

УДК 62-835:621.337.4

Д. Н. МИРОШНИК
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
den_mira@ukr.net

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЕЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Приведены аналитические расчеты потерь энергии аккумуляторной батареи, питающей тяговый электропривод переменного тока, для трех режимов ее разряда: с постоянством выходной мощности; с постоянством разрядного тока; с постоянством выходного напряжения. На основании расчетов обоснована целесообразность использования регулирования тока и напряжения аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, регулирование, мощность, ток, напряжение, потери энергии, тяговый электропривод.

Постановка задачи. Использование тяговой аккумуляторной батареи (АБ) в качестве источника энергии для автономных транспортных средств (электромобили, электрокары, электроциклы) предполагает учет особенностей ее работы, которые связаны с изменением энергетических показателей в зависимости от степени разряда. Так, например, у свинцово-кислотных батарей при степени разряда 90% внутреннее сопротивление увеличивается до 2.5 раз. Кроме того, поскольку тяговая батарея составлена из большого количества элементов, увеличивается вероятность возникновения явления «переплюсовки», когда напряжения элементов не складываются, а вычитаются. Тогда при одинаковой выходной мощности батареи $P_{2AB} = \text{const}$, снижение выходного напряжения источника энергии приведет к увеличению тока и дополнительному снижению напряжения. При этом существенно увеличиваются потери мощности аккумуляторной батареи [1].

Анализ предыдущих исследований и публикаций. В [2] показано, что для системы «тяговый асинхронный электропривод – аккумуляторная батарея» возможно применение законов разряда автономного источника энергии с постоянством тока ($I_{AB} = \text{const}$) или напряжения ($U_{AB} = \text{const}$). Технически данные решения реализуются с помощью двух внешних контуров регулирования соответствующих величин, а их применение связано с возможным уменьшением производительности транспортного средства. Таким образом, возникает противоречие, требующее дополнительных исследований в плане обоснования целесообразности применения системы управления с регулированием тока и напряжения АБ. Оно связано с тем, что уменьшение потерь мощности АБ при уменьшении производительности не является достаточным условием уменьшения потерь энергии источника.

Цель работы. Обоснование энергоэффективности использования внешних контуров регулирования тока и напряжения АБ.

Изложение основного материала. В качестве базовой в работе рассматривается свинцово-кислотная батарея PZS-630 (емкость $C_{AB} = 630 \text{ А} \cdot \text{ч}$, внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи из 60 элементов при 100% заряде $R_{AB100\%} = 0.07 \text{ Ом}$). В схеме силовых цепей тягового асинхронного электропривода используется автономный инвертор напряжения с повышающим импульсным преобразователем на входе [3].

Допущения, принятые при обосновании законов разряда АБ:

1. КПД двигателя и преобразователя не изменяются и приблизительно равны своим номинальным значениям.
2. Рассматривается поступательное движение транспортного устройства с установившейся скоростью вращения при одинаковом моменте сопротивления.
3. Рассматривается аварийный разряд АБ до 10%, ее внутреннее сопротивление при этом $R_{AB10\%} = 0.17 \text{ Ом}$, кроме того, учитывается «переплюсовка» 3 из 60 элементов (выходное напряжение АБ меньше на 12-13 В).

На рис.1 представлены три режима разряда АБ: 1) $P_{2AB} = \text{const}$ (электропривод работает с заданной производительностью без учета тока и напряжения АБ); 2) $I_{AB} = \text{const}$ (электропривод уменьшает мощность за счет снижения U_{AB}); 3) $U_{AB} = \text{const}$ (уменьшается I_{AB}).

При разряде батареи до 50%, ее внутреннее сопротивление практически не изменяется и, очевидно, все три закона ее разряда находятся в т.А. При снижении напряжения батареи в тяговом электроприводе возможно обеспечение поддержания заданного значения напряжения на статоре двигателя за счет применения повышающего импульсного преобразователя. Таким образом, в тяговом электроприводе компенсируется снижение напряжения АБ. При этом ток АБ увеличивается до величины I_{AB1} , а напряжение уменьшается до значения U_{AB1} . Это, в свою очередь, требует соответствующего завышения мощности, габаритов и стоимости импульсного преобразователя.

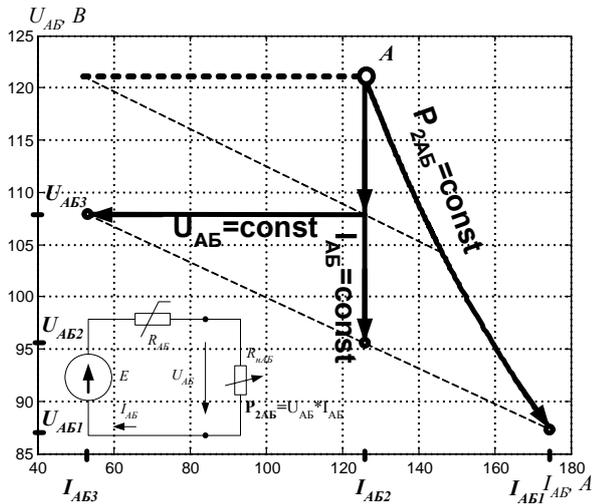


Рисунок 1 – Внешние характеристики АБ в процессе ее разряда по трем разным законам

(полезная работа), зависит от угловой скорости ротора ω (момент сопротивления - постоянный), которая прямопропорциональна изменению $P_{2AB} = U_{AB} \cdot I_{AB}$; ΔW – потери энергии АБ;

Для i-го режима разряда энергия, затраченная АБ по перемещению транспортного средства, зависит от времени:

$$W_{(i)} = E \cdot I_{AB(i)} \cdot t_{(i)} = W_1(U_{AB1}) / (U_{AB(i)}),$$

где W_1 – энергия в режиме разряда $P_{2AB} = \text{const}$.

Следовательно, чем выше напряжение АБ тем меньше энергии затрачивается на одинаковое перемещение.

Потери энергии для i-го режима разряда АБ можно записать в виде:

$$\Delta W_{(i)} = E \cdot I_{AB(i)} \cdot t_{(i)} - I_{AB(i)} \cdot U_{AB(i)} \cdot t_{(i)} = (E \cdot I_{AB1} - U_{AB(i)} \cdot I_{AB1}) \cdot (U_{AB1}) / (U_{AB(i)}) \cdot t_1.$$

Количественное уменьшение потерь энергии относительно режима разряда $P_{2AB} = \text{const}$ не зависит от времени передвижения:

$$\Delta W_1 / \Delta W_{(i)} = (E - U_{AB1}) \cdot (U_{AB(i)}) / ((E - U_{AB(i)}) \cdot (U_{AB1})).$$

Полезная энергия ($\omega \cdot t_i = \text{const}$) и потери энергии АБ ($\Delta P_{AB} \cdot t_i$) для трех рассматриваемых законов разряда представлены на рисунке 2.

При разряде АБ выше 50% закон $I_{AB} = \text{const}$ обеспечивает снижение потерь энергии автономного источника в сравнении законом $P_{2AB} = \text{const}$ поскольку снижение разрядного тока $I_{AB1} > I_{AB2}$ сопровождается увеличением напряжения $U_{AB2} > U_{AB1}$ (рис.1). Таким образом, $I_{AB1} / I_{AB2} > \omega_1 / \omega_2$, $\Delta W_2 < \Delta W_1$.

С применением закона $U_{AB} = \text{const}$, $I_{AB2} > I_{AB3}$, $U_{AB3} > U_{AB2}$ (рис.1), $I_{AB2} / I_{AB3} > \omega_2 / \omega_3$, потери энергии снижаются в сравнении с законом $I_{AB} = \text{const}$ ($\Delta W_3 < \Delta W_2$).

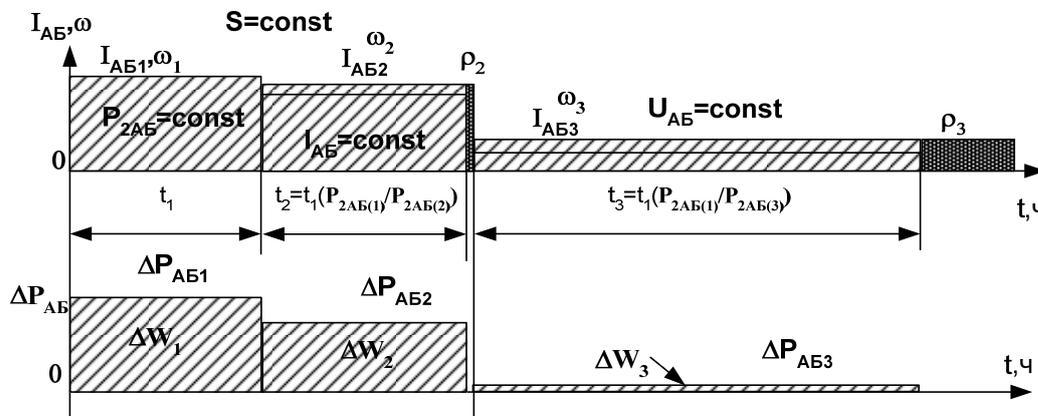


Рисунок 2 – Диаграммы работы системы «тяговый электропривод – аккумуляторная батарея»

Этого можно избежать, если ограничить ток АБ значением I_{AB2} . Тогда при незначительном снижении разрядного тока, напряжение АБ увеличивается в сравнении с первым режимом до значения U_{AB2} . При ограничении минимального значения напряжения АБ U_{AB3} , разрядный ток уменьшится до значения I_{AB3} .

На рисунке 1 показаны 2 случая регулирования выходного напряжения АБ. Так при отсутствии «переплюсовки» задание выходного напряжения $U_{AB}^* = 121$ В система уменьшает разрядный ток по мере разряда АБ, поддерживая выходное напряжение на заданном уровне. Когда же «переплюсовка» произошла, необходимо снижать заданное напряжение, чтобы избежать минимальных режимов разряда АБ, при которых КПД двигателя будет существенно снижаться.

Исходя из закона сохранения энергии:

$$W = \Delta W + S,$$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

где $W = E \cdot I_{AB} \cdot t$ – энергия, генерируемая источником; t – время прохождения заданного значения пути $S = \text{const}$

Количественное уменьшение потерь энергии АБ PZS-630 для рассматриваемых законов ее разряда показано в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета потерь энергии в АБ

Уменьшение потерь энергии R_{AB} , 0.07/0.17 Ом (АБ разряжена на 50/90 %)					
Величина	Обозначение	Переполюсовка	$P_{2AB}=\text{const}$	$I_{AB}=\text{const}$	$U_{AB}=\text{const}$
Выходная мощность АБ	P_{2AB} , кВт	нет ($U_{AB}^*=121 \text{ В}$)	15.2	15.2/13.7	15.2/6.3
		да ($U_{AB}^*=108 \text{ В}$)	13.7	13.7/12	13.7/6
Время	$t=t_1^*(P_{2AB(1)}/P_{2AB})$	нет ($U_{AB}^*=121 \text{ В}$)	t_1	$t_2=t_1^*/1.11$	$t_3=t_1^*/2.4$
		да ($U_{AB}^*=108$)	t_1	$t_2=t_1^*/1.14$	$t_3=t_1^*/2.3$
Путь, полезная энергия	$S=I_{AB}U_{AB}^*t$, [кВт*т]	нет ($U_{AB}^*=121 \text{ В}$)	$t_1^*15.2$	$t_1^*15.2$	$t_1^*15.2$
		да ($U_{AB}^*=108 \text{ В}$)	$t_1^*13.7$	$t_1^*13.7$	$t_1^*13.7$
Энергия источника	$W=I_{AB}E^*t$, [кВт*т]	нет ($U_{AB}^*=121 \text{ В}$)	$t_1^*16.35/18.8$	$t_1^*16.35/18.15$	$t_1^*16.35$
		да ($U_{AB}^*=108 \text{ В}$)	$t_1^*14.8/20.1$	$t_1^*14.8/16.8$	$t_1^*14.8$
Потери энергии источника	$\Delta W=W-S$, [кВт*т]	нет ($U_{AB}^*=121 \text{ В}$)	$t_1^*1130/3550$	$t_1^*1130/2985$	t_1^*1130
		да ($U_{AB}^*=108 \text{ В}$)	$t_1^*1130/5300$	$t_1^*1130/2985$	t_1^*1130
Уменьшение потерь энергии	$\Delta W/\Delta W_{(1)}$, о.е.	нет ($U_{AB}^*=121 \text{ В}$)	1	1/1.18	1/3.22
		да ($U_{AB}^*=108 \text{ В}$)	1	1/1.7	1/4.45

Из табл. 1 видно, что уменьшение потерь энергии АБ составит от 1.18 до 1.7 раз при применении закона $I_{AB}=\text{const}$, и от 3.32 до 4.45 раз с $U_{AB}=\text{const}$ при 90%-ом разряде автономного источника энергии (большим числом соответствует «переполюсовка» 3 из 60 элементов, меньшим – отсутствие «переполюсовки»).

Кроме того, при использовании закона $U_{AB}=\text{const}$ потери энергии АБ изменяться не будут ($\Delta W_3=\text{const}$ на рис.2) при изменяющейся производительности транспортного средства.

Сэкономленную энергию АБ, возможно преобразовать в дополнительную работу, при этом увеличится запас хода транспортного средства (на рис. 2 ρ_2 и ρ_3).

Выводы: 1. В работе обоснована энергоэффективность использования регулирования напряжения и тока АБ в тяговом асинхронном электроприводе при разряде источника энергии выше 50%. Их применение позволяет уменьшить потери энергии АБ до 4.45 раз при 90%-ом разряде источника, и, соответственно, увеличить запас хода автономного транспортного средства при соответствующих режимах разряда АБ;

2. при регулировании мощности тягового электропривода с постоянством напряжения аккумуляторной батареи, потери энергии АБ не зависят от изменяющегося ее внутреннего сопротивления, и для трех рассмотренных режимов работы будут минимальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шавёлкин А.А. Тяговый асинхронный электропривод с регулированием разрядного тока аккумуляторной батареи / А.А. Шавёлкин, Д.Н. Мирошник // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». - 2010. - № 28. - С. 351-352.
2. Шавёлкин А.А. Улучшение энергетических показателей многодвигательного тягового асинхронного электропривода с питанием от аккумуляторной батареи / А.А. Шавёлкин, С.С. Багдасарян, Д.Н. Мирошник // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». - 2011. - вип. 10(180). - С. 218-222.
3. Matsumoto S. Advancement of hybrid vehicle technology (TOYOTA MOTOR CORPORATION) / S. Matsumoto // 11th European Conference on Power Electronics and Application EPE. - Dresden, 2005.

REFERENCES

1. Shavyolkin A. A. Traction asynchronous electric drive with charge current control. Visnyk of national technical university «KhPI». Kharkiv: NTU«KhPI». 2010; №28; 351-352.
2. Shavyolkin A. A. An improvement of energy characteristics multi-engine traction electric drive with supply from charge battery / scientific works of the Donetsk national technical university . Series: «Electrical engineering and energetics». Donetsk: DonNTU. 2011; 10(180); 218-222.
3. Matsumoto S. (TOYOTA MOTOR CORPORATION), Advancement of hybrid vehicle technology. 11th European Conference on Power Electronics and Application EPE; Dresden; 2005.

Надійшла до редакції 30.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

Д. М. МИРОШНИК

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Енергетична ефективність акумуляторної батареї з регулюванням її струму і напруги в тяговому асинхронному електроприводі. Наведені аналітичні розрахунки втрат енергії акумуляторної батареї, що живить тяговий електропривод змінного струму, для трьох режимів її розряду: з постійністю вихідної потужності; з постійністю розрядного струму; з постійністю вихідної напруги. На основі розрахунків обґрунтована доцільність використання регулювання струму і напруги акумуляторної батареї.

Ключові слова: акумуляторна батарея, регулювання, потужність, струм, напруга, втрати енергії, тяговий електропривод.

D. MIROSHNYK

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

An Energy Effectiveness of the Charge Battery with its Current and Output Voltage Control in Traction Asynchronous Electric Drive. An energy losses analytical calculations of the charge battery feeding the traction electric drive of alternating current, for three modes of its category are given: with constancy of its power; with constancy of discharge current; with constancy of output voltage. As basic in work the lead-acid PZS-630 battery (capacity 630 Amper*hours, internal resistance of the charge battery from 60 elements is considered at 100% a charge is 0.07 Ohms). The assumptions accepted at justification of battery discharge operation modes: 1) the efficiency of the asynchronous engine and the converter do not change and are approximately equal to the nominal rates; 2) translation movement of the transport device with established rotation speed is considered at the identical static moment; 3) the emergency battery discharge mode up to 10%, its internal resistance is boosted up to 2.5 times, and "polarity reversal" 3 from 60 elements (the output battery voltage decrement by 12-13 V). In work it is shown that at the 50% discharge battery level, its internal resistance practically does not change, discharge battery current and output voltage control does not allow reducing energy losses. We proved an energy effectiveness of the discharge battery current and output voltage control in the traction electric drive of alternating current at the discharge battery level higher than 50%. Their application allows increasing a cruising range of the autonomous vehicle in these discharge battery modes. The charge battery energy losses do not depend on variable internal resistance, and for three considered operating discharge modes will be minimum at power control of the traction electric drive with constancy of the charge battery output voltage.

Key words: charge battery, control, output power, voltage, current, energy losses, traction electric drive.