© В.А. Курнаков, Е.В. Крутиков, 2007

УДК 621.355(06)

В.А. Курнаков, Е.В. Крутиков

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С АККУМУЛЯТОРНЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Семинар № 21

Задача экспериментального исследования режима работы аккумуляторной батареи (АБ) на транспортном средстве и его оптимизация подразумевает некоторый вероятностный режим разряда-заряда, соответствующий режиму движения транспортного средства. Режим работы АБ будет определяться током тягового электропривода как функцией времени при движении на вероятностном профиле пути.

Получить такую функцию времени позволяет Matlab-модель движения транспортного средства по сложному профилю пути с заданными вероятностными характеристиками [1]. Модель учитывает механическую инерционность электропривода и такие вероятностные характеристики профиля пути как математическое ожидание и дисперсия, подразумевая нормальное распределение величин уклона. В основе модели лежит уравнение движения транспортного средства:

$$\sigma \cdot \frac{d\upsilon}{dt} = f(\upsilon) - (\omega + i),$$

где $f(\upsilon)$ - удельное тяговое усилие как функция скорости, даН/т; ω - удельное основное сопротивление движению, даН/т; σ - удельная масса поезда, кг/т; υ - скорость движения поезда i - уклон пути в метрах на км.

Электропривод транспортного средства имеет механическую характеристику, представленную на рис. 1, и в приложении к аккумуляторному электровозу 8АРП-1, описана в табл. 1. [2]

Вводя в модель движения механическую характеристику в виде таблицы, получаем модели движения транспортного средства с электроприводом, обладающим заданной механической характеристикой, по профилю пути с заданными вероятностными характеристиками. Кроме того, дополним модель блоком для вычисления мощности, потребляемой электроприводом от аккумуляторной батареи, как:
P = F·υ.

Таблица 1
Механическая характеристика, приведенная к ободу колеса аккумуляторного электровоза 8АРП-1

υ, м/с	2.36	2.35	2.14	1.97	1.84	1.7	1.63	1.62	0
F, даН	0	600	770	1000	1260	1500	1760	1800	1810
f,даН/т	0	13.5	17.4	22.5	28.4	33.8	39.6	40.5	40.7

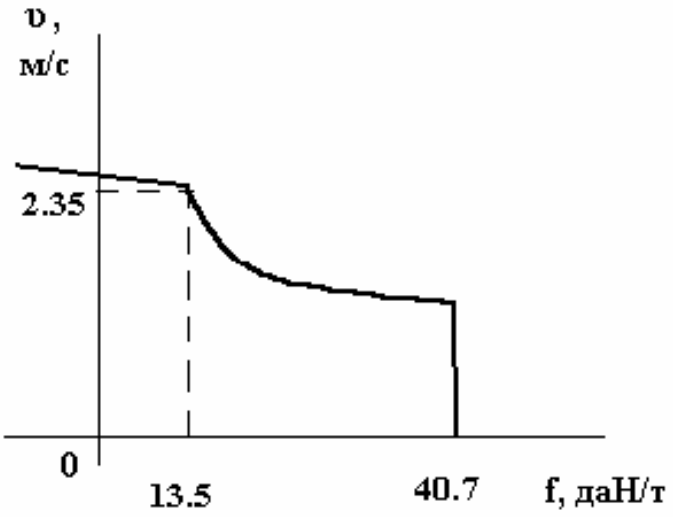

Рис. 1. Механическая характеристика тягового двигателя ЭДР-10, приведенная к ободу колеса аккумуляторного электровоза 8АРП-1

Будем относить такую мощность к номинальной мощности АБ, установленной на электровозе 8АРП-1 – 80ТНЖ-350. Номинал мощности АБ вычисляется через ток, проходящий через АБ и среднее напряжение на ней, которые по данным источника [2] при пятичасовом режиме:

$Pa_n = U_n I_n = 1.2В \cdot 80 \cdot 70А = 6720$ Вт.

Отношение механической мощности привода к номинальной мощности тока АБ $p = \dfrac{F \cdot \upsilon}{Pa_n}$ определяет, без учета КПД, мощность, снимаемую с АБ в долях от ее номинальной мощности. Приведенная к номинальной мощность тока АБ характеризуется универсальностью по отношению к различным АБ, приведенную мощность тока реальной АБ можно непосредственно переносить на небольшие экспериментальные физические модели.

Результатом работы компьютерной модели необходимо получить последовательность величин приведенной мощности АБ p через равные промежутки времени T_s, записанную в файл. Matlab-модель, расширенная такими возможностями, представлена на рис. 2.

Результатом работы модели получаем изменение приведенной мощности тока АБ во времени для отрицательного уклона, составляющего 20 % от удельного сопротивления движению графически показано на рис. 3. Значения приведенной мощности записываются в текстовый файл через равные промежутки времени T_S, меньшие чем минимальное время прохождения отрезка пути с постоянным уклоном.

Для целей экспериментального исследования режима работы АБ величина приведенной мощности тока АБ является вполне достаточной. Из условия равенства приведенных мощностей тока для реальной и лабораторной аккумуляторных батарей запишем:

$$\frac{n1 \cdot U1 \cdot I1}{n1 \cdot U1_n \cdot I1_n} = \frac{n2 \cdot U2 \cdot I2}{n2 \cdot U2_n \cdot I2_n},$$

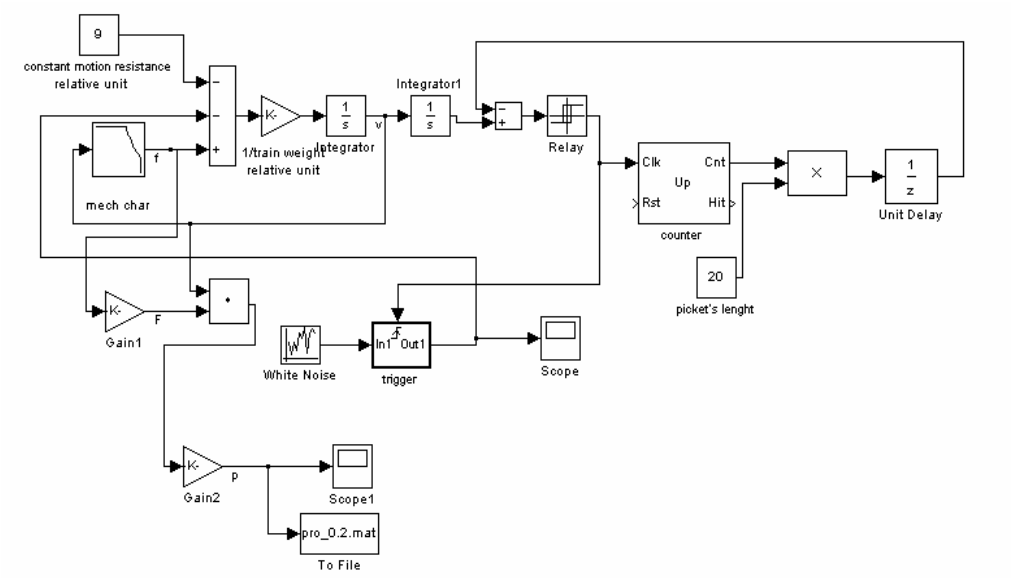

Рис. 2. Компьютерная модель движения транспортного средства по сложному профилю пути с учетом механической характеристики привода

где $n1, n2$ - число ячеек соответственно реальной и лабораторной АБ, $U1, U1_n$ - текущее и номинальное напряжение ячейки реальной АБ, $U2, U2_n$ - текущее и номинальное напряжения ячейки лабораторной АБ, $I1, I1_n$ - мгновенный и номинальный токи реальной АБ, $I2, I2_n$ - мгновенный и номинальный токи лабораторной АБ. Номинальные напряжения одной ячейки для аккумуляторов одинаковой электрохимической системы равны $U1_n = U2_n$. Принимаем неизменность напряжений реальной и экспериментальной батарей за все время движения транспортного средства $U1 = U2 = const$. Тогда критерий подобия реальной и лабораторной АБ по равенству приведенных мощностей тока примет вид:

$$\frac{I1}{I1_n} = \frac{I2}{I2_n}.$$

Тогда расчет тока экспериментальной АБ будем вести по формуле:

$$I2(t) = \frac{p(t)U2_n I2_n}{U2},$$

принимая напряжение на АБ равным номинальной величине получаем:

$$I2(t) = p(t)I2_n \qquad (1)$$

Величина тока заряда и разряда, устанавливается коэффициентом заполнения при ШИМ- управлении. То есть, полученная по формуле (1) величина тока должна будет пересчитываться на соответствующий коэффициент заполнения ШИМ- регулятора. Связь между величиной среднего за период тока силового ключа и коэффициентом заполнения при неизменном напряжении источника зарядного тока и постоянном разрядном сопротивлении линейна в обоих направлениях. В зависимости от параметров принципиальной электрической схемы лабораторной установки номинальному току АБ $I2_n$ будет соответствовать не-

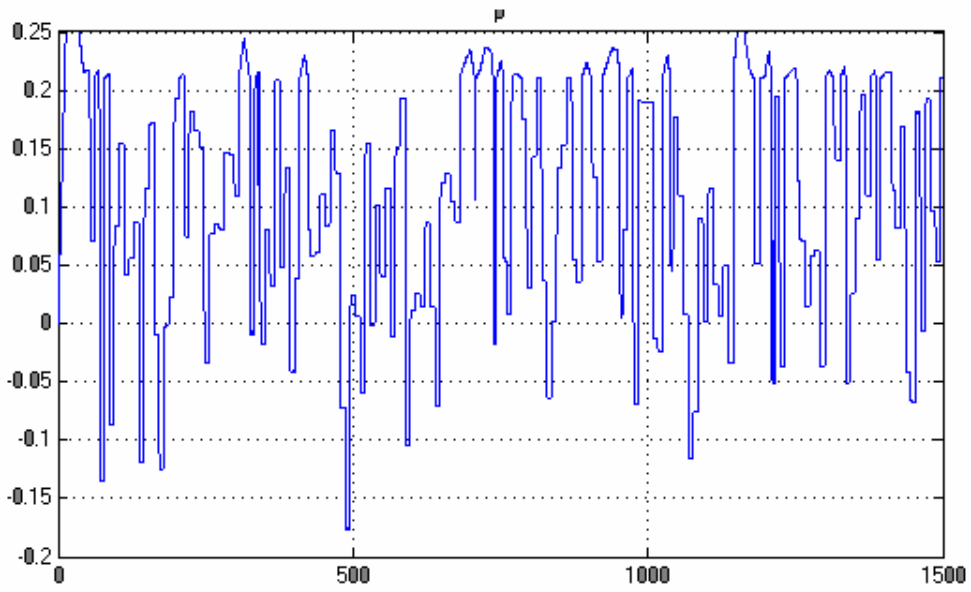

Рис. 3. Приведенная мощность тока АБ как функция времени

который коэффициент заполнения ШИМ-регулятора λ_n. Соответственно некоторое текущее значение тока $I2(t)$ определяется текущим значением коэффициента заполнения λ.

$$\frac{\lambda}{\lambda_n} = \frac{I2}{I2_n}.$$

Тогда вычисление текущего значения коэффициента заполнения, учитывая соотношение (4.1) выполняется по простой формуле:

$$\lambda(t) = \lambda_n p(t), \qquad (2)$$

где $p(t)$ - текущее значение тока АБ, выраженное в долях от номинала. Принимаем равенство номиналов зарядного и разрядного токов АБ, на равенство номинальных зарядного и разрядного токов указывают данные источника [2], что также согласуется с тем фактом, что приближенно равны скорости зарядного и разрядного процессов. Тогда номинальные величины коэффициентов заполнения зарядного и разрядного ШИМ также будут равны. Напряжение источника зарядного тока и разрядное сопротивление должны выбираться так, чтобы номинальному току экспериментальной АБ соответствовал коэффициент заполнения близкий к единице, поскольку, как показывает моделирование, приведенная мощность тока АБ единицы не превышает. Формула (2) дает величину коэффициента заполнения зарядного и разрядного ШИМ экспериментальной установки, предполагая постоянство напряжения на клеммах АБ. Для учета нелинейного характера изменения поляризации АБ, будем измерять напряжение на АБ U_b и пересчитывать коэффициент заполнения ШИМ с учетом изменения этого напряжения.

Для зарядного ШИМ в среднем за период тока:

$$\lambda U = IR + Ub,$$

где I - ток АБ. Для разрядного ШИМ в среднем за период тока:

$$\lambda Ub = I(R + Rp),$$

где Rp - активное сопротивление нагрузки. Коэффициент заполнения, соответствующий номинальной мощности тока экспериментальной АБ определится как:

$$\lambda_n = \frac{I_n R + Ub^n}{U}, \quad \lambda_n = \frac{I_n (R + Rp)}{Ub^n},$$

соответственно для зарядного и разрядного ШИМ, где I_n - ток АБ, выбранный как номинал, Ub^n - напряжение АБ, выбранное в качестве номинала. Текущее значение коэффициента заполнения зарядного ШИМ:

$$\lambda = p\left(\lambda_n \frac{Ub^n}{Ub} - \frac{(Ub^n)^2}{Ub \cdot U}\right) + \frac{Ub}{U}, \qquad (3)$$

где p - текущее значение приведенной мощности тока АБ, U - напряжение источника зарядного тока, Ub - текущее значение напряжения АБ. Та же величина для разрядного ШИМ:

$$\lambda = p\lambda_n \frac{(Ub^n)^2}{Ub^2}, \qquad (4)$$

Формулы (3-4) уточняют выражение (2), учитывая изменение напряжения АБ. Измерение текущего напряжения АБ Ub выполняется каждые T_s секунд в середине предыдущего интервала. Расчет по данным формулам пренебрегает изменением напряжения АБ в пределах периода T_s, величина λ вычисляется единожды для всего периода T_s. Применение формул (3-4) подразумевает предварительный запуск режимов заряда и разряда при номинальном коэффициенте заполнения. В режиме заряда подбирается такое напряжение источника зарядного тока U, чтобы номинальному коэффициенту заполнения соответствовал номинальный ток АБ. В режиме разряда происходит подбор разрядного сопротивления, определяющего номинальный разрядный ток АБ. В расчетах принимаем равенство номинальных зарядного и разрядного токов, а также номинального напряжения АБ. Таким образом, зная величины напряжения источника зарядного тока U, номинальный ток АБ I_n, номинальное напряжение АБ Ub^n, разрядное сопротивление Rp и измеряя текущее значение напряжения АБ Ub будем вычислять текущее значение коэффициента заполнения для зарядного и разрядного ШИМ, по формулам (3) и (4) соответственно. Алгоритм работы экспериментальной установки становится следующим: считываем из файла первое значение $p(t)$, измеряем напряжение на АБ и, в зависимости от знака, вычисляем коэффициент заполнения ШИМ, передаем знак тока и байт, кодирующий коэффициент заполнения, на МК, через T_s секунд процесс повторяется. Измерение напряжения АБ в течение промежутка времени T_s выполняется несколько раз и вычисляется среднее значение.

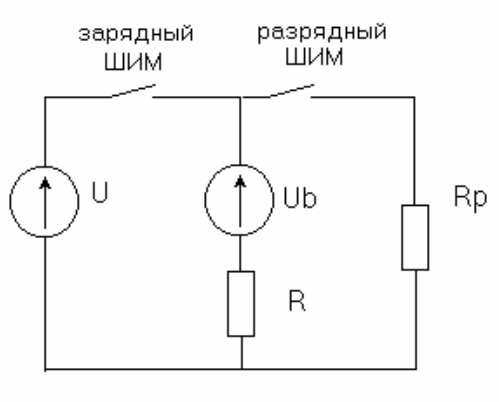

Рис. 4. К расчету коэффициента заполнения ШИМ

Схемное решение для реализации такого алгоритма можно получить, используя ПЭВМ как надсистему относительно микроконтроллера, управляющего зарядным и разрядным ШИМ. ПЭВМ возьмет на себя функции чтения файла с значениями приведенной мощности тока АБ и расчета коэффициента заполнения, и микроконтроллер выполняет все операции управления силовыми ключами. Микроконтроллер (МК) работает с текущим значением коэффициента заполнения, который вычисляется на основе измеренного напряжения АБ и текущего значения приведенной мощности тока аккумуляторной батареи, каждые T_S секунд на МК передается новое значение λ от ПЭВМ. Измерение напряжения АБ производится с помощью платы АЦП, включенной на ISA-шину ПЭВМ. Функции расчета коэффициента заполнения по формулам (3), (4) также возложены на ПЭВМ. МК используется только для управления силовыми ключами ШИМ с текущим заданным коэффициентом заполнения. Задействовав таймер-счет-чик микроконтроллера, есть возможность считывать с ПЭВМ информацию о текущем значении тока АБ во время импульса или паузы тока. Ограниченность этого промежутка времени говорит в пользу использования скоростного параллельного канала связи между МК и ПЭВМ. Такой канал связи обеспечивается параллельным портом ПЭВМ с одной стороны и восьмибитным портом МК - с другой. Управление режимом работы АБ сводится к управлению работой двух ШИМ-регуляторов: зарядного и разрядного. Низкое рабочее напряжение силовых ключей и возможно большие величины тока говорят в пользу применения полевых транзисторов в качестве ключей. Несколько управляющих линий порта МК дают возможность перенести аппаратные неудобства коммутации полевого транзистора в программную область, т. е. можно использовать по две управляющих линии на каждый ключ, один из сигналов заряжает емкость затвора, другой разряжает. В результате управление режимом АБ осуществляется четырьмя сигналами. Низкая емкость затвора полевого транзистора при управляющем напряжении около 10В и необходимость гальванической развязки указывают на логичность использования оптоэлектрических пар для управления ключами непосредственно с выводов порта МК. Тогда функциональная схема электрической части экспериментальной установки выглядит, как показано на рис. 5.

Программное обеспечение для ПЭВМ выполнено в среде разработки Visual Basic 6.0 и для работы с параллельным портом использует библиотеку динамической компоновки inpout32.dll. Текстовый файл, содержащий последовательность значений приведенной мощности тока АБ, обрабатывается в режиме последовательного доступа. Каждые T_s секунд программа считывает новое значение приведенной мощности, пересчитывает его в соответствующий коэффициент заполнения с использованием измеренной величины напряжения на АБ и передает число на МК в зависимости от знака приведенной мощности для зарядного или разрядного ШИМ. Рабочую частоту ШИМ-регулятора принимаем равной 200 Гц.

Программа для МК написана с использованием встроенного шестнадцатибитного таймер-счетчика Timer/Counter1.

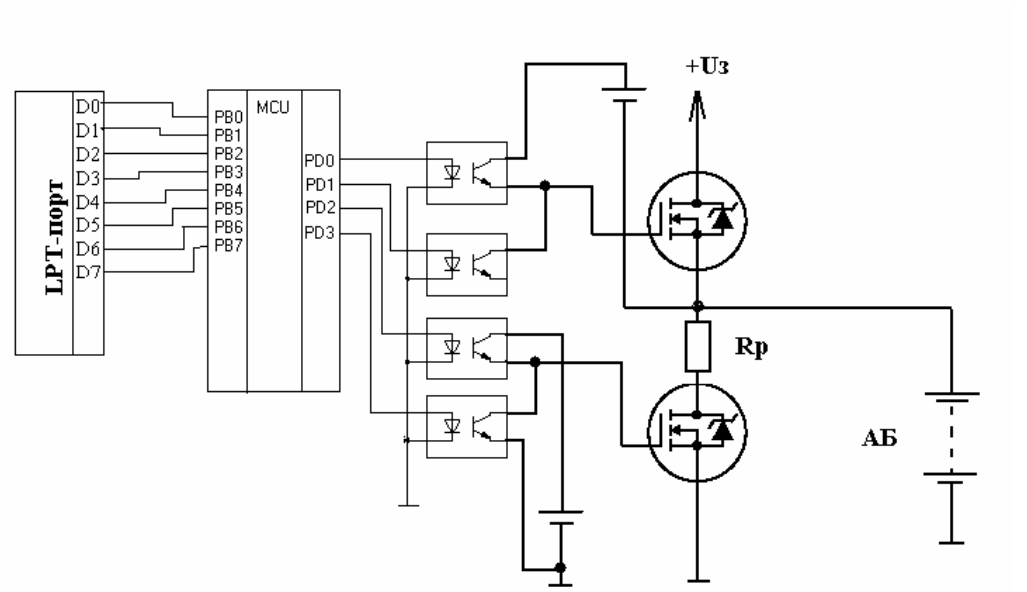

Рис. 5. Функциональная схема электрической части лабораторной установки с использованием ПЭВМ

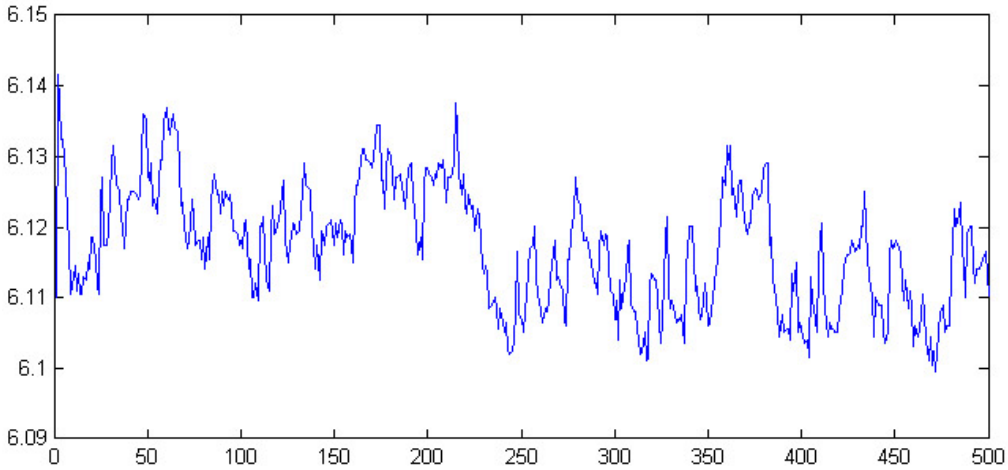

Рис. 6 Напряжение на АБ в процессе движения транспортного средства

Каждый новый период начинается по переполнению Timer/Counter1, продолжительность которого устанавливается однократно программным способом предделителем таймера. В нашем случае переполнение происходит каждые 6553.6 мкс, т. е. частота работы ШИМ соответствует 152.58 Гц. Продолжительность импульса устанавливается записью старшего байта регистра совпадения OCR1AH таймера-счетчика. Будем считать, что единичной приведенной мощности $p(t) = 1$ соответствует

число $\lambda_n = 255$, записанное в старший байт регистра совпадения. В прерывании по совпадению таймера и регистра совпадения затвор силового ключа включается на разряд, создавая паузу тока, прерывание по переполнению таймера инициирует следующий период тока. Выбор зарядного или разрядного ШИМ осуществляется по дополнительному сигналу от ПЭВМ.

В ходе физического моделирования через равные промежутки времени производится запись в текстовый файл величины напряжения на АБ. На рис. 6 приведен график изменения напряжения на АБ, соответствующий изменению приведенной мощности тока, изображенной на рис. 3.

Такие данные о величине напряжения АБ дают возможность изучать перспективы использования различных методов подзаряда АБ при нестационарном токе. Появляется основа для объективной оценки эффективности методов нестационарного заряда при случайном режиме нагружения и подзаряда АБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сташинов Ю.П., Крутиков Е.В.* Синтез профиля откаточного пути при моделировании движения рудничного поезда. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2005. Спецвыпуск. с. 124-128
2. *Справочник* по подземному транспорту // Под ред. Штокмана. ГИАБ

Коротко об авторах

Курнаков В.А., Крутиков Е.В. – Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасский политехнический институт).

Д И С С Е Р Т А Ц И И

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР РАН			
ГУЛЯЕВ Павел Николаевич	Разработка спектрально-акустичес-кого метода контроля изменения напряженного состояния углепородного массива при горных работах	25.00.20	к.т.н.