

В.И. ОМЕЛЬЯНЕНКО, д.т.н., профессор, НТУ «ХПИ»;
Н.Н. КАЛЮЖНЫЙ, доцент;
В.Е. БОНДАРЕНКО, д.т.н., профессор;
Л.В. ОВЕРЬЯНОВА, аспирант, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОЙ СОСТАВ–ТЯГОВАЯ СЕТЬ» И ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУБЪЕКТИВНЫХ ФАКТОРОВ

Запропоновано спосіб аналізу руху потягів та режимів роботи тягової мережі електрифікованих залізниць з використанням сукупності ПАК та нечітких нейронних мереж, який дозволяє визначити необхідні дані для розрахунку оптимальних параметрів роботи тягової мережі в умовах неповноти вхідних даних.

A method for the analysis of trains and modes of traction network of electrified railways using a set of PAC and fuzzy neural networks, which allows to determine the necessary data to calculate the optimal parameters of the traction network under incomplete input data.

Введение

Наблюдаемое в Украине увеличение железнодорожных перевозок приводит к росту потребной для тяги электроэнергии на электрифицированных ее участках и, как следствие, к росту потерь мощности и колебаний напряжения в тяговой сети. Учесть это возможно только при исследовании процессов, протекающих при совместной работе подвижного состава, тяговой сети и тяговых подстанций, путем расчетов на математической модели, так как натурные испытания системы затратны, требуют много времени и не всегда возможны.

В Харьковском политехническом институте разработан программно-алгоритмический комплекс (ПАК), позволяющий виртуально моделировать электрофизические процессы в системе «электроподвижной состав – тяговая сеть» (ЭПС-ТС) для любого вида подвижного состава (грузовой, пассажирский поезда и электропоезда) и тяговой сети постоянного тока при движении по участку пути заданного профиля.

Этот ПАК базируется на классических допущениях тяговых расчетов: движение поезда описывается математически как движение материальной точки с одной степенью свободы; расчет движения ведется без учета динамики процессов внутри системы поезда; при движении поезда учитываются только внешние силы, совпадающие с его направлением и др.

Однако, при составлении ПАК не учитывался реальный опыт ведения поездов машинистами. Очевидно, что это обстоятельство не может не сказаться на достоверности результатов виртуального моделирования процессов взаимодействия системы «электроподвижной состав – тяговая сеть».

Цель работы - иллюстрация возможности ПАК в определении электрофизических показателей работы электроподвижного состава и тяговой сети постоянного тока, оценка неточности и погрешности в определении этих показателей, а также указание пути их устранения.

Программно-алгоритмический комплекс ЭПС-ТС

Блок-схема программно-алгоритмического комплекса (ПАК) представлена на рис.1.

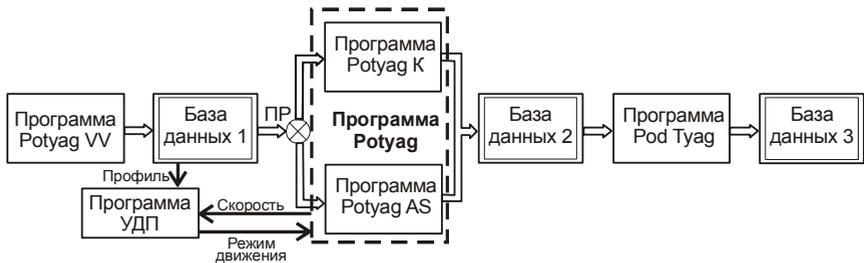


Рисунок 1 – Блок-схема программно-алгоритмического комплекса

ПАК состоит из трех программ, написанных на языке DELPHI: PotyagVV, Potyag и PodTuag и трех баз данных: входных; кривых движения поездов и их энергетических показателей, а также тяговой сети.

Программа PotyagVV предназначена для ввода исходных данных в ПАК, записи этих данных на жесткий диск для длительного хранения и, при необходимости, их повторного использования. Программа позволяет производить оперативную модернизацию данных.

Программа Potyag предназначена для расчета кривых движения поезда по заданному участку железнодорожного пути и определению потребного мгновенного значения тока и мощности ЭПС для обеспечения этого движения. Программа состоит из двух подпрограмм – PotyagK и PotyagAS. Программа PotyagK используется для расчетов режимов работы ЭПС с коллекторными тяговыми электродвигателями, программа PotyagAS – для ЭПС с электроприводом с асинхронными тяговыми электродвигателями. Обе подпрограммы могут производить расчеты исходя как из тяговых и токовых характеристик ЭПС, находящихся в эксплуатации, так и исходя из параметров электропередачи мощности и тормозных качеств существующих и проектируемых ЭПС.

Программа Potyag может одновременно производить расчеты параметров движения по участку между двумя тяговыми подстанциями до четырех ЭПС разного типа (грузового, пассажирского, электропоезда). При этом движение осуществляется по двухпутному электрифицированному

участку с постом секционирования, как в прямом, так и в обратном направлении.

Программа PodTyag предназначена для расчета распределения токов, потребляемых ЭПС, между фидерами и подстанциями, а также расчета потерь напряжения на токоприемниках ЭПС и мощности тяговой сети.

Программа управления движением поездов (УДП), исходя из текущих значений профиля пути, заданной и текущей скорости движения ЭПС генерирует управляющие воздействия, определяя режим движения. Программа управления не является самостоятельной единицей, она распределена в программах PotyagK, PotyagAS и PodTyag. Программа управления учитывает особенности ЭПС (тип привода, тормозные свойства) и ограничения систем ЭПС (по мощности, току, сцеплению, уровню потерь напряжения на токоприемнике, а также электромагнитным нагрузкам).

Известные тяговые и токовые характеристики ЭПС вводятся в ПАК посредством аппроксимирования их полиномами. Переключение на проведение расчета программой PotyagK или PotyagAS производится переключателем режима работы (ПР) программно-алгоритмического комплекса.

База данных 1 содержит следующие файлы.

Файл TabDanProb предназначен для хранения данных профиля пути (количество, длины и уклоны участков, радиусы и длины кривых, допустимые скорости движения по участку). Количество участков и количество введенных профилей ограничивается только мощностью (вычислительной способностью) используемой ЭВМ.

Файл TabDanLoc предназначен для хранения данных ЭПС (количество секций, обмоточных осей, диаметр колеса, длина вагона ЭПС и его масса).

Файл TabDanSos предназначен для хранения данных состава (общее количество вагонов, количество и длина восьми- и четырехосных вагонов, масса состава и допустимые ускорения движения).

Файл TabDanEl предназначен для хранения параметров как коллекторных, так и асинхронных тяговых электродвигателей ЭПС.

Файл TabDanSet предназначен для хранения данных тяговой сети (удельные сопротивления контактного провода, рельсовой цепи, расстояние до поста секционирования).

База данных 2 предназначена для хранения расчетных данных движения каждого из поездов (скорость, путь, напряжение на электродвигателе, расход электроэнергии, потребляемый ЭПС ток).

В базе данных 3 хранятся расчетные данные режимов работы тяговой сети (мгновенные значения мощности тяговых подстанций, токи фидеров и подстанций, потери напряжения на токоприемнике любого из поездов, а также потери мощности в тяговой сети как общие, так и их составляющие – в контактной и рельсовой цепях и ток поста секционирования).

При расчета режимов взаимодействия системы ЭПС-ТС с помощью описанного ПАК работа тяговых электродвигателей постоянного и переменного тока осуществлена согласно методике, изложенной в [2]. Определение кривых движения поезда основано на правилах тяговых расчетов [3]. Разнос токов по фидерам тяговых подстанций, определение потерь напряжения в тяговой сети, мощности тяговых подстанций и потерь мощности в контактной сети выполнен методом мгновенных схем согласно [4]. Управление движением поезда основано на логических правилах вида «если...то...», учитывающих ограничения по скорости движения, допустимому ускорению, силе тяги по сцеплению, току и мощности тяговых электродвигателей [5].

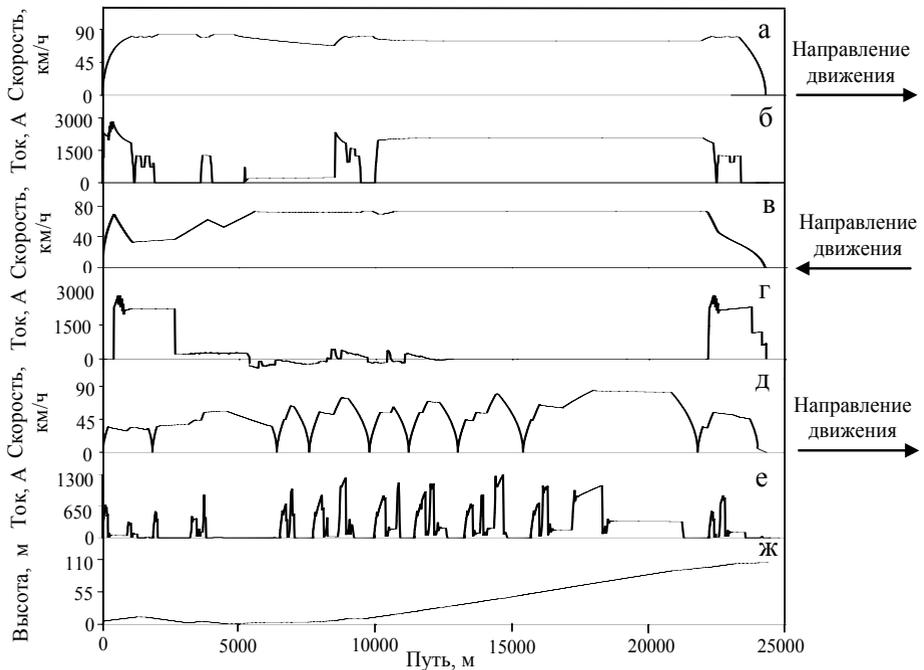
Расчет с помощью модели позволяет выработать рекомендации по стабилизации уровня напряжения в тяговой сети; уменьшению потерь электроэнергии в тяговой сети; рациональному токораспределению энергии в тяговой сети; прогнозированию нагрузки тяговой сети и тяговых подстанций; определению параметров и режимов работы накопителей энергии; диагностике энергосистем.

Пример расчета

Иллюстрация работы ПАК ЭПС-ТС приводится на примере расчета движения трех поездов на двухпутном участке дороги Харьков-Люботин длиной 24335 м, электрифицированном постоянным током. Профиль характеризуется монотонным подъемом со средним подъемом 10 ‰ при движении с отметки 7500 м от Харькова. Предусмотрен следующий график движения поездов со следующими параметрами. Первым из Харькова отправлен пассажирский поезд массой 1200 т, состоящий из 22 вагонов, ведомый электровозом, оснащенный коллекторными тяговыми двигателями. Через 3 минуты после отправления первого поезда вслед за ним отправлен электропоезд из 10 вагонов, оснащенный асинхронными тяговыми двигателями с векторным управлением. Электропоезд осуществляет остановки на всех промежуточных станциях, предусмотренных графиком. Через 5 минут после отправления первого пассажирского, ему навстречу, из Люботина, отправляется грузовой поезд массой 2200т с составом из 45 вагонов, имеющий 196 осей. Поезд ведет электровоз с коллекторными тяговыми двигателями.

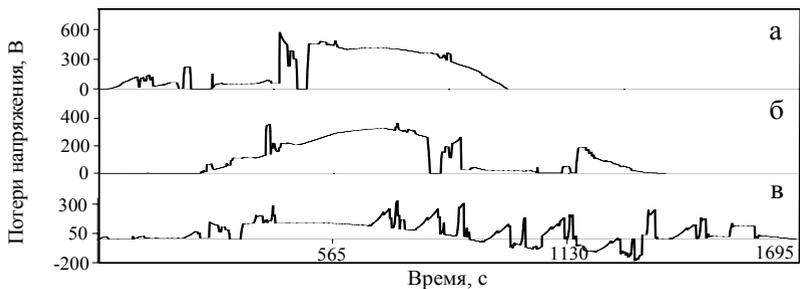
Кривые движения, потери напряжения на токоприемниках подвижного состава, токи, потребляемые ЭПС, фидеров, подстанций и постов секционирования, а также потери мощности в тяговой сети представлены на рис. 2, 3, 4 и 5 соответственно.

Полученные зависимости не противоречат общепринятым закономерностям физических процессов, протекающим в системе ЭПС-ТС, и все рассчитанные показатели находятся в допустимых пределах.



а, б – пассажирский электровоз; в, г – грузовой электровоз; д, е – электропоезд; ж – профиль пути.

Рисунок 2 – Кривые движения

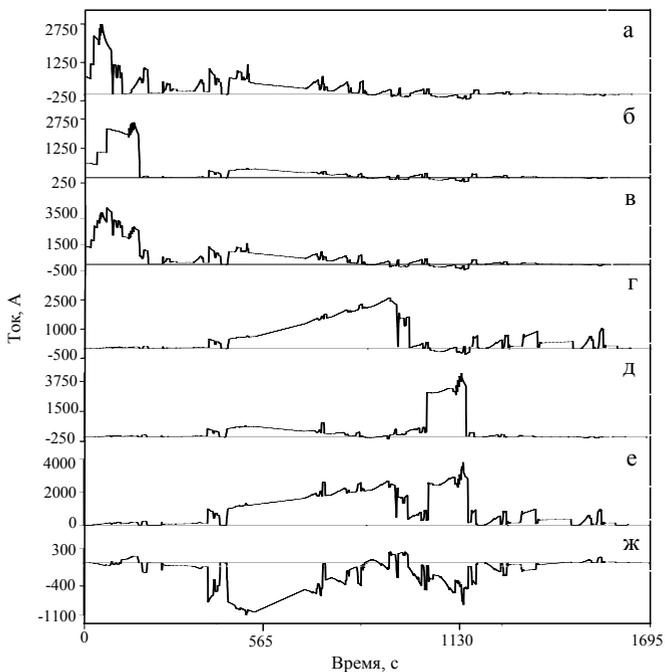


а – пассажирский электровоз; б - грузовой электровоз; в – электропоезд.

Рисунок 3 – Потери напряжения на токоприемниках

Так, при движении пассажирского электровоза в период времени с 450 до 900с наблюдается наибольший потребляемый ток и максимальные потери напряжения на участке пути с 8100 до 22500 м, что обусловлено движением

электровоза на подъеме. На участке пути с 11000 до 5500 м грузовой электровоз, движущийся в обратном направлении, рекуперировывает энергию в тяговую сеть, что приводит к снижению потерь напряжения на пантографе в период его движения, начиная с 900 по 1400с. Максимальный ток и характер потерь напряжения грузового электровоза на отрезке пути с 2500 до 700 м также обусловлен его движением на подъеме.



а, г – фидер 1 подстанции А и Б; б, д - фидер 2 подстанции А и Б; в, е – подстанция А и Б; ж – пост секционирования.

Рисунок 4 – Токи

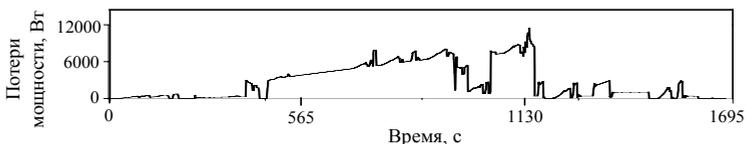


Рисунок 5 – Потери мощности в тяговой сети

Анализ кривых движения электропоезда (рис. 2 д, е) показывает, что частые пуски и остановки, вызванные графиком движения, приводят к броскам тока и к колебанию напряжения в контактной сети в пределах до

300 В (рис. 3в). Этим же обусловлен пульсирующий характер кривых тока на фидерах тяговых подстанций, что негативно сказывается на работе ЭПС и снижает к.п.д. тяговой сети (рис. 4, 5).

Интересно отметить, что броски тока и колебания напряжения в тяговой сети можно снизить, применив на электроподвижном составе, в частности на электропоезде, накопитель энергии, который должен накапливать энергию при торможении и при движении его на спуске, а также принимать энергию от других рекуперирующих поездов. Важной особенностью применения накопителя непосредственно на подвижном составе является тот факт, что энергия обмена при этом будет циркулировать в пределах ЭПС, и не будет поступать в тяговую сеть, что приведет к снижению потерь мощности в системе ЭПС-ТС в целом.

Однако, существуют некоторые несоответствия полученных результатов логике протекания процессов при движении поезда. Обращают на себя внимание колебания кривой тока грузового электровоза на участке пути с 2600 по 5400 м (рис. 6), обусловленные тем, что при расчетах принимается безынерционная связь между скоростью и силой тяги: снижение скорости ведет немедленно к снижению силы тяги, а следовательно и тока. В то же время система управления, стремясь поддержать фиксированную скорость - при малейшем изменении скорости в любую сторону от заданного значения, производит включение или отключение подпрограммы тяги, что естественно приводит к соответствующим колебаниям тока, которые в действительности не имеют места.

В случае, приведенном на рис. 6, система управления по описанным выше причинам вопреки логике увеличивает скорость движения перед остановочным торможением - два пика на кривой скорости (первый на отметке 4000 м, второй - 500 м). Наличие второго пика в кривой скорости приводит при расчетах к увеличению силы тяги, а следовательно и тока, что также является неоправданным. Введение же в систему управления блока прогнозирования движения значительно усложняет ПАК.

По нашему мнению, основная доля расхождений между виртуальной моделью и реальными параметрами движения поезда вносится отличием в управлении движением, так как в действительности в контур управления движением включен человек-машинист с его трудно формализуемым посредством четкой логики алгоритмом ведения поезда.

В частности, машинист при ведении поезда, руководствуется «режимной картой управления поездом», которая предполагает использование показателей по выполнению графика движения, затратам энергии на тягу, обязательных или рекомендуемых режимов ведения поезда, обеспечивающих минимальные продольные силы в составе. Кроме того, машинист дополнительно учитывает технические параметры разнотипного подвижного состава и пути, характеристики автотормозов и сцепных приборов, нормативы по устойчивости вагонов и пути, варианты

формирования составов, меняющиеся условия пропуска поездов, погодные условия и, основное, накопленный опыт ведения поездов.

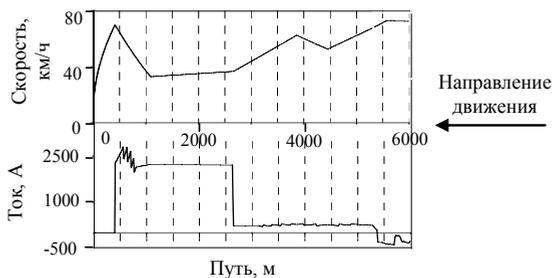


Рисунок 6 – Фрагмент рис. 2 в и г (станция Харьков)

Пути усовершенствования ПАК

Исходя из большой сложности модели ЭПС-ТС, существенной ее нелинейности, трудностей формализации, наличия различных субъективных критериев и ограничений в данной работе предлагается для автоведения поезда применить информационную модель управления движением на основе нечеткой логики и нейронных сетей. Такая модель, учитывая все изложенные положения, к тому же позволяет явно не вводить отбрасываемые «несущественные» факторы в математическую модель четкой части системы, а учитывать их влияние, допустив, что отклик модели может быть известным приближенно, нечетко. Важным преимуществом информационных моделей перед остальными является отсутствие ограничений на сложность исследуемых систем и отсутствие требования математического описания. Подобные модели основаны на гипотезе о существовании статистической связи между входом и выходом системы, то есть о существовании отображения входной информации в выходную. В нашем случае система управления движением поезда должна производить классификацию входных данных. Под классификацией понимается отнесение некоторого образа входных данных, выделенных и сгруппированных по определенным признакам, к классу, выполняемое по формальным правилам. В качестве классов, в нашем случае, выступают режимы движения поезда – тяга, неполная тяга, выбег, рекуперативное и механическое торможение, а также остановочное.

При разработке системы управления на основе нейро-нечеткой системы необходимы: формализация задачи и определение признакового пространства (поля входных данных); разбиение признакового пространства на классы; выделение нечетких правил для каждого из классов; синтез структуры нейро-нечеткой сети (определение числа слоев и количества нейронов в слое, активационных функций нейронов, топологии связи между

нейронами); настройка значений весовых коэффициентов нейронной сети (обучение сети).

Для автоведения поезда предлагается нейронная сеть (НС), использующая радиальные базисные функции (РБФ, RBF – Radial Basis Function network) [6,7].

Нейронная сеть обучается на основе данных задания и расчетных данных, поступающих из четкой части модели, данных полученных в результате поездок и словесного описания управления движением, полученного от машинистов-экспертов. Входными данными, используемыми для задания всех режимов, являются: разность заданной и текущей скоростей движения поезда, профиль пути, допустимое ускорение, ограничение на тягу (торможение) по сцеплению. При тяге учитываются тяговые способности электровоза, ограничения на ток и мощность тяговых электродвигателей, при торможении – тормозные возможности поезда.

Нечеткий контроллер должен состоять из набора условных лингвистических операторов или правил, задающих конкретные операции управления движением поезда. Эти условные лингвистические операторы могут быть получены на основе обработки данных из технических сведений на подвижной состав и его отдельные узлы, систему управления, а также на основе опроса машинистов по ведению поезда из соображений здравого смысла.

Выводы

Разработанный ПАК, позволяющий виртуально моделировать электрофизические процессы в системе ЭПС-ТС, дает достаточно достоверные результаты, не противоречащие общепринятым закономерностям протекания физических процессов. Однако, существует определенная доля расхождений между результатами виртуального моделирования и реальными параметрами движения поезда из-за несовершенства системы управления.

Предлагается для автоведения поезда применить информационную модель управления движением на основе нечеткой логики и нейронных сетей, которая позволит получить более достоверные данные, учитывающие руководящие указания машиниста по ведению поезда.

Список литературы: 1. Павловский В.В., Куденко Г.Е. Инженерный расчет потерь мощности и энергии в электрических сетях, основанный на моделировании установившихся режимов // Электрические сети и системы. -2004. -№3. –С 17-22. 2. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. М: Транспорт, 1987. -436с. 3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М: Транспорт 1985. - 287 с. 4. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М: Транспорт, 1982. -528 с. 5. Омельяненко В.И., Калужный Н.Н., Омельяненко Г.В., Любарский Б.Г. Основы электрической тяги, системы и режимы тяговых сетей постоянного тока. Харьков: Изд-во ХПИ, 2002. -164 с. 7. A.A.Al-Reib, X. Ma Application of artificial neural net-works in voltage stability assessment IEEE Trns. On Power Systems. Vol. 10, №4. Nov. 1995.

Поступила в редакцию 02.05.2011