразователя частоты;

$i_{sy}$  – значение активной составляющей статорного тока тягового двигателя;

$Z_s$  – сопротивление обмотки статора тягового асинхронного двигателя.

В таком режиме происходит работа тяговой электропередачи до момента достижения в шине постоянного тока номинального напряжения тяговой машины. После этого, в зависимости от задания на скорость движения поезда, происходит переход системы автоматического управления тяговой электропередачей в зону управления с ослабленным потокосцеплением ротора тягового асинхронного двигателя.

Уменьшение модуля вектора потокосцепления ротора двигателя достигается при постоянном значении выходного напряжения ТАИН путем дальнейшего увеличения частоты задания для тягового двигателя. При этом изменение задания модуля вектора потокосцепления ротора двигателя происходит пропорционально сигналу модуляции, который вырабатывается системой автоматического управления тяговой электропередачей.

Описанная последовательность изменения законов управления тяговой электропередачей соответствует диаграмме, показанной на рис. 2, на которой приведены диапазоны работы и моменты переключения между режимами управления ТАИН и изменение скорости вращения тягового асинхронного двигателя происходящее при этом.

На профиле железнодорожного пути с перевалами, где чередуются между собой подъемы, ровные площадки и спуски, рекомендуется вести поезд в растянутом состоянии [16] без использования выбега. В этом случае скорость движения регулируют путем изменения силы тяги. Если моторвагонный поезд следует по подъему, то силу тяги увеличивают, а на ровных площадках и спусках – уменьшают. На подъезде к подъему, который нельзя преодолеть за счет накопленной кинетической энергии, силу тяги увеличивают.

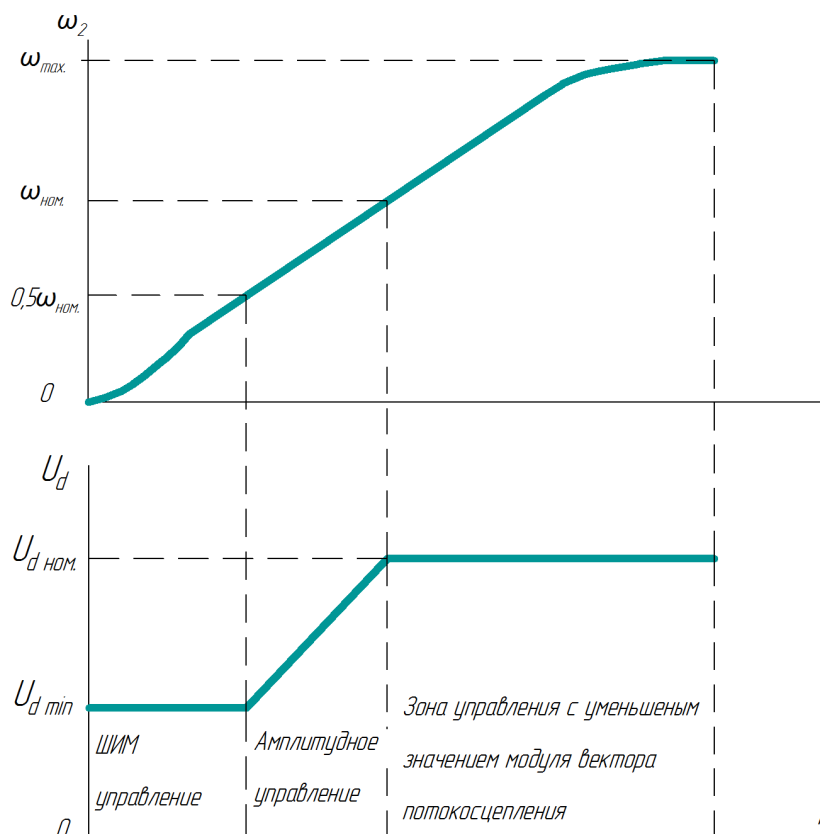


Рисунок 2 - Последовательность изменения законов управления тяговым преобразователем частоты моторвагонного поезда с тяговой электропередачей переменного тока

Если впереди имеет место легкий профиль пути и есть возможность прохождения его в режиме выбега, машинист осуществляет разгон поезда до максимально необходимой скорости [15].

Если впереди профиль пути сложный (содержит крутой подъем, кривые), то возможность использования выбега для движения поезда почти отсутствует из-за стремительного падения скорости на таком профиле. Машинисту приходится выполнять повторные пуски и разгон, что уменьшает оптимальные затраты энергии на движение по данному участку. Способ движения по такому участку должны быть таким, чтобы обеспечить приблизительно неизменной скоростью движения поезда [15]. Машинист должен выбрать такой режим движения, чтобы скорость поезда отвечала установившемуся режиму

движения, при котором полностью выполняется установленный график движения на участке пути.

При движении по участкам с равнинным профилем железнодорожного пути и относительно редкими остановками поезда машинисту нужно установить такой режим вождения, при котором обеспечивается наименьшее колебание скорости движения с использованием таких позиций командоконтроллера, которые отвечают максимально возможным значениям коэффициента полезного действия моторвагонного поезда. Уменьшение неравномерности движения поезда в этом случае дает заметный эффект вследствие нелинейной зависимости между силой сопротивления движению и скоростью движения [16].

Профиль участков железнодорожных путей, на которых есть ограничения относительно использования мощности поездов по сцеплению с рельсами, характеризуется наличием подъемов большой крутизны, однако относительно небольшой протяженности [16]. Поэтому при разработке и реализации рациональных режимов вождения моторвагонного электротранспорта на таких участках, наряду с реализацией самой большой силы тяги, необходимо обеспечивать использование кинетической энергии движущегося поезда.

В случае приближения поезда к сложной части профиля железнодорожного пути машинист должен придать поезду, по возможности, наибольшую скорость в пределах допустимого значения скорости движения на данном участке пути [6, 7]. Такой режим вождения поезда дает возможность преодолевать часть подъема за счет накопленной на предыдущих участках профиля пути кинетической энергии при переходе ее в потенциальную энергию во время движения по подъему. Данный процесс проиллюстрирован на рис. 3.

После разгона машинист выключает тяговые электродвигатели, давая возможность поезду преодолеть часть подъема в режиме выбега до того момента, когда скорость уменьшится до необходимого среднего значения, после чего командоконтроллер переводится в нужную позицию для поддержки постоянной скорости движения на всем перегоне. При движении поезда по

подъему накопленная кинетическая энергия будет уменьшаться, а ток тяговых асинхронных двигателей увеличиваться. Однако переходить на низшие позиции управления рекомендуется лишь при достижении током двигателей, а соответственно и силой тяги поезда, предельных значений на данной позиции.

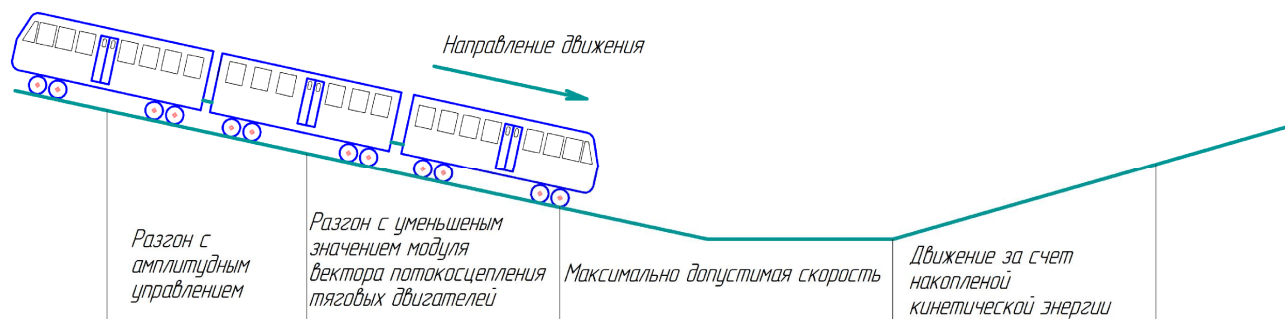


Рисунок 3 - Последовательность изменения способов вождения моторвагонного поезда при движении по наклонным участкам с переходом на подъем

Если скорость поезда продолжает уменьшаться, то необходимо перевести систему тяговой электропередачи в режим номинального значения модуля вектора потокосцепления ротора тягового асинхронного двигателя.

При чередовании элементов профиля пути с малыми значениями уклонов и элементов профиля со значительной крутизной необходимо использовать первые для накопления кинетической энергии поезда. Для этого целесообразно переходить на более глубокое уменьшение значения модуля вектора потокосцепления. Подобные условия движения в конце подъема могут оказаться рациональными по отношению к экономии первичных энергоносителей в том случае, если после подъема находится станция, на которой предусмотрена остановка, или находится подъем, на котором поездом преодолевается высота большая, чем 10 м и уклон элементов профиля пути больший, чем 4 ‰ [16]. Кроме того, использование накопленной кинетической энергии за счет увеличения скорости перед подъемом при уменьшении значения модуля вектора потокосцепления ротора тягового асинхронного двигателя позволяет уменьшить нагрузку на сам двигатель и, тем самым, снизить температуру нагрева электрической машины в процессе движения по

подъему. Особенно важно иметь максимально допустимую для данного участка пути скорость перед подъемом, который находится сразу после вредного спуска (спуск, на котором по условиям безопасности движения необходимо использовать регулировочное торможение для того, чтобы скорость поезда не превышала максимально допустимого значения, то есть на таком спуске удельное дополнительное сопротивление движению превышает удельное сопротивление движению данного поезда) [16].

Местные инструкции для локомотивных бригад относительно рациональных режимов вождения моторвагонного электротранспорта должны содержать не только рекомендации, разработанные для определенных условий движения, а и знакомить локомотивные бригады с основными принципами, которые следует использовать для максимального использования мощности моторвагонного электротранспорта. Поэтому работа по обучению локомотивных бригад рациональным режимам вождения моторвагонного электротранспорта должна включать в себя не только теоретическое обучение, а и практический показ данных принципов опытными машинистами и машинистами-инструкторами. Рациональные режимы вождения моторвагонного электротранспорта должны основываться не на сборнике правил и инструкций относительно режимов вождения поезда на конкретных участках профиля железнодорожного пути или конкретных участках дистанций железных дорог, а на глубоком понимании сущности физических процессов, которые происходят при движении поезда в том или другом режиме при разных условиях и обстоятельствах. Такое понимание процессов возможно лишь с обретением высокого профессионализма и опыта локомотивными бригадами, при постоянном обмене передовым опытом между разными машинистами.

## **2. Алгоритмы вождения моторвагонных поездов по уклонам**

Сложность реализации рациональных алгоритмов вождения моторвагонных автономных поездов заключается в том, что кроме учета



электрических и электромагнитных процессов в тяговой электропередачей моторвагонного поезда для полноценного управления тяговым асинхронным двигателем нужно учитывать характеристики всей силовой установки поезда и условия его движения:

- характеристики дизель-генератора (для автономных поездов);
- характеристики тягового электрического генератора;
- законы сопротивления движению железнодорожного состава;
- ограничения, которые возникают по условиям сцепления колеса с рельсами;
- ограничения по максимальным ускорению, рывку и скорости.

На практике, по исследованиям многих ученых [1, 8-12], является нецелесообразным и почти невозможным учет всех существующих ограничений и факторов, действующих на подвижной состав в одном функционале оптимального управления. В большинстве случаев является рациональным решение отдельных задач управления с ограниченным количеством факторов управления, которые имеют влияние на определенный функционал и дальнейшее объединение таких задач управления в единую структуру на основе системы автовождения подвижного состава [2, 3]. При выборе рациональных режимов вождения моторвагонного поезда, в случае перехода со спуска на подъем, возможным является использование в качестве базовых алгоритмов изменения скорости подвижного состава, заложенные в работе [10] алгоритмы вождения тепловозов по уклонам.

Исходным вопросом в задаче рационального автоматического управления тяговой электропередачей моторвагонного поезда является определение предельного значения скорости движения поезда, которой он должен достичь для прохождения соответствующего участка пути (зачастую она достигается непосредственным изменением значения модуля вектора потокосцепления тягового асинхронного двигателя). Это нужно для определения нижнего граничного уровня регулирования магнитного состояния тягового асинхронного двигателя. Согласно первому возможному алгоритму движения

моторвагонного поезда по наклонному участку железнодорожного пути, при переходе со спуска на подъем, показанного на рис. 4, перед приближением к окончанию спуска и переходом на подъем машинист должен перевести моторвагонный поезд в режим набора скорости, что отвечает участку  $BC$ , относительно предыдущего режима движения по спуску со скоростью, которая отвечала участку  $AB$ , к предельно возможному уровню, который задан участком  $CD$ , где скорость определяется рядом граничных условий.

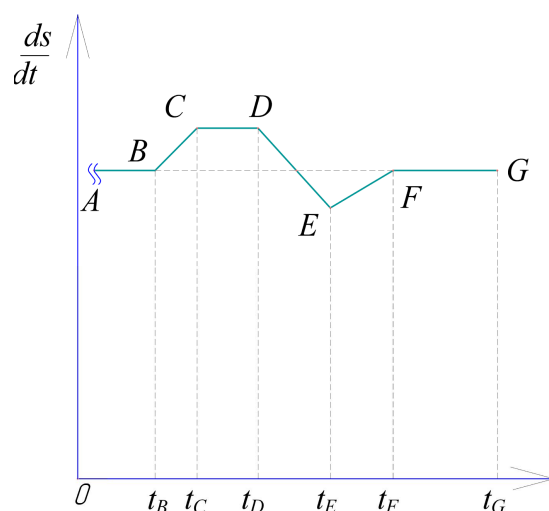


Рисунок 4 - Графическая интерпретация первого возможного алгоритма движения моторвагонного поезда по наклонному участку железнодорожного пути

После этого моторвагонный поезд входит в зону подъема железнодорожного пути, вследствие чего его скорость будет меняться согласно участку  $DE$ , с постепенным изменением до определенной средней скорости движения по перегону, что показано на участках  $EF$  и  $FG$  соответственно.

Более распространенным способом управления, согласно рекомендациям [6, 7], является следующий, проиллюстрированный на рис. 5, согласно которому перед приближением к окончанию спуска и переходом на подъем машинист должен перевести моторвагонный поезд в режим набора скорости, которая будет отвечать участку  $BC$  относительно предыдущего режима движения по спуску со скоростью, которая отвечала участку  $AB$ , до предельно возможного значения скорости на данном спуске. Причем данный уровень

скорости достигается непосредственно в конце спуска, со следующим мгновенным переходом моторвагонного поезда в зону подъема железнодорожного пути, вследствие чего его скорость будет изменяться согласно участка  $CD$ , с постепенным изменением до определенной средней скорости движения по перегону, что показано на участках  $DE$  и  $EF$  соответственно.

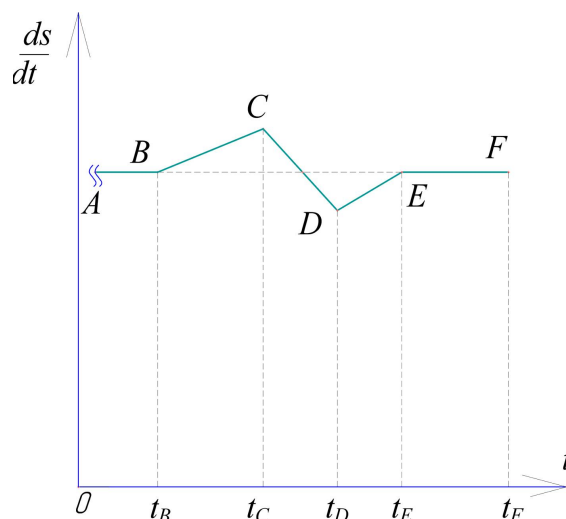


Рисунок 5 - Графическая интерпретация второго возможного алгоритма движения моторвагонного поезда по наклонному участку железнодорожного пути

Рассмотрим следующий алгоритм, проиллюстрированный на рис. 6.

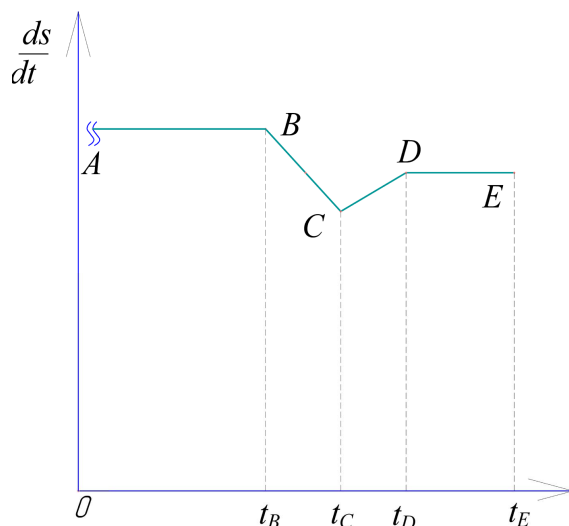


Рисунок 6 - Графическая интерпретация третьего возможного алгоритма движения моторвагонного поезда по наклонному участку железнодорожного пути

В данном алгоритме моторвагонный поезд набирает скорость, большую необходимой средней скорости движения по перегону, что отвечает участку  $AB$ , со следующим переходом поезда в зону подъема железнодорожного пути. Вследствие этого скорость поезда будет изменяться согласно участка  $BC$ , с постепенным изменением до определенной средней скорости движения по перегону, что показано на участках  $CD$  и  $DE$  соответственно.

С точки зрения рациональности выбора режима ведения моторвагонного поезда, согласно рекомендациям [15], наименее приемлемым, но допустимым, является случай, проиллюстрированный на рис. 7.

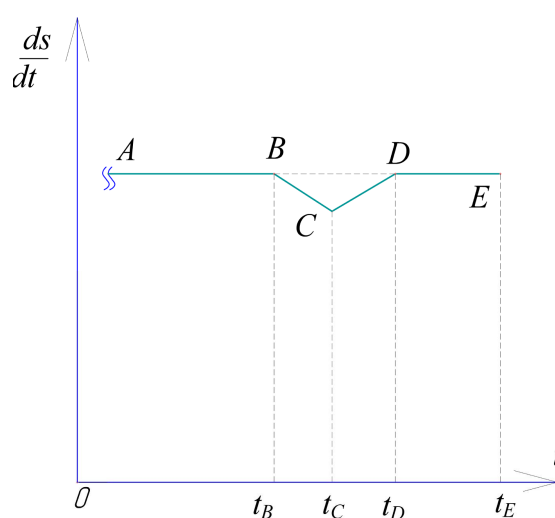


Рисунок 7 - Графическая интерпретация четвертого возможного алгоритма движения моторвагонного поезда по наклонному участку железнодорожного пути

В данном режиме моторвагонный поезд двигаясь по спуску не превышает среднее значение скорости движения по перегону, что отвечает участку  $AB$ . При переходе в зону подъема железнодорожного пути его скорость будет уменьшаться согласно участка  $BC$ , с постепенным изменением до определенной средней скорости движения по перегону, что показано на участках  $CD$  и  $DE$  соответственно. Данный режим вождения не обеспечивает топливной экономии, так как уменьшение средней скорости движения по подъему компенсируется за счет работы тягового двигателя, а не за счет использования кинетической энергии.

По исследованиям [10] возможным также является следующий алгоритм, проиллюстрированный на рис. 8.

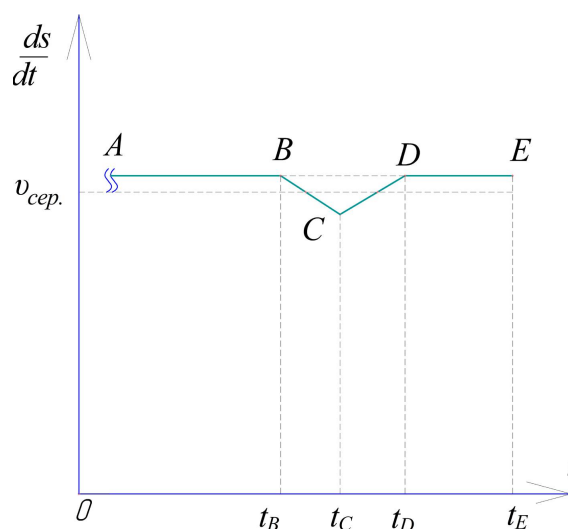


Рисунок 8 - Графическая интерпретация движения моторвагонного поезда по наклонному участку железнодорожного пути, при переходе со спуска на подъем, с предварительным набором избыточной скорости

Согласно рис. 8 машинист минует участок спуск-подъем со средней скоростью, значение которой больше, чем установленная средняя скорость для движения по перегону. Это позволяет компенсировать уменьшение кинетической энергии во время перехода на подъем.

### **3. Автоматическое управление тяговой электропередачей моторвагонных поездов**

Выгодно отличаются высокие требования относительно понимания физической сущности рациональных режимов вождения моторвагонного электротранспорта к человеку-машинисту и к системе автовождения поезда, которая на основе определенных математических соотношений и заложенных алгоритмов, данных, полученных из опытных поездок с машинистами-инструкторами, способна к самообучению, постороннему обучению и поиску оптимального, по определенным критериям, режима рационального вождения

на определенном профиле железнодорожного пути. Введение оптимальных режимных карт для такой системы автовождения моторвагонного поезда позволяет автоматически учесть порядок вождения поезда, режимы работы командоконтроллера машиниста, время следования по перегону, расстояния между остановочными пунктами, оптимальные значения скорости, ускорение и рывка, переход в режим выбега и прочее.

Механическая мощность тягового асинхронного двигателя может быть рассчитана согласно выражения [13]

$$P_{\text{мех.}} = M_e \cdot \omega, \quad (3)$$

где  $M_e$  - электромагнитный момент тяговой асинхронной машины;

$\omega$  - угловая частота вращения ротора машины.

С другой стороны, механическую мощность, которую должны создать тяговые двигатели можно определить согласно [3]:

$$P_{\text{мех.}} = \frac{A_T}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

где  $A_T$  - работа силы тяги моторвагонного поезда, которая выполняется за время от  $t_1$  до  $t_2$ , на участке маршрута с координатами от  $S_1$  до  $S_2$ , и которую согласно [4] можно определить следующим образом:

$$A_T = \int_{S_1}^{S_2} \frac{F_K(S) dS}{\eta(S)}, \quad (5)$$

или же

$$A_T = \frac{1}{\eta_c} \cdot \int_{S_1}^{S_2} F_K(S) dS, \quad (6)$$

где  $F_K$  - сила тяги;

$\eta(S)$  - текущее значение коэффициента полезного действия моторвагонного поезда;

$\eta_c$  - среднее значение коэффициента полезного действия моторвагонного поезда, которое можно определить согласно соотношениям и методике, приведенной в [2, 3].

Универсальную тяговую характеристику электродвижущего состава можно представить выражениями разного вида, однако для решения большинства задач тяги наиболее допустимой является гладкая ниспадающая функция вида [3, 4]

$$F_{K^*} = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot v_*}, \quad (7)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  - коэффициенты, которые получают по результатам анализа тяговых характеристик конкретного типа моторвагонного электротранспорта для определенного диапазона скоростей  $v_*$ . Значение данных коэффициентов для магистральных электровозов, которые используются на отечественной железной дороге, приведены в работах [3, 4].

Работа силы тяги, которую необходимо выполнить для движения поезда по закону в форме кривой, которая соединяет точки маршрутной карты движения моторвагонного поезда с координатами  $(t_1, S_1)$  и  $(t_2, S_2)$  составляет

$$A_T = \int_{t_1}^{t_2} C \cdot ch\left(\frac{t + C_1}{C}\right) dt, \quad (8)$$

или

$$A_T = C \cdot \int_{t_1}^{t_2} ch\left(\frac{t + C_1}{C}\right) dt, \quad (9)$$

где  $C$  и  $C_1$  - константы, которые зависят от маршрутной карты движения поезда.

Для проведения дальнейших расчетов учтем, что

$$ch(x) = \frac{1}{2} \cdot (e^x + e^{-x}), \quad (10)$$

То есть работу силы тяги можно найти следующим образом:

$$A_T = \frac{C}{2} \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{t+C_I}{C}} dt + \frac{C}{2} \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t+C_I}{C}} dt. \quad (11)$$

Работа силы тяги, необходимая для перемещения поезда составляет:

$$A_T = \frac{C^2}{2} \cdot e^{\frac{t+C_I}{C}} \Big|_{t_1}^{t_2} - \frac{C^2}{2} \cdot e^{-\frac{t+C_I}{C}} \Big|_{t_1}^{t_2}, \quad (12)$$

или, в конечном виде, полное значение необходимой работы составляет

$$A_T = \frac{C^2}{2} \cdot e^{\frac{C_I}{C}} \cdot \left( e^{\frac{t_1}{C}} - e^{\frac{t_2}{C}} \right) - \frac{C^2}{2} \cdot e^{-\frac{C_I}{C}} \cdot \left( e^{-\frac{t_1}{C}} - e^{-\frac{t_2}{C}} \right). \quad (13)$$

Реализация рационального управления модулем вектора потокосцепления тягового асинхронного двигателя, для обеспечения движения поезда по закону в форме кривой, которая соединяет точки маршрутной карты моторвагонного поезда с координатами  $(t_1, S_1)$  и  $(t_2, S_2)$  осуществляется системой автовождения, которая на основе сигналов датчиков, установленных в элементах тяговой электропередачи и расчетов, полученных на основе заложенных алгоритмов и маршрутной карты движения, генерирует сигналы управления тяговой электропередачей.

Пусть на каждом этапе движения вдоль маршрутной карты моторвагонного поезда с координатами от  $(t_1, S_1)$  до  $(t_2, S_2)$  система автовождения осуществляет отсчет времени  $t_j$ , причем  $t_j \in [0; (t_2 - t_1)]$ . Пусть в зависимости от шага итерационного процесса будем иметь  $\mu$  циклов итерации для прохождения всего отрезка времени  $[0; (t_2 - t_1)]$ . Количество циклов итерации рассчитывается по известным оптимальным алгоритмам поиска с минимизацией ошибки [5].

На каждом шаге итерационного процесса система автовождения должна рассчитать необходимую работу, которую нужно выполнить для данного шага, причем в совокупности, на интервале  $[0; (t_2 - t_1)]$  для  $\mu$  циклов итерации,



суммарная выполненная работа должна отвечать значению, полученному согласно выражения (13).

На каждом итерационном цикле должна выполняться работа, которую можно найти по следующему выражению:

$$A_j = \frac{t_j}{t_2 - t_1} \cdot (A_T - A_{j-1}). \quad (14)$$

То есть в общем виде на каждом промежутке времени выполняется мгновенная работа, которая является функцией времени и в совокупности по количеству промежутков итерации, дает полную работу, которая соответствует значению, полученному согласно выражения (13):

$$A(t) = A_j. \quad (15)$$

Механическую мощность тягового асинхронного двигателя можно рассчитать по формуле [14]

$$P_{\text{мех.}} = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot \psi_r \cdot i_r \cdot \sin\gamma, \quad (16)$$

где  $\psi_r$ ,  $i_r$  - модуль обобщенных векторов роторного потокосцепления и тока соответственно;

$\gamma$  - угол между обобщенным вектором роторного потокосцепления и вектором тока тяговой асинхронной машины.

Тогда будем иметь следующее соотношение:

$$\frac{A(t)}{t_2 - t_1} = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot \psi_r \cdot i_r \cdot \sin\gamma, \quad (17)$$

откуда получаем

$$\psi_r(t) = \frac{2 \cdot A(t)}{3 \cdot \omega \cdot i_r \cdot (t_2 - t_1) \cdot \sin\gamma}. \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет реализовывать закон рационального управления модулем вектора потокосцепления тягового асинхронного двигателя во времени

(рис. 9), для обеспечения движения вдоль маршрутной карты моторвагонного поезда с координатами от  $(t_1, S_1)$  до  $(t_2, S_2)$ .

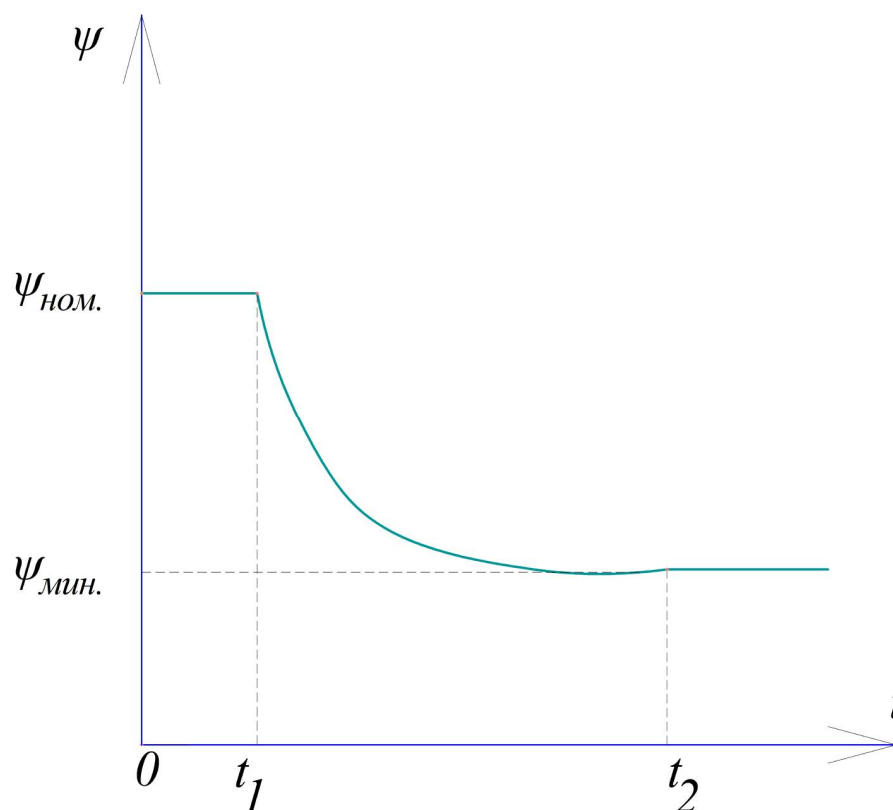


Рисунок 9 - Вариант распределения кривой модуля вектора потокосцепления тягового асинхронного двигателя во времени

Выводы.

1. Определены общие рекомендации по управлению тяговым преобразователем частоты моторвагонного электротранспорта, на основании которых возможно построение системы автовождения поезда по наклонным профилям железнодорожного пути.

2. Режим вождения моторвагонного поезда выбирается в соответствии с расписанием движения и условиями, которые характеризуют определенные тягово-энергетические показатели. При этом машинист должен обязательно учесть возможность использования кинетической энергии, накопленной на спусках для движения по следующим подъемам. Кроме того, такую возможность необходимо закладывать при построении оптимальных режимных карт для системы автовождения моторвагонного электротранспорта.

3. На основании проведенного исследования возможно дальнейшее построение системы автовождения моторвагонного поезда для достижения экономии первичных энергоресурсов за счет использования кинетической энергии поезда.

### Список литературы

1. Автоматизация систем управления электрическим подвижным составом: Учеб. пособие для вузов ж-д. трансп. / Под общ. ред. А. В. Плакса. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – 215 С.

2. Гетьман Г. К. Анализ расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 36. – С. 70-74.

3. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги : монография : в 2 т. / Г. К. Гетьман – Д. : Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 363 С.

4. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Днепропетровский нац. ун-т ж.-д. трансп. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп., 2008. – 444 С.

5. Годунов С. К. Разностные схемы: Введение в теорию : Учебное пособие для университетов и вузов по специальности «Прикладная математика» / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – 2-е изд., перераб. и доп., 1977. – 440 С.

6. Дубровский З. М. Электровоз. Управление и обслуживание / Дубровский З. М., Курчатова В. А., Томфельд Л. П. – М. : Транспорт, 1979. – 231 С.

7. Калько В. А. Тепловоз. Иллюстрированное пособие машинисту / Калько В. А., Медведев Г. Г., Рукавишников Ю. А. – М. : Транспорт, 1967. – 223 С. 4

8. Костромин А. М. Оптимизация управления локомотивом. – М. : Транспорт, 1979. – 119 С.

9. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления. – Л. : Энергия, 1977. – 280 С.

10. Петров Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств. Библиотека по автоматике выпуск 373. – Л. : Энергия, 1969. – 96 С.
11. Петров Ю. П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. – Л. : Энергия, 1971. – 144 С.
12. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 187 С.
13. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 С.
14. Потапенко Е. М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко. – Запорожье : ЗНТУ, 2009. – 353 С.
15. Цукало П. В. Экономия электроэнергии на электроподвижном составе. – М. : Транспорт, 1983. – 174 С.
16. Черепашенец Р. Г. Вождение поездов / Р. Г. Черепашенец, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов, А. Н. Судаловский; под ред. Р. Г. Черепашенца. – М. : Транспорт, 1994. – 304 С.