

УДК 629.424.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ В ПРОЦЕСІ РОЗРЯДУ/ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ПІД ЧАС ЗАПУСКУ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ

Д-ри техн. наук О.Б. Богаєвський, А.М. Борисенко, наук. співроб.
М.С. Войтенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРЯДА/ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ПРИ ЗАПУСКЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ

Д-ры техн. наук А.Б. Богаевский, А.Н. Борисенко, науч. сотруд.
М.С. Войтенко

INVESTIGATION OF ENERGY COSTS IN THE DISCHARGE / CHARGE BATTERY TO START DIESEL ENGINE

Doct. of techn. sciences A. B. Bogaevskiy, A.N. Borisenko, researcher M.S. Voytenko

Стаття присвячена теоретичному дослідженню факторів, що впливають на зниження експлуатаційних витрат палива в процесах запуску дизеля тепловоза і заряді акумуляторної батареї після запуску. Отримано вираження, що дозволяють у відносній формі зробити оцінку можливості зниження витрат палива при пуску за рахунок застосування сучасних систем управління. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування та контролю експлуатаційних характеристик тепловозних дизель-генераторів.

Ключові слова: акумуляторна батарея, ступінь зарядженості, заряд, розряд, витрати палива, витрати енергії, внутрішній опір.

Статья посвящена теоретическому исследованию факторов, влияющих на снижение эксплуатационных затрат топлива в процессах запуска дизеля тепловоза и заряде аккумуляторной батареи после запуска. Получены выражения, позволяющие в относительной форме произвести оценку возможности снижения затрат топлива при пуске за счет применения современных систем управления. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования и контроля эксплуатационных характеристик тепловозных дизель-генераторов.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, степень заряженности, заряд, разряд, затраты топлива, затраты энергии, внутреннее сопротивление.

The article is devoted to the theoretical study of the factors influencing the reduction of operational costs of fuel in the process of locomotive diesel engine start and charge the battery after starting. Obtained expressions for relative form to assess the possibility of reducing fuel costs

at the start due to the use of modern control systems. The results can be used to study and control of the performance of locomotive diesel generators.

Keywords: battery, state of charge, charge, discharge, cost of fuel, energy costs, internal resistance.

Вступ и постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Анализ последних исследований и публикаций. Среди суммарных затрат энергоресурсов в эксплуатационной работе тепловоза отдельно стоят затраты топлива на запуск дизеля. В литературе не встречается оценка доли затрат топлива при пуске в общем эксплуатационном расходе, очевидно в силу ее незначительности. В то же время, каждый запуск представляет собой существенную энергетическую нагрузку на такой важный элемент как аккумуляторная батарея (АБ), на восстановление заряда которого после пуска требуются определенные затраты топлива.

Существующие системы учета топлива не в состоянии регистрировать указанные топливные затраты, а также оценивать возможное снижение затрат топлива в процессе пуска.

Внедряемые на тепловозы в последние годы энергосберегающие технические системы осуществляют управление запуском тепловозного дизеля, его эксплуатационной работой, а также должны осуществлять контроль за длительностью работы дизеля на холостом ходу, контролируя при этом целый ряд параметров, в том числе и состояние АБ [1-3]. Этому вопросу в последнее время на транспорте уделяется значительное внимание [8,9].

Теоретическое исследование энергозатрат предполагает учет параметров АБ как элементов электрической цепи тепловоза при совместной работе со стартером (генератором) на борту тепловоза. Важнейшими из таких параметров АБ являются внутреннее сопротивление, напряжение на зажимах, которые изменяются в процессе разряда/заряда [4], зависят от степени заряженности, температуры окружающей среды и т.д. Предлагаемые методики определения внутреннего сопротивления, в частности [7], требуют сложного аппаратного обеспечения, длительного экспериментального исследования каждой АБ.

Целью работы является определение теоретическим путем уровня энергозатрат при запуске дизеля тепловоза и заряде

аккумуляторной батареи после запуска. Решение подобной задачи экспериментальным методом потребует существенных материальных и временных затрат из – за наличия среди элементов исследования аккумуляторной батареи. Полученные результаты позволят детализировать и возможно упростить алгоритмы систем управления и контроля тепловоза.

Основная часть исследования. Процесс запуска, как известно, реализуется как за счет энергии аккумуляторной батареи (АБ), так и за счет подачи топлива регулятором частоты вращения. За счет энергии АБ осуществляется предпусковая подготовка в течение времени до 60 с (прокачка масла и топлива), а также пусковое вращение коленчатого вала дизеля от стартера или от генератора, включенного в режиме стартера. Время работы стартера составляет не более 12-14 с. После запуска двигателя следует технологически необходимый отрезок времени работы дизеля на холостом ходу. В течение этого времени восстанавливается энергия и напряжение на АБ, осуществляется прогрев дизеля до необходимой температуры охлаждающей жидкости или масла, контролируется давление в тормозной системе и другие параметры.

Таким образом, величину затрат на запуск $B_{зап}$ можно представить в виде

$$B_{зап} = (g_{п} \cdot t_{п} + g_{хх} \cdot t_{т.хх}) \cdot n, \quad (1)$$

где $g_{п}$ – расход топлива на запуск в процессе вращения стартера;

$g_{хх}$ – расход топлива дизеля на холостом ходу в течение технологически необходимого времени после пуска;

$t_{п}$, $t_{т.хх}$ – время вращения стартера и технологически необходимое время работы дизеля на холостом ходу после пуска соответственно;

n – количество запусков дизеля тепловоза за смену.

Анализ составляющей $g_{п}$ в выражении (1) позволяет сделать вывод, что эта величина зависит от технического состояния дизеля и его подсистем, участвующих в пуске, и от состояния (степени заряженности) АБ. Так,

Рухомий склад залізниць

несостоявшийся из-за несоответствующего технического состояния дизеля запуск приводит помимо потерь топлива и к снижению энергии АБ. Поэтому следующий запуск будет происходить в худших условиях с точки зрения энергетического состояния АБ. Составляющая g_{II} может быть уменьшена существенно за счет применения соответствующих алгоритмов управления подачей топлива во время пуска.

Для определения технологически необходимого времени работы дизеля тепловоза на холостом ходу необходимо оценить расход энергии АБ при пуске, а также в процессе восстановления заряда АБ после запуска дизеля. В процессах разряда – заряда АБ необходимо иметь закономерности изменения внутреннего сопротивления как при разряде АБ, так и при ее заряде.

Значение внутреннего сопротивления АБ при разряде $r_{АБр}$ в общем случае зависит от природы и состава материалов, электролита, а также от размеров и конструкции АБ известно, что величина $r_{АБр}$, как и величина напряжения на клеммах АБ, зависит от степени заряженности Q . В табл. 1 приведена зависимость напряжения на клеммах стартерной (свинцово – кислотной) АБ от степени заряженности Q при температуре окружающей среды +20 °С (по

техническим материалам отечественного производителя аккумуляторов завода «Владар»).

В табл. 2 приведены результаты авторских расчетов зависимости $r_{АБр}$ от величины номинальной (паспортной) емкости стартерных свинцово – кислотных АБ и степени заряженности Q . Расчеты произведены на основании материалов [5, 6].

Вычисления проводились для аккумуляторных модулей различной электрической емкости $Q_{э}$ номинальным напряжением 2 В. Из табличного материала несложно определить примерное значение внутреннего сопротивления тепловозной АБ, которая состоит из 24-х последовательно соединенных аккумуляторных модулей с паспортными параметрами – «450 А·ч ; 4 В». Внутреннее сопротивление одного блока на 4 В близко по значению табличному, которое приведено в табл. 2 для емкости 450 А·ч. Таким образом, сопротивление всей АБ номинальным напряжением 96 В составляет величину 0,05328 Ом (24·0,00222) для степени заряженности модуля Q 100 % (т.е. $Q=1,0$) при температуре окружающей среды +20 °С.

Таблица 1

Зависимость напряжения на клеммах стартерной (свинцово – кислотной) АБ от степени заряженности Q

Напряжение АБ, В	Номинальное напряжение АБ			
	12 В	24 В	90 В	96 В
Степень зарядж., Q				
1,00	12,70	25,40	95,25	101,60
0,95	12,64	25,25	94,80	101,12
0,90	12,58	25,16	94,35	100,64
0,85	12,52	25,04	93,90	100,16
0,80	12,46	24,92	93,45	99,68
0,75	12,40	24,80	93,00	99,20
0,70	12,36	24,72	92,70	98,88
0,65	12,32	24,64	92,40	98,56
0,60	12,28	24,56	92,10	98,24
0,55	12,24	24,48	91,80	97,92
0,50	12,20	24,40	91,50	97,60
0,40	12,12	24,24	90,90	96,96
0,30	12,04	24,08	90,30	96,32
0,20	11,98	23,96	89,86	95,84
0,10	11,94	23,88	89,55	95,52

Зависимость изменения $r_{АБр}$ стартерной (свинцово – кислотной) АБ от степени заряженности Q для различных значений электрической емкости $Q_{эл}$

$r_{АБр}$, Ом	$Q_{эл}$, А-ч							
	7	20	44	60	80	100	450	900
1	0,1430	0,05000	0,023000	0,017000	0,012500	0,010000	0,00222	0,001110
0.95	0,1498	0,05238			0,013096	0,010476	0,002326	
0.90	0,1574	0,05503			0,013758	0,011006	0,002443	
0.85	0,16585	0,05799			0,014497	0,011600	0,002575	
0.80	0,17537	0,06132			0,015330	0,012264	0,002723	
0.75	0,18616	0,065092			0,016273	0,013018	0,00289	
0.70	0,19882	0,069516	0,031606	0,023170	0,017379	0,013903	0,003086	0,001545
0.65	0,21342	0,074621			0,018655	0,014924	0,003313	
0.60	0,23045	0,080577			0,020144	0,016115	0,003577	
0.55	0,25058	0,087616			0,021904	0,017523	0,003890	
0.50	0,27474	0,096063			0,024016	0,019212	0,004265	
0.40	0,34117	0,119291			0,029823	0,023858	0,005296	
0.30	0,45189	0,158000			0,039501	0,031601	0,007015	
0.20	0,67446	0,235830			0,058957	0,047165	0,010471	
0.10	1,34443	0,470079	0,214000	0,157000	0,11752	0,094016	0,020871	0,010436

Общее сопротивление цепи разряда АБ на момент начала пуска («страгивания») дизеля r_p можно представить в виде

$$r_p = r_{АБр} + r_{я} + r_{доб} + r_{не}, \quad (2)$$

где $r_{АБр}$ – внутреннее сопротивление АБ при разряде;

$r_{я}$, $r_{доб}$, $r_{не}$ – сопротивления обмотки якоря стартера, добавочного балласта и обмотки последовательного возбуждения соответственно.

Для основной массы тепловозов общее сопротивление разряда составляет величину порядка 0,07÷0,08 Ом. Для тепловоза 2ТЭ116 величина этого сопротивления составляет 0,07123 Ом.

Необходимую энергию для одного запуска тепловозного дизеля $W_{зап}$ можно представить в виде суммы

$$W_{зап} = W_{мн} + W_1 + W_2, \quad (3)$$

где $W_{мн}$ – энергия на прокачку масла перед запуском в течение около 60 с, мощность насоса прокачки составляет 1,0 кВт;

W_1 – энергия на трогание стартера (и собственно дизеля), длительность отрезка времени 0,3 с;

W_2 – энергия на вращение стартера в течение 12 с.

Ориентировочные значения составляющих выражения (3) можно определить из приведенных формул

$$\begin{aligned} W_1 &= U_{АБном} \cdot I_{ст.макс.} \cdot t_{тр} \\ W_2 &= U_{АБном} \cdot I_{ст.ном.} \cdot t_{вр} \\ W_2 &= P_{мн} \cdot t_{мн} \end{aligned} \quad (4)$$

где $U_{АБном}$ – номинальное значение напряжения АБ, В;

$I_{ст.макс.}$ – максимальное значение тока через стартерную обмотку, составляет величину от 1300 А для ЧМЭЗ до 1600 А для 2ТЭ116;

$I_{ст.ном.}$ – номинальный ток стартера, составляет величину для 2ТЭ116 800 А;

$P_{мн}$ – мощность насоса прокачки масла;

$t_{тр}$, $t_{вр}$, $t_{мн}$ – время трогания, вращения стартера и прокачки масла соответственно.

Затраты электрической энергии на один пуск тепловозного дизеля по выражениям (4) составляют величину 285, 5 Вт·час (расчет сделан для случая тепловоза 2ТЭ116). Такие же примерно затраты имеют место в случае других моделей тепловозов.

Для дальнейших рассуждений необходимо учитывать, что в АБ должна быть запасена энергия на 10–12 последовательных запусков. При этом степень разряда батареи не должна быть

Рухомий склад залізниць

более 0,5, так как в противном случае в батарее будут иметь место невосстановимые в процессе заряда разрушения. С учетом изложенного можно утверждать, что энергия, запасенная в АБ на 10–12 последовательных запусков должна составлять величину 5710 – 6852 Вт·час.

Расчеты затрат энергии на несколько последовательных запусков (без восстановления энергии после пуска) следует проводить с учетом снижения значения запасенной энергии, так как после каждого цикла запуска изменяется в сторону увеличения внутреннее сопротивление АБ и в сторону уменьшения напряжение на клеммах АБ в соответствии с табл. 1 и 2.

При расчете электрических параметров на каждом из последовательных циклов запуска необходимо учитывать напряжение и внутреннее сопротивление АБ на начало цикла с учетом степени разряда. Каждый последовательный запуск снижает степень заряженности АБ примерно на 5 %.

Возврат энергии в АБ при заряде после запуска обеспечивается от тепловозного регулятора напряжения, который формирует постоянное бортовое напряжение величиной 110 В. На ток в цепи заряда влияют как напряжение на клеммах батареи, так и сопротивление цепи заряда АБ. Напряжение на клеммах АБ в процессе возврата энергии изменяется в сторону увеличения по мере роста степени заряженности (см. табл. 1). Сопротивление заряда состоит из постоянного ограничивающего балластного

сопротивления $R_{бал}$ и внутреннего сопротивления заряда АБ $r_{АБз}$.

Величина балластного сопротивления в различных типах тепловозов составляет величину 0,175 Ом (для ЧМЭЗ) и 0,178 Ом (для 2ТЭ116).

Характер изменения внутреннего сопротивления заряда АБ $r_{АБз}$ как элемента электрической цепи в литературе практически не освещен. Эксперимент позволил установить, что в процессе заряда $r_{АБз}$ изменяется от величины, которая значительно меньше величины $R_{бал}$, до величины, которая существенно больше, чем величина $R_{бал}$. Случай $r_{АБз} \ll R_{бал}$ имеет место в начале процесса заряда; случай $r_{АБз} \gg R_{бал}$ имеет место в конце процесса заряда. Ток заряда изменяется от максимальной величины, которая определяется величиной балластного сопротивления, до минимальной величины, которая определяется уже величиной внутреннего сопротивления заряда АБ $r_{АБз}$.

Учитывая сложный характер изменения $r_{АБз}$ в процессе заряда АБ оценка временных затрат работы дизеля на холостом ходу для восстановления заряда в данной статье произведена в предположении, что ток заряда определяется постоянным сопротивлением $R_{бал}$. Результаты оценки необходимого времени работы дизеля на холостом ходу для восстановления энергии АБ после запуска приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты оценки времени восстановления энергии АБ в процессе заряда.

Номер цикла заряда	Степень заряженности, Q	$U_{АБ}$, В	Ток заряда I_z , А	Время заряда, $t_{зар}$, мин.
1	0,75	99,20	60,70	2,84
2	0,80	99,70	57,86	2,97
3	0,85	100,16	55,28	3,10
4	0,90	100,70	52,247	3,36
5	0,95	101,00	50,56	3,35
6	1,00	101,60	47,19	3,57
				Σ 19,09

Время $t_{зар}$ соответствует технологически необходимому времени работы двигателя на холостом ходу после

пуска в выражении (1). Расчет проводился для температуры окружающей среды +20 °С.

При расчете принималось, что за каждый цикл происходит возврат энергии и,

соответственно, степень заряженности увеличивается на 5 %.

Данные табл. 3 позволяют увидеть, что если степень заряженности АБ составляет 0,75, то для восстановления энергии АБ дизель тепловоза должен проработать на холостом ходу не менее 19,09 мин.

Также необходимо отметить, что к батарее постоянно подключены различные потребители, а именно: цепи автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН), радиостанция, балластные выравнивающие сопротивления, цепи освещения тепловоза. Т.е. имеем одновременное протекание процессов как заряда АБ от регулятора напряжения, так и разряда для питания указанных потребителей. Указанное обстоятельство, а также наличие внутреннего сопротивления заряда АБ $r_{АБ}$ со сложным характером изменения, безусловно повлияют на увеличение расчетных времен, которые приведены в табл. 3. Таким образом, приведенные в таблице 3 расчетные отрезки времени работы дизеля на холостом ходу представляют собой минимально необходимые величины.

Полученное минимальное технологически необходимое время работы дизеля тепловоза на холостом ходу после пуска (среднее значение по данным табл. 3 составляет не менее 3 мин) позволяет убедиться в том, что затраты топлива на процесс запуска незначительны в сравнении общими эксплуатационными затратами. Это время является одним из контрольных параметров алгоритма работы системы управления пусками и остановами дизель – генератора. Через указанное время система управления контролирует температуру масла и давление в тормозной системе. Если эти величины достигли требуемых значений, то система выдает сигнал разрешения на нагружение дизель – генератора. Если температура масла и давление в тормозной системе не достигли необходимых для работы величин, то время работы на х.х.

после запуска длится до момента достижения параметрами требуемых величин. В случае холодной машины время работы после запуска может быть существенно больше, чем 3 мин.

Использование методик, приведенных в [1,2] позволяет оценить влияние на возможность экономии топлива при запуске за счет применения алгоритма ограничения выхода реек топливных насосов. Использование алгоритмов ограничения максимальной цикловой подачи топлива (выхода реек топливных насосов) возможно по той причине, что предприятие – изготовитель дизеля механически ограничивает выход реек на уровне, который обеспечивает номинальную мощность. Однако для запуска, такой выход реек является избыточным, даже для запуска холодной машины. Как показали проведенные авторами испытания в случае запуска прогретой машины достаточно обеспечить 60 % выхода реек от максимально разрешенного хода. С экологической точки зрения это особенно важно для тепловозов, которые работают в условиях карьеров, расположенных вблизи от жилых кварталов. При реостатных испытаниях снижение дымности отработанных газов можно оценивать даже визуально. Однако необходимо учитывать, что ограничение подачи топлива большее чем на 20 % технически может не обеспечить пуск среднестатистического дизеля тепловоза, особенно в холодное время года.

Выводы. Полученные в исследованиях статьи выражения и числовой материал позволяют оценить в относительной форме затраты топлива и затраты энергии АБ в процессе запуска дизеля тепловоза. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании характеристик алгоритмов функционирования систем управления и контроля тепловозных дизель – генераторов.

Список использованных источников

1. А.Б. Богаевский. Оценка возможности снижения расхода топлива дизель – генератора маневрового тепловоза за счет совершенствования управления / А.Б. Богаевский, А.М. Борисенко, М.С. Войтенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 1. – С. 105 - 109.

2. А.Б. Богаевский. Исследование влияния технических средств управления на повышение эксплуатационной экономичности маневрового тепловоза / А.Б. Богаевский,

А.В. Осичев, М.С. Войтенко // Вісник СХУ ім. В.Даля. Луганськ: СХУ ім. В.Даля. – 2013. – № 18(207), ч.2. – с. 177 – 182.

3. А.Б. Богаевский. Компьютерная модель мощного транспортного дизель-генератора с электронной системой управления./ А.Б. Богаевский.// Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», вып. 38, 2008. – с. 150 – 169.

4. Б.І. Байрачний. Технічна електрохімія. Ч.2. Хімічні джерела струму: Підручник.– Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 174с.

5. В.И. Косюк, И.Б. Широков. Устройство для измерения электрической емкости химических источников тока // Патент РФ №2328011 С2, опубликован в БИ № 17 2007 г.

6. В.И. Косюк. Устройство для измерения электрической емкости химических источников тока// Патент РФ №2248073 С9, опубликован в БИ № 14 2005 г.

7. Ю.А. Нечитайло. Методика определения состояния аккумуляторной батареи гибридного автомобиля/ Нечитайло Ю.А.//Вісник СевНТУ, вип..134/2012. –Севастополь, 2012. - с.139-142.

8. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. Гібридні автомобілі. – Харків: ХНАДУ, 2008. – 326 с.

9. О.П.Смирнов. Перспективы развития систем электропитания транспортных средств// Материалы доклада на конференции «Транспорт, экология – устойчивое развитие». – Варна, Болгария, 2008. – с. 295 – 301.

Богаевский Александр Борисович, доктор технических наук, профессор, кафедры автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина. Тел. (0953115314).

Борисенко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедры теоретических основ электротехники Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина

Войтенко Максим Сергеевич, научный сотрудник кафедры автоматизации и управления в технических системах Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина.

Bogaevsky Alexander B. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of automotive electronics Kharkov National Automobile and Highway University, Ukraine.

Borisenko Anatoly - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department Theory of Electrical, National Technical University "KPI", Kharkov, Ukraine.

Voytenko Maxim - researcher at the Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University "KPI", Kharkov, Ukraine.