

УДК 621.313

А.Э. АУХАДЕЕВ, к.т.н., доцент (КГЭУ)
Д.И. ТУХБАТУЛЛИНА, студент (КГЭУ)
П.В. ЕГОРОВА, студент (КГЭУ)
г. Казань

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ О ПОСТРОЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Развитие теоретических представлений об особенностях формирования режимов работы тягового электрооборудования (ТЭО) электроподвижного состава (ЭПС), об их структурно-функциональных взаимодействиях с другими техническими, технологическими и производственными процессами, характеризующими реализацию электрической тяги (ЭТ) может способствовать решению актуальной научной проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в системе городского электрического транспорта (ГЭТ). Для этого авторами сформулирована основанная на системном подходе и синергетической методологии научная концепция построения движения ЭПС, позволяющая представить ЭТ как открытый сложноорганизованный процесс, топологической основой многоуровневой конфигурации которого является работа ТЭО [1, 2].

В соответствии с предлагаемой научной концепции технологический процесс ЭТ, основной задачей которого является целенаправленное механическое движение ЭПС, реализуемое ТЭО в составе тягового электропривода, в общем случае может быть представлен совокупностью иерархически выстроенных подпроцессов. Для описания этих подпроцессов использовалась теория «построения движения», предложенная в первой половины XX в. биомехаником Н.А. Бернштейном [3] и нашедшая широкое применение в мехатронике [4]. Согласно этой теории реализация управляемого движения объектов и систем разной природы осуществляется посредством его «построения». При этом построение движения происходит в общем случае по 5 уровням («А», «В», «С», «D», «Е»), которые называются «уровни построения движения» [3]. Теория построения движения определяет механизмы контроля и управления движением, которые формируются особым образом по уровням и имеют сложную структуру. Такой механизм «построения движения» позволяет организовать эффективный алгоритм «построения решений» в управлении движением сложных динамических систем [4].

Процесс движения ЭПС можно условно представить как «механическую» составляющую реализации ЭТ. Очевидно, что присутствует и «электротехническая» составляющая, которая определяет процессы преобразования электроэнергии, формирования электрических режимов ТЭО, взаимодействия с окружающей средой, энергетической системой, другими ЭПС и т.д. Такие процессы также имеют четкую иерархическую структуру и, в общем случае, могут быть представлены 5 уровнями построения системы ЭТ (как на постоянном, так и на переменном токе) [5]. Реальный процесс ЭТ невозможно разделить на составляющие, но схожесть их иерархических структур позволяет сформулировать основные особенности построения процесса ЭТ: *многоуровневость процесса; иерархичность уровней; параллельность и взаимосвязь подпроцессов; обмен энергетическими, материальными и информационными ресурсами между уровнями и внешней средой.*

С учетом вышеперечисленных особенностей сформулируем теоретическую систему (научную концепцию) построения процесса ЭТ. Данная теоретическая система графически представлена на рис. 1.

Многоуровневость процесса ЭТ, определяется наличием в его структуре нескольких подпроцессов, каждый из которых решает конкретную специфическую задачу, отличающуюся от других, но в совокупности с другими направленную на решение основной задачи процесса. Такой подпроцесс или группа подпроцессов может формировать один из уровней системы. В структуре процесса ЭТ выделим 5 уровней:

1. Уровень энергетического обеспечения ($У_1$). По аналогии с уровнем $У_A$ построения движения $У_1$ является определяющим для всего процесса ЭТ. На данном уровне не происходит формирование ЭТ как таковой, а обеспечивается функциональная готовность процесса к деятельности путем обеспечения стабильного и надежного энергообеспечения перевозочного процесса системы ГЭТ.

2. Уровень реализации работы тягового электрооборудования ($У_2$). По аналогии с уровнем $У_B$, на данном уровне рассматривается подпроцесс, реализуемый в системе ограниченной собственными координатами объекта (в данном случае в системе ЭПС), без учета действия внешних сил, изменяющих импульс (количество движения) объекта (но при условии взаимодействия с внешней средой – нагревание и остывание ТЭО, электромагнитные взаимодействия, изменение влажности и т.д.). Подпроцесс данного уровня характеризуется определенными алгоритмами работы ТЭО и системой косвенного управления, которые определяются паспортными характеристиками входящих в них элементов, формируются на этапе проектирования ЭПС и однозначно определяют реализуемые режимы работы.

3. Уровень управляемого движения ЭПС (Y_3). На данном уровне, по аналогии с уровнем Y_C , формируется подпроцесс взаимодействия ЭПС с окружающим пространством и его элементами. Так при взаимодействии колесной пары с элементами пути возникает внешняя по отношению к ЭПС касательная сила тяги F_k , приводящая к движению, а электрические и электромеханические характеристики ТЭО формируют тяговую характеристику ЭПС. Создаваемая F_k является управляемой, что позволяет реализовать управляемое движение ЭПС. Различные параметры окружающего пространства, выражающиеся в физических характеристиках плана и профиля пути, климатических и погодных условий, напряжения на токоприемнике и др., определяют различные реализации электрической тяги.

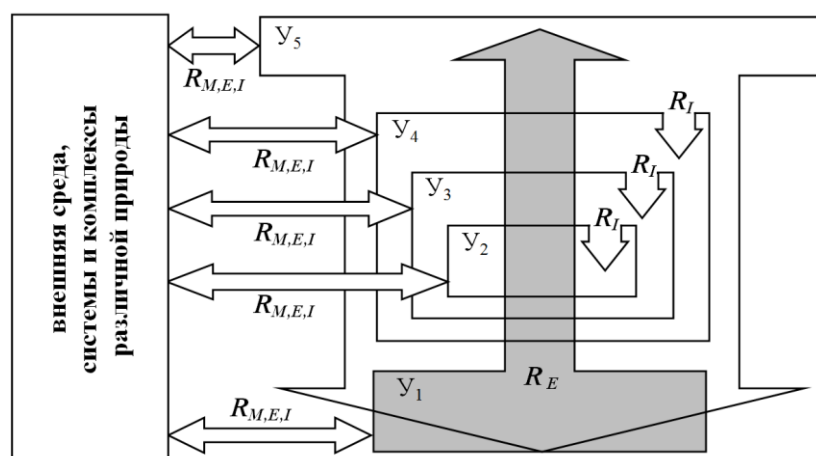


Рис. 1. Система построения процесса электрической тяги:
 $Y_1 - Y_5$ – уровни построения процесса ЭТ; $R_{M,E,I}$ – поток соответственно материальных, энергетических и информационных ресурсов

4. Уровень реализации технологического процесса ГЭТ (Y_4). На данном уровне, по аналогии с уровнем Y_D , формируется подпроцесс взаимодействия ЭПС с окружающим пространством и его элементами с учетом их конкретных свойств и характеристик, например, реализация требуемой ходовой скорости на перегоне с учетом графика движения, обеспечение ограничения скорости на отдельных участках и др. Движение уже не просто «управляемое», а «целенаправленное», т.е. направленное на достижение конкретной цели – обеспечение перевозки пассажиров по маршрутной сети в соответствии с технологией перевозочного процесса ГЭТ и требованиями к качеству поездной работы. На данном уровне электрическая тяга зависит от уровня профессиональной квалификации водителя или машиниста ЭПС.

5. Уровень реализации производственного процесса ГЭТ (Y_5).

Данный уровень системы построения электрической тяги является абстрактным и соответствует уровню Y_E в теории построения движения. Его абстрактность связана с формированием «идеализированного» процесса электрической тяги, который стремятся реализовать нижестоящие уровни. Условно, на этом уровне «выстраивается программа», по которой должен реализовываться процесс ЭТ, в соответствии с прогнозируемым «идеализированным» процессом, которая непрерывно управляет этим процессом и предопределяет его (например, прогнозируемые уровень потребления электроэнергии, пассажиропоток и др.). Данный подпроцесс выстраивается с учетом стратегии производственного процесса транспортного производства ГЭТ.

Иерархичность процесса ЭТ, определяется тем, что подпроцессы нижних уровней входят в состав подпроцессов более высоких уровней (см. рис. 1). Процессы более высоких уровней «подчиняют» себе подпроцессы более низких – задают параметры и условия их реализации R_I . Чем выше уровень системы, тем более сложную задачу реализации тяги он решает.

Так подпроцесс управляемого движения ЭПС (Y_3) включает в свой состав подпроцесс реализации работы ТЭО (Y_2) и при этом входит в состав подпроцесса (Y_4), определяемого технологией перевозочного процесса. При этом все эти подпроцессы включают в себя подпроцесс приема, преобразования и распределения энергии, потребляемой ЭПС (подпроцесса энергообеспечения - Y_1), не формирующего движение, но являющегося обеспечивающим для всего процесса ЭТ, а также подчиняются подпроцессу реализации стратегии производственного процесса транспортного производства (Y_5). Данный подпроцесс является высшим в представленной иерархической системе, т.к. определяет требования и условия для реализации всех предыдущих подпроцессов.

Параллельность подпроцессов, происходящих на каждом уровне, обусловлена механизмом реализации электрической тяги и вертикальной иерархией уровней системы. Уровни более высокого порядка формируют свои подпроцессы не по окончании подпроцесса нижнего уровня системы, а в момент его реализации при непрерывном взаимодействии, что и определяет *взаимосвязь подпроцессов*. При этом реализацию своей специфической задачи вышестоящий уровень выстраивает на основе задачи нижестоящего уровня, полностью определяя условия и параметры ее реализации (рис. 1).

Так управляемое движение ЭПС (Y_3) на элементарном участке пути (с определенными параметрами) выстраивается на основе уровня реализации работы ТЭО ЭПС (Y_2), который формирует алгоритмы и режимы работы тягового электропривода ЭПС для конкретных условий

(план и профиль заданного участка, климатические и погодные условия и др.) в которых выстраивается подпроцесс Y_3 . При выполнении технологии перевозки ЭПС (Y_4) движение по маршрутной сети при соблюдении ходовой скорости и межпоездного интервала в условиях сложной дорожной обстановки реализуется на основе подпроцесса уровня управляемого движения ЭПС (Y_3) на элементарном участке, формирующегося с учетом условий поездной работы ЭПС.

Обмен энергетическими, материальными и информационными ресурсами между уровнями и внешней средой является одним из основных условий реализации процесса ЭТ в открытой сложноорганизованной системе ГЭТ [6]. Данное условие строго реализуется только в общем случае, а в реальных условиях очевидны лишь некоторые взаимодействия. Условно схема обмена энергетическими R_E , материальными R_M , информационными R_I ресурсами представлена на рис. 1.

Таким образом, авторами сформулирована научная концепция, представляющая технологический процесс ЭТ, совокупностью иерархически выстроенных подпроцессов, каждый из которых, находясь в иерархическом подчинении подпроцесса вышестоящего уровня и формируя условия реализации подпроцесса нижестоящего, решает отдельную специфическую подзадачу построения движения ЭПС. Представленная теоретическая система позволит развить общую теорию тягового электрооборудования ГЭТ путем совершенствования методологических основ принципов формирования режимов работы ТЭО при реализации технологии ЭТ в производственно-технической системе ГЭТ. Выявленные структурно-функциональные связи подпроцесса реализации работы ТЭО, характеризующие архитектуру взаимодействий с другими техническими, технологическими и производственными процессами, обеспечивающими реализацию ЭТ, позволят определить эффективные режимы и способы управления тяговым электроприводом ЭПС ГЭТ, а также разработать новые методы расчета рациональных режимов работы ТЭО, адекватные реальным режимам эксплуатации ЭПС.

Список литературы:

1. Рылов, Ю.А. Реализация электрической тяги в производственно-технической системе городского электрического транспорта [Текст] / Ю.А. Рылов, А.Э. Аухадеев, А.Х. Мукимов, В.И. Каримов // Современные научные исследования и разработки. 2017. – № 8 (16). – С. 487–491.
2. Аухадеев, А.Э. Городской электрический транспорт с позиций синергетической методологии [Текст] / А.Э. Аухадеев, Р.С. Литвиненко, Ю.А. Рылов, А.Г. Хайруллин // Мир транспорта и технологических машин. 2018. – № 1 (60). – С. 67–73.

3. Бернштейн, Н.А. О построении движений [Текст] / Н.А. Бернштейн. – М.: Медгиз, 1947. – 234 с.

4. Платонов, А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике [Текст] / А.К. Платонов // Прикладная механика и управление движением. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. С. 127–222.

5. Сопов, В.И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе [Текст] / В.И. Сопов, Н.И. Щуров. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 728 с.

6. Аухадеев, А.Э. Саморазвитие транспортной системы современного города: Поиск инновационной модели интеллектуального управления [Текст] / А.Э. Аухадеев. – М.: ВИНТИ, 2014. – 220с.