

УДК62-83

В.А. Войтенко, канд. техн. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

***Аннотация.** Исследуется зависимость длины пути, который проходит электротранспортное средство, расходуя 1 Дж энергии, от его скорости движения, от параметров аккумуляторной батареи, параметров электропривода и момента нагрузки, формулируются рекомендации по выбору параметров электрооборудования электротранспортного средства и скорости его перемещения, при которых обеспечивается максимальный путь его перемещения.*

***Ключевые слова:** электротранспортное средство, аккумуляторная батарея, электропривод, угловая скорость, угол поворота, момент сопротивления, активное сопротивление, мощность, энергия..*

В.А. Войтенко, канд. техн. наук

ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТА

***Анотація.** Досліджується залежність довжини шляху, який проходить електричний транспортний засіб, витрачаючи 1 Дж енергії, від швидкості його руху, від параметрів акумуляторної батареї, параметрів електроприводу та моменту навантаження, формулюються рекомендації по вибору параметрів електрообладнання електричного засобу і швидкості його пересування, при яких забезпечується максимальний шлях його пересування.*

***Ключові слова:** засіб електричного транспорту, акумуляторна батарея, електропривод, кутова швидкість, кут повороту, момент опору, активний опір, потужність, енергія.*

V.A. Voytenko, PhD

OPTIMIZATION OF MOTION OF ELECTROMOBILE

***Abstract.** Dependence is investigated long to the way that passes electric vehicle, expending 1J of energy, from his rate of movement, from the parameters of storage battery, drive parameters and load torque, formulated to recommendation on the choice of parameters of electrical equipment of electric vehicle and speed of him moving, at that the maximal way of his moving is provided.*

***Keywords:** electric vehicle, storage battery, electric drive, speed, corner of turn, moment of resistance, pure resistance, power, energy.*

Введение. При эксплуатации электропривода важно выбрать режим работы, при котором будет получен наибольший эффект [1-11]. В частности, для электротранспортных средств (ЕТС) важно определить параметры движения, при которых будет достигнут наибольший пробег ЕТС при расходе 1Дж электрической энергии. Особенно это важно при эксплуатации электропривода с автономным источником энергии, запас которой ограничен. Например, важно обеспечить режим движения ЕТС, при котором будет достигнут наибольший пробег на одном заряде аккумуляторной батареи.

Целью работы является определение требований к значениям параметров движения ЕТС, при которых будет достигнут наибольший пробег при расходе 1Дж электрической энергии или на одном заряде аккумуляторной батареи.

Материалы исследования. Рассмотрим функциональную схему силового канала ав-

тономного электропривода, показанную на рис.1, который состоит из аккумуляторной батареи (АБ), преобразовательного устройства (ПУ) и электрического двигателя (Д). Поскольку потери энергии в передаточном механизме (ПМ) влияют на значение момента нагрузки на валу Д, то ПМ на рис.1 не показан. В соответствии с функциональной схемой электропривода электрическая энергия, накопленная в аккумуляторной батарее, потребляется электрическим двигателем, преобразовывается в механическую энергию, которая расходуется на выполнение работы по перемещению электромобиля на некоторое расстояние. Для упрощения будем рассматривать только установившийся режим работы электропривода, при котором энергия АБ расходуется так, чтобы обеспечить наибольшую дальность пробега электромобиля. Потери энергии в переходных режимах учитывать не будем.

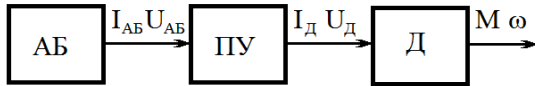


Рис.1. Функциональная схема автономного электропривода.

Мощность электрической энергии, которая потребляется электроприводом от АБ, определяется выражением:

$$P_{АБ} = I_{АБ} E_{АБ}, \quad (1)$$

где $I_{АБ}$, $E_{АБ}$ – ток, потребляемый от АБ и ЭДС АБ соответственно.

Мощность потерь электрической энергии в АБ определяется выражением:

$$\Delta P_{АБ} = I_{АБ}^2 R_{АБ}, \quad (2)$$

где $R_{АБ}$ – внутреннее активное сопротивление АБ.

Уравнение баланса мощности электрической энергии для системы «аккумуляторная батарея – преобразовательное устройство - двигатель» (АБ-ПУ-Д) принимает вид:

$$I_{АБ} E_{АБ} = I_{АБ}^2 R_{АБ} + I_{Д}^2 R_{ПУ} + I_{Д}^2 R_{Д} + I_{Д} E_{Д}, \quad (3)$$

где $R_{ПУ}$, $R_{Д}$, $E_{Д}$ – внутреннее активное сопротивление ПУ и Д, а также ЭДС, индуцируемая в силовой обмотке Д.

Учтём, что

$$E_{Д} = C_E \omega, \quad (4)$$

где C_E , ω – конструктивный коэффициент Д по ЭДС и угловая скорость вала двигателя.

Поскольку ток, потребляемый от АБ, зависит от тока, потребляемого двигателем, то упрощенное уравнение связи между ними можно получить на основании уравнения баланса мощности, потребляемой от АБ и мощности потребляемой Д при отсутствии потерь в системе АБ-ПУ-Д:

$$\begin{aligned} I_{АБ} E_{АБ} &\approx I_{Д} E_{Д}, \\ I_{АБ} &\approx I_{Д} \frac{E_{Д}}{E_{АБ}}. \end{aligned} \quad (5)$$

При выводе уравнения (5) мы пренебрегли потерей электрической энергии на активных сопротивлениях $R_{АБ}$, $R_{ПУ}$, $R_{Д}$.

С учётом (4) и (5) уравнение (3) принимает вид:

$$I_{АБ} E_{АБ} \approx \left(I_{Д} \frac{E_{Д}}{E_{АБ}} \right)^2 R_{АБ} + I_{Д}^2 (R_{ПУ} + R_{Д}) + I_{Д} C_E \omega,$$

$$I_{АБ} E_{АБ} \approx \left(I_{Д} \frac{C_E \omega}{E_{АБ}} \right)^2 R_{АБ} + I_{Д}^2 (R_{ПУ} + R_{Д}) + I_{Д} C_E \omega. \quad (6)$$

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем определяется формулой:

$$M_{EM} = C_E I_{Д}. \quad (7)$$

С учётом (7) выражение (6) принимает вид:

$$I_{АБ} E_{АБ} \approx \left(\frac{M_{EM} \omega}{E_{АБ}} \right)^2 R_{АБ} + \left(\frac{M_{EM}}{C_E} \right)^2 (R_{ПУ} + R_{Д}) + M_{EM} \omega. \quad (8)$$

Умножим (8) на время, в течение которого осуществляется перемещение электромотоцикла на расстояние S до полного разряда АБ:

$$I_{АБ} E_{АБ} t \approx \left(\frac{M_{EM} \omega}{E_{АБ}} \right)^2 R_{АБ} t + \left(\frac{M_{EM}}{C_E} \right)^2 (R_{ПУ} + R_{Д}) t + M_{EM} \omega t. \quad (9)$$

Количество энергии, накопленное в АБ можно представить следующим образом:

$$I_{АБ} E_{АБ} t = E_{АБ} C_{АБ}, \quad (10)$$

где $C_{АБ} = I_{АБ} t$ – заряд, накопленный в АБ или ёмкость химического источника тока.

Последнее слагаемое в правой части (9) можно представить в виде

$$M_{EM} \omega t = M_{EM} \varphi, \quad (11)$$

где $\varphi = \omega t$ – угол поворота вала двигателя, соответствующий перемещению электромотоцикла на расстояние S до полного разряда АБ.

С учётом (10) и (11) выражение (9) принимает вид:

$$E_{АБ} C_{АБ} \approx \left(\frac{M_{EM} \omega}{E_{АБ}} \right)^2 R_{АБ} t + \left(\frac{M_{EM}}{C_E} \right)^2 R_{\Sigma} t + M_{EM} \varphi, \quad (12)$$

где $R_{\Sigma} = R_{ПУ} + R_{Д}$ – суммарное активное сопротивление силовой цепи электропривода.

При движении ЭТС с постоянной скоростью электромагнитный момент, развиваемый двигателем, равен моменту сопротивления, который зависит от скорости движения. Поэтому можно записать

$$M_{EM} = a \omega^2 + b \omega + c, \quad (13)$$

где a – коэффициент вентиляторной составляющей момента нагрузки, b – коэффициент вязкого трения, $c = M_{СТ}$ – постоянная составляющая момента нагрузки на валу Д.

Учитывая то, что $t = \varphi / \omega$ уравнение (12) можно переписать в виде:

$$E_{АБ} C_{АБ} \approx \left(\frac{M_{EM} \omega}{E_{АБ}} \right)^2 R_{АБ} \frac{\varphi}{\omega} + \left(\frac{M_{EM}}{C_E} \right)^2 R_{\Sigma} \frac{\varphi}{\omega} + M_{EM} \varphi. \quad (14)$$

$$E_{AB}C_{AB} \approx \left(\frac{M_{EM}}{E_{AB}}\right)^2 R_{AB}\omega\varphi + \left(\frac{M_{EM}}{C_E}\right)^2 R_{\Sigma} \frac{\varphi}{\omega} + M_{EM}\varphi. \quad (15)$$

Решаем уравнение (15) относительно угла поворота вала двигателя

$$\varphi \approx \frac{E_{AB}C_{AB}}{\left(\frac{M_{EM}}{E_{AB}}\right)^2 R_{AB}\omega + \left(\frac{M_{EM}}{C_E}\right)^2 \frac{R_{\Sigma}}{\omega} + M_{EM}}. \quad (16)$$

С учётом (13) уравнение (16) принимает вид:

$$\varphi \approx \frac{E_{AB}C_{AB}}{\left(\frac{a\omega^2 + b\omega + c}{E_{AB}}\right)^2 R_{AB}\omega + \left(\frac{a\omega^2 + b\omega + c}{C_E}\right)^2 \frac{R_{\Sigma}}{\omega} + a\omega^2 + b\omega + c}. \quad (17)$$

Угол, на который поворачивается вал двигателя при расходе энергии 1 Дж, определяется формулой:

$$\varphi^* = \frac{\varphi}{E_{AB}C_{AB}} \approx \frac{1}{\left(\frac{a\omega^2 + b\omega + c}{E_{AB}}\right)^2 R_{AB}\omega + \left(\frac{a\omega^2 + b\omega + c}{C_E}\right)^2 \frac{R_{\Sigma}}{\omega} + a\omega^2 + b\omega + c}. \quad (18)$$

Умножим (18) на ρ – радиус приведения поступательного движения ЭТС к вращательному движению вала Д, и получим путь, который проходит ЭТС, расходуя 1 Дж энергии (удельное перемещение):

$$S^* = \rho\varphi^* \approx \frac{\rho}{\left(\frac{a\omega^2 + b\omega + c}{E_{AB}}\right)^2 R_{AB}\omega + \left(\frac{a\omega^2 + b\omega + c}{C_E}\right)^2 \frac{R_{\Sigma}}{\omega} + a\omega^2 + b\omega + c}. \quad (19)$$

Линейная скорость ЭТС определяется выражением:

$$V = \rho\omega. \quad (20)$$

Анализ (18) показывает, что при $\omega=0$ и при $\omega \rightarrow \infty$ путь, который проходит ЭТС, расходуя 1 Дж энергии, стремится к нулю. Следовательно, есть значение скорости, при котором путь, который проходит ЭТС, расходуя 1 Дж энергии, достигает максимума.

Рассмотрим пример. Электропривод ЭТС (трамвай массой 18000кг) [7] имеет следующие параметры: $E_{AB}=600В$; $R_{AB}=0,01Ом$; $R_D=0,0107Ом$; $R_{ПУ}=0,0093Ом$; $C_E=1,919 Вc$. Суммарный момент сил сопротивления, приведенный к валу двигателя, определяется формулой :

$$M_C = 0,001497\omega^2 + 0,316\omega + 121,522.$$

Поэтому на основании выражения (13) можно записать: $a=1,497 \times 10^{-3} Нмc^2$; $b=0,316 Нмc$, $c=121,522 Нм$. Радиус приведения $\rho=0,049 м$.

Определяем $R_{\Sigma}=R_D + R_{ПУ}$,

$$R_{\Sigma}=0,0107 + 0,0093=0,02 Ом.$$

Рассчитаем и построим график зависимости $S^*=f(\omega)$ по формуле (19). Зависимость $S^*=f(\omega)$ при $E_{AB}=600В$ показана на рис.2 (график 1).

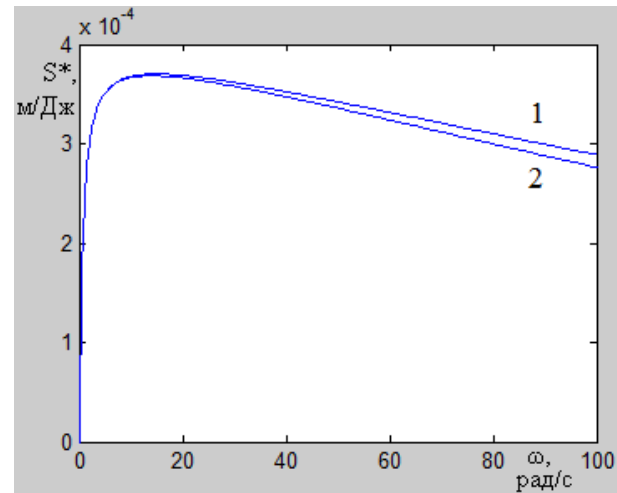


Рис.2. Зависимость $S^*=f(\omega)$

Максимальное удельное перемещение $S^*_{МАКС}=3,701 \times 10^{-4} м/Дж$ имеет место при $\omega=14,85 рад/с$. Этим значениям соответствует линейная скорость ЭТС $V=0,728 м/с$ (2,620 км/час). Если использовать АБ емкостью 100Ачас, то запас электрической энергии в АБ будет равен $216 \times 10^6 Дж$. Это позволит переместиться ЭТС на расстояние $S_{МАКС}=79,942 км$ при условии, что он будет двигаться со скоростью 2,620 км/час. Для этого ему понадобится 30,51 часа.

Рассмотрим влияние значения E_{AB} на зависимость $S^*=f(\omega)$. Для этого уменьшим E_{AB} в 10 раз и повторим расчёт (график 2 на рис.2). При $E_{AB}=60В$ максимальное удельное перемещение $S^*_{МАКС} = 3,683 \times 10^{-4} м/Дж$ имеет место при $\omega=14,01 рад/с$. Этим значениям соответствует линейная скорость ЭТС $V=0,686 м/с$ (2,470 км/час). Если использовать АБ с запасом электрической энергии $216 \times 10^6 Дж$, то это позволит переместиться ЭТС на расстояние $S_{МАКС}=79,553 км$ при условии, что он будет двигаться со скоро-

стью 2,470 км/час. Для этого ему понадобится 32,21 часа.

Выводы. Таким образом, путь, который проходит ЭТС, расходуя 1 Дж энергии, увеличивается при увеличении C_E , E_{AB} и ρ , при уменьшении R_Σ и R_{AB} , а также при уменьшении момента сопротивления (уменьшении коэффициентов a , b , c).

Анализ (18) показывает, что есть значение скорости, при котором путь, который проходит ЭТС, расходуя 1 Дж энергии, достигает максимума.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы как для ЭТС с автономными источниками энергии, так и для контактного городского электротранспорта (трамваи, троллейбусы, метро).

Список использованной литературы

1. Вершинин Д. В. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // Электромашинобуд. та електрооблад. – Киев: Наука і Техніка: – 2008. – Вып. 71. – С. 5–11.

2. Вершинин Д. В. Визначення параметрів бортового джерела живлення транспортногo засобу з електроприводом [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, Є. О. Смотров // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» – Львів: ЕКОінформ: – 2009. – С. 406–407.

3. Вершинин Д. В. Визначення параметрів основних вузлів електричної схеми електробуса [Текст] / Вершинин Д. В., Войтенко В. А., Смотров Є. О. // Электромашинобуд. та електрооблад. – Киев: Наука і Техніка: – 2009. – Вып. 74. – С. 10–17.

4. Вершинин Д. В. Визначення вимог до енергетичних параметрів електроприводу мотор-коліс електробуса [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, О. Г. Дашко, Є. О. Смотров // «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПИ»: – 2010, №28. – С. 303–304.

5. Войтенко В. А. К вопросу оптимизации параметров конденсаторной батареи автономного источника питания [Текст] / В. А. Войтенко // Электромашинобуд. та електрооблад. – Киев: Наука і Техніка: – 2010. – Вып. 76. – С. 87–93.

6. Войтенко В. А. Оптимізація параметрів конденсаторної батареї автономного джерела живлення електропривода електромобіля. [Текст] / В. А. Войтенко, В. А. Водичев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ: – 2012. – Вып. 3/2012 (19). – С. 261–263.

7. Байрыева Л.С. Электрическая тяга. Городской наземный транспорт. [Текст] / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко// – М.: Транспорт: – 1986. – 206 с.

8. Wei H. A. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor based on double current regulators [Text] / [H. A. Wei, P. A. Li, G. B. Liu and others]. – Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) //Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 31 (6): – 2010. – pp. 691–694.

9. Vitols K. PID regulator implementation for electric kart DC motor current stabilization [Text] / K. Vitols, N. Reinberg, I. Galkin // Elektronika ir Elektrotechnika. – New-York:– 2012. pp. 7–10.

10. Bernat J. Application of optimal current driver for the torque control of BLDC motor [Text] / J. Bernat, S. Stepień //Archives of Electrical Engineering, 60 (2).– Rome:– 2011. – pp. 149–158.

11. Ozturk S. B. a. Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor [Text] / S. B. a Ozturk, H. A. b Toliyat //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 16 (2), art. no. 5438764.– New-York:–2011. pp. 351–360.

Получено 22.02.2016

References

1. Vershinin D. V., Vodichev V. A., Voytenko V. A., Smotrov E.A. Ossobenosti vibora parametrov bortovogo istochnika pitaniya el-

ektrotransportnogo sredstva [Features of choice of parameters of side source of feed of electro-mobile], 2008), *Electromachinobuduvaniya ta electroobladnaniya*, Nauka I Tehnika Publ., Kiev, Ukraine, Vol. 71, pp. 5–11. (In Russian).

2. Vershinin D. V., Vodichev V. A., Voytenko V. A., Smotrov E.A. Vznahennya parametriv bortovogo dzerela zivlennya transportnogo zassobu z elektroprivodom [Determination of parameters of side source of feed of transport vehicle with electric drive], (2009), *Themachichnyy vipusk «Problemi automatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i practika» naukovo-technichnogo zurnalu «ElectroInform»*, EKOInform Publ., Lvov: Ukraine, pp. 406–407. (In Ukrainian).

3. Vershinin D. V., Voytenko V. A., Smotrov E.A. Vznachennya parametriv osnovnih vuzliv elektrichnoyi shemi elektrobusa [Determination of parameters of basic knots of the electric chart of electro bus], (2009), *Electromachinobuduvaniya ta electroobladnaniya*, Nauka I Tehnika Publ., Kiev, Ukraine, Vol. 74, pp. 5–11. (In Ukrainian).

4. Vershinin D. V., Vodichev V. A., Voytenko V. A., Dashko O.G., Smotrov E.A. Vznachennya vimog do energetichnih parametriv elektroprivodu motor–kolis elektrobusa [Determination of requirements to the power parameters of electric drive of motor-wheels of electro bus], (2010), «Problemi automatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i practika» *Visnik Nationalnogo technichnogo universitetu «Kharkovskiy polytechnichnyy institut», NTU «KhPI» Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 28, pp. 303–304. (In Ukrainian).

5. Voytenko V. A. K voprosu optimizatsiyi parametrov kondensatornoy batareyi avtonomnogo istochnika pitaniya [To the question of optimization of parameters of condenser battery of autonomous source of energy]. (2010), *Electromachinobuduvaniya ta electroobladnaniya*, Nauka I Tehnika Kiev Publ., Ukraine, Vol. 76, pp. 87–93. (In Russian).

6. Voytenko V. A., Vodichev V. A. Optimizatsiya parametriv kondensatornoyi batareyi avtonomnogo dzerela zivlennya elektroprivoda elektromobilya [Optimization of parameters of condenser battery of autonomous source of feed of electric drive of electro-mobile]. (2012), *Electromechanichni I energosberigayuchi systemi.*

Themachichnyy vipusk «Problemi automatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i practika» naukovo-virobnichogo zurnalu, KrNU Publ., Kremenchug, Ukraine, Vol. 3/2012 (19), pp. 261–263. (In Ukrainian).

7. Bayriyeva L.S., Shevchenko V.V. Elektricheskaya tiyaga. Gorodskoy nazemnyy transport [Electric traction. Public surface transport]. (1986), *Transport Publ.* Moscow, Russia. – 206 p. (In Russian).

8. Wei H. a. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor based on double current regulators [Text] / [H. a Wei, P. a Li, G. b Liu and others]. – *Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) //Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 31 (6).–2010.– pp. 691–694. (In English).

9. Vitols K. PID regulator implementation for electric kart DC motor current stabilization [Text] / K. Vitols, N. Reinberg, I. Galkin // *Elektronika ir Elektrotehnika.*– New-York. 2012. –pp. 7–10. (In English)

10. Bernat J. Application of optimal current driver for the torque control of BLDC motor [Text] / J. Bernat, S. Stepien // *Archives of Electrical Engineering*, 60 (2).– Rome.– 2011. – pp. 149– 158. (In English).

11. Ozturk S. B. a. Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor [Text] / S. B. a Ozturk, H. A. b Toliyat // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16 (2), art. no. 5438764.– New-York.2011. pp. 351–360. (In English).



Войтенко
Владимир Андреевич,
к.т.н., доцент кафедры
ЕМС КУ Одесского
национального политех-
нического университета.
тел. 048–7–058–467