

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БАГАТОДВИГУННОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

В. А. Войтенко, В. А. Водічев, Ю. О. Гогохія
Державний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Метою роботи є проведення оцінки енергетичних показників багатодвигунного електроприводу на підставі аналізу втрат енергії в тягових асинхронних електродвигунах різної потужності для міського транспортногo засобу. Для аналізу енергетичних процесів в асинхронному двигуні, на математичній моделі виконано розрахунок втрат енергії в багатодвигунному електроприводі автобуса з різною кількістю тягових асинхронних двигунів. Показано, що застосування багатодвигунного асинхронного електроприводу дозволяє зменшити втрати енергії в тягових асинхронних електродвигунах в сталих і в перехідних режимах роботи.

Ключові слова: автобус, асинхронний двигун, транспортний засіб, тяговий електропривод, потужність, втрати енергії, багатодвигунний електропривод.

Вступ

Зростаючі енергетичні та екологічні виклики змушують автовиробників приділяти все більшу увагу питанням розробки автомобілів і автобусів з електричною тягою. Якщо говорити про громадські автобуси, то при розробці електроприводу постає питання вибору такої структури електроприводу, яка забезпечить мінімальні втрати електричної енергії, що особливо важливо для транспортних засобів (ТЗ) з автономним джерелом енергії, запас якої обмежений. Мінімізація втрат електричної енергії дозволить збільшити дальність пробігу ТЗ. З метою зниження втрат може бути використано різну кількість двигунів в залежності від навантаження [1-4]. Навантаження двигунів автобуса залежить від кількості пасажирів і кута нахилу дороги.

При розробці електроприводу сучасного ТЗ в основному використовують асинхронні двигуни (АД) і синхронні двигуни. Аналізу потужності втрат, в яких присвячено безліч публікацій [5-16].

У роботах [17-18] було проведено дослідження, в якому визначено, що використання багатодвигунного електроприводу замість однодвигунного електроприводу в перехідних і сталих режимах при різних ситуаціях забезпечує економію електричної енергії.

Метою цієї роботи є визначення, при якому числі двигунів різної потужності в багатодвигунному електроприводі буде отримано найбільший енергетичний ефект.

© Войтенко В. А., Водічев В. А.,
Гогохія Ю. О., 2021

1. Об'єкт дослідження

Функціональна схема багатодвигунного тягового електроприводу показана на рис. 1. На рис. 2 показана функціональна схема багатодвигунного тягового електроприводу кожного ведучого колеса. На цих функціональних схемах прийняті наступні позначення: 1 - тягові електродвигуни; 2 - редуктор; 3 - карданний вал; 4 - механічний диференціал; 5 - піввісь ведучих коліс; 6 - ведучі колеса.

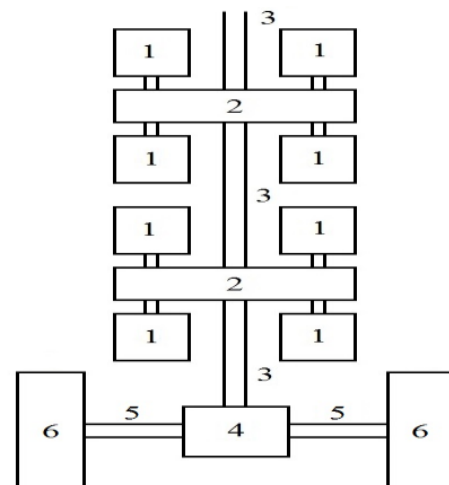


Рис. 1. Функціональна схема багатодвигунного тягового електроприводу

З рис.1 випливає, що для приведення в рух карданного валу і ведучих коліс ТЗ в багатодвигунному тяговому електроприводі необхідно використовувати редуктори з декількома входними валами

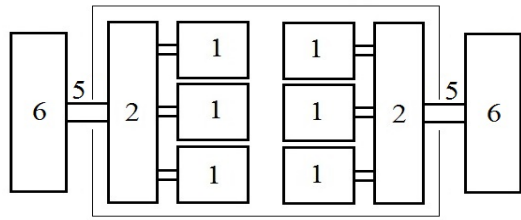


Рис. 2. Функціональна схема багатодвигунного тягового електроприводу кожного ведучого колеса

Аналіз енергетичних показників багатодвигунного електроприводу проведено на основі двоповерхового автобуса. Основні параметри якого наведені нижче.

Споряджена маса автобуса - 10000 кг. Повна маса автобуса - 17600 кг. Максимальне число пасажирів - 100 чоловік. Автобус оснащений двигуном внутрішнього згоряння потужністю 135 кВт.

2. Метод дослідження

Для оцінки енергетичної ефективності електричного приводу було проведено розрахунок втрат енергії в тяговому електроприводі. У MatLab в пакеті SimPowerSystems розроблена математична модель багатодвигунного електроприводу автобуса з різною кількістю тягових асинхронних двигунів. Для керування швидкістю двигунів використовується перетворювач частоти з пропорційним законом зміни напруги і частоти. У розрахунках враховувалася сила тертя кочення коліс автобуса по сухій асфальтованій горизонтальній дорозі, яка практично не залежить від швидкості руху транспортних засобів, і сила опору повітря, значення якої пропорційно значенням швидкості руху транспортних засобів в квадраті (рис. 4). Розрахунок проведено для сталих режимів руху з різними швидкостями і перехідних режимів прискорення.

При математичному моделюванні потужність втрат енергії в стали АД (рис. 5) визначалася за формулою:

$$\Delta P_c = \Delta P_{c,n} \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1,n}} \right)^2 \frac{\Omega_{0\text{эл}}}{\Omega_{0\text{эл},n}} \left(0,7 + 0,3 \frac{\Omega_{0\text{эл}}}{\Omega_{0\text{эл},n}} \right)$$

де $\Delta P_{c,n}$ – потужність втрат енергії в стали для номінального режиму роботи АД; $\Psi_1, \Psi_{1,n}$ – поточне і номінальне значення потокозчеплення обмотки статора АД; $\Omega_{0\text{эл}}, \Omega_{0\text{эл},n}$ – поточне і номінальне значення кругової частоти напруги на обмотці статора АД; 0,7 і 0,3 – коефіцієнти, які враховують частки втрат на гістерезис і вихрові струми в стали для номінального режиму роботи АД.

Сумарна потужність втрат енергії в обмотці статора (рис.6) від струму навантаження і від струму намагнічування, визначалася за формулою:

$$\Delta P_{m,1} + \Delta P_{m,1,0} = R_s (i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t))$$

де R_s – активний опір фази обмотки статора АД; $i_A(t); i_B(t); i_C(t)$ – миттєві значення струму в фазах обмотки статора.

Потужність втрат енергії на активному опорі 3-х фаз обмотки ротора від струму навантаження визначалася за формулою:

$$\Delta P_{m,2} = R_r (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t))$$

де R_r – активний опір фази обмотки ротора АД; $i_a(t); i_b(t); i_c(t)$ – миттєві значення струму в фазах обмотки статора.

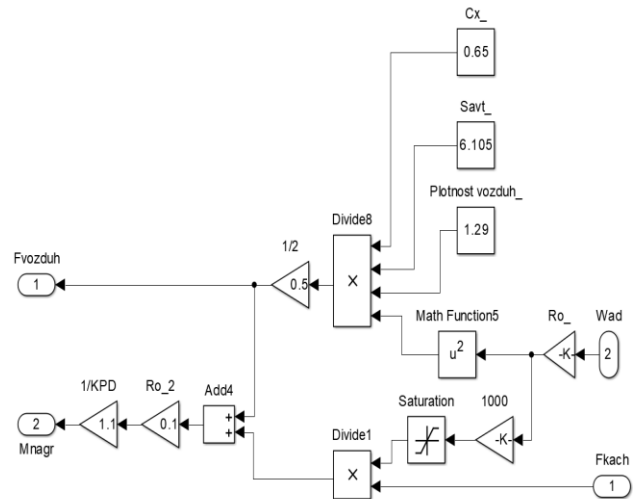


Рис. 3. Підсистема, що враховує силу тертя кочення коліс і силу опору повітря

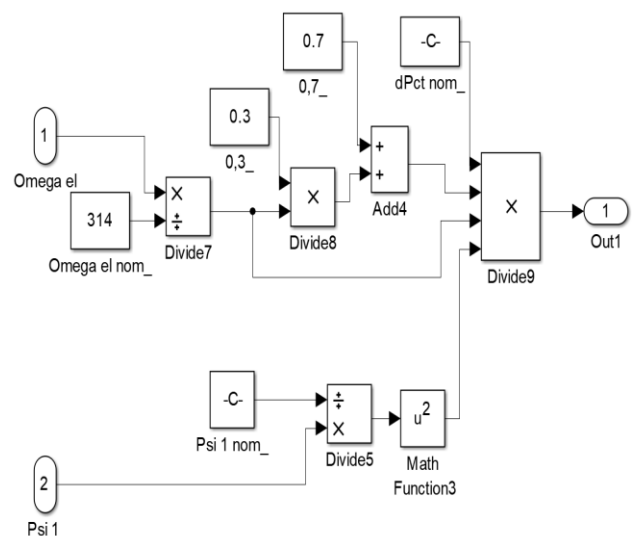


Рис. 4. Підсистема, що враховує потужність втрат енергії в стали

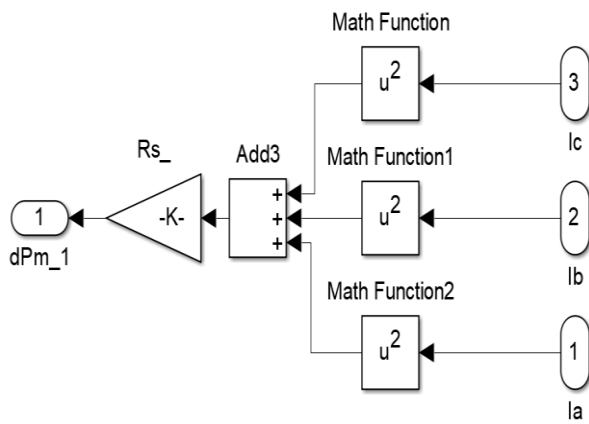


Рис. 5. Підсистема, що враховує потужність втрат енергії в обмотці статора від струму навантаження

3. Результати дослідження

Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі повністю завантаженого двоповерхового автобуса (100 пасажирів), наполовину завантаженого автобуса (50 пасажирів) і порожнього автобуса при значеннях швидкості руху автобуса, які відповідають значенням частоти напруги на обмотці статора 25 Гц і 50 Гц і відповідно середньоквадратичним фазним зна-

ченням напруги 110 В і 220В, наведені в таблицях 1-6.

У цих таблицях прийняті наступні позначення:

$P_{H\Sigma}$ – сумарна номінальна потужність всіх тягових двигунів, кВт;

$\Delta P_{1,2,эл}$ – сумарна потужність втрат електричної енергії в обмотках статора і ротора всіх тягових двигунів, кВт;

$\Delta P_{СТАЛЬ}$ – сумарна потужність втрат енергії в сталі статора всіх тягових двигунів, кВт;

ΔP_{Σ} – сумарна потужність втрат енергії в усіх тягових двигунах, кВт;

У таблиці 1 наведені результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі порожнього автобуса при швидкості руху, яка відповідає частоті напруги 25 Гц і середньоквадратичного фазному значенням напруги на обмотці статора 110 В. З неї видно, що якщо замість двох двигунів номінальною потужністю $P_H = 90$ кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити сумарну потужність втрат ΔP_{Σ} електричної енергії відповідно на 1,31 кВт (на 47,9%) і на 0,783 кВт (на 28,7%).

Таблиця 1

Потужність втрат енергії в двигунах автобуса під час руху порожнього автобуса зі швидкістю, яка відповідає значенню фазного напруги 110 В і частоті 25 Гц

$P_{H\Sigma}$, кВт	2×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,208×2	0,219×2	0,143×3	0,117×4	0,276×3	0,189×4	0,149×5	0,128×6
$\Delta P_{СТАЛЬ}$, кВт	1,156×2	0,493×2	0,497×3	0,499×4	0,373×3	0,377×4	0,379×5	0,381×6
ΔP_{Σ} , кВт	2,728	1,422	1,92	2,462	1,946	2,262	2,641	3,052

Результати аналогічного розрахунку при русі наполовину завантаженого автобуса показали, що якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це

дозволить істотно зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела живлення відповідно на 1,139 кВт (на 39,6%) і на 0,475 кВт (на 16,5%).

Таблиця 2

Потужність втрат енергії в двигунах автобуса під час руху автобуса з 50 пасажирями зі швидкістю, яка відповідає значенню фазного напруги 110 В і частоті 25 Гц

$P_{H\Sigma}$, кВт	2×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,295×2	0,385×2	0,215×3	0,156×4	0,434×3	0,276×4	0,204×5	0,165×6
$\Delta P_{СТАЛЬ}$, кВт	1,144×2	0,485×2	0,493×3	0,496×4	0,367×3	0,373×4	0,376×5	0,378×6
ΔP_{Σ} , кВт	2,878	1,739	2,122	2,611	2,4	2,592	2,898	3,26

Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі повного автобуса при швидкості близько 28 км / год наведені в табл. 3. З неї видно, що якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни по-

тужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела живлення відповідно на 0,244 кВт (на 7, 9%) і на 0,274 кВт (на 8,9%).

Таблиця 3

Потужність втрат енергії в двигунах автобуса під час руху автобуса з 100 пасажирями зі швидкістю, яка відповідає значенню фазного напруги 110 В і частоті 25 Гц

$P_{н.с}, \text{кВт}$	2×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30
$\Delta P_{1,2,эл}, \text{кВт}$	0,408×2	0,953×2	0,456×3	0,289×4	0,643×3	0,389×4	0,275×5	0,214×6
$\Delta P_{сталь}, \text{кВт}$	1,138×2	0,471×2	0,483×3	0,489×4	0,361×3	0,368×4	0,373×5	0,375×6
$\Delta P_{\Sigma}, \text{кВт}$	3,092	2,847	2,818	3,114	3,012	3,031	3,238	3,538

Аналогічні розрахунки були проведені при русі повного, наполовину повного і порожнього автобуса по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю приблизно рівною 56 км / год. Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі порожнього автобуса показали, що якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної

енергії, відповідно на 3,14 кВт (на 51,1%) і на 2,11 кВт (на 33%).

Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі автобуса з 50 пасажирями зі швидкістю, 56 км / год показали, що якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то потужність втрат електричної енергії зменшиться відповідно на 2,76 кВт (на 44,8%) і на 1,8 кВт (на 29,2%).

Таблиця 4

Потужність втрат енергії в двигунах автобуса під час руху порожнього автобуса зі швидкістю, яка відповідає значенню фазного напруги 220 В і частоті 50 Гц

$P_{н.с}, \text{кВт}$	2×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30
$\Delta P_{1,2,эл}, \text{кВт}$	0,347×2	0,329×2	0,193×3	0,145×4	0,379×3	0,247×4	0,187×5	0,154×6
$\Delta P_{сталь}, \text{кВт}$	2,72×2	1,169×2	1,177×3	1,181×4	0,89×3	0,897×4	0,9×5	0,903×6
$\Delta P_{\Sigma}, \text{кВт}$	6,134	2,995	4,11	5,304	3,81	4,575	5,434	6,341

Таблиця 5

Потужність втрат енергії в двигунах автобуса під час руху автобуса з 50 пасажирями зі швидкістю, яка відповідає значенню фазного напруги 220 В і частоті 50 Гц

$P_{н.с}, \text{кВт}$	2×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30
$\Delta P_{1,2,эл}, \text{кВт}$	0,372×2	0,54×2	0,285×3	0,196×4	0,565×3	0,35×4	0,252×5	0,199×6
$\Delta P_{сталь}, \text{кВт}$	2,715×2	1,161×2	1,172×3	1,177×4	0,884×3	0,892×4	0,896×5	0,899×6
$\Delta P_{\Sigma}, \text{кВт}$	6,174	3,407	4,371	5,493	4,347	4,968	5,742	6,591

Якщо при русі повністю завантаженого автобуса замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це дозво-

лить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела енергії, відповідно на 1,748 кВт (на 27,2 %) і на 1,25 кВт (на 19,4%).

Таблиця 6

Потужність втрат енергії в двигунах автобуса під час руху автобуса з 100 пасажирями зі швидкістю, яка відповідає значенню фазного напруги 220 В і частоті 50 Гц

$P_{н.с.}$, кВт	2×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,502×2	1,192×2	0,565×3	0,351×4	0,798×3	0,478×4	0,332×5	0,255×6
$\Delta P_{сталь}$, кВт	2,708×2	1,144×2	1,16×3	1,169×4	0,878×3	0,887×4	0,893×5	0,869×6
ΔP_{Σ} , кВт	6,419	4,671	5,174	6,081	5,027	5,461	6,124	6,746

Також було проведено дослідження ефективності роботи багатодвигунного приводу в передніх режимах розгону і гальмування, це питання дуже важливе для міського циклу руху автобуса з періодичними зупинками перед світлофорами.

Були оцінені втрати енергії в міді обмоток статора і ротора, в стали, і додаткові втрати при

розгоні повного і порожнього автобуса за 15 секунд до швидкості приблизно рівною 56 км / год, що відповідає частоті напруги на обмотці статора дорівнює 50 Гц

Результати розрахунку втрат енергії в АД при розгоні повністю завантаженого автобуса і при розгоні порожнього автобуса наведені в таблицях 7-8.

Таблиця 7

Втрати енергії при розгоні повного автобуса за 15 секунд

$P_{н.с.}$, кВт	2×90	5×45	6×45	7×45	11×30	12×30	13×30	14×30
$\Delta E_{1,2,эл}$, кДж	222,3×2	57,65×5	40,84×6	31,75×7	28,3×11	24,5×12	21,7×13	19,5×14
$\Delta E_{сталь}$, кДж	16,55×2	8,86×5	9,07×6	9,21×7	2,19×11	2,22×12	2,24×13	2,26×14
$\Delta E_{доб}$, кДж	7,259×2	3,67×5	3,67×6	3,67×7	2,47×11	2,47×12	2,47×13	2,47×14
ΔE_{Σ} , кДж	492,236	350,885	321,474	312,417	362,362	350,112	342,99	339,7

Таблиця 8

Втрати енергії при розгоні порожнього автобуса за 15 секунд

$P_{н.с.}$, кВт	2×90	4×45	5×45	6×45	7×30	8×30	9×30	10×30
$\Delta E_{1,2,эл}$, кДж	70,44×2	37,03×4	26,65×5	21,56×6	24,74×7	20,27×8	17,43×9	15,5×10
$\Delta E_{сталь}$, кДж	17,74×2	9,126×4	9,32×5	9,449×6	2,217×7	2,252×8	2,279×9	2,3×10
$\Delta E_{доб}$, кДж	7,259×2	3,669×4	3,669×5	3,669×6	2,472×7	2,472×8	2,472×9	2,47×10
ΔE_{Σ} , кДж	190,87	202,986	201,884	211,755	205,968	199,984	199,656	202,89

Результати розрахунку втрат енергії в АД при розгоні повного автобуса за 15 секунд при зміні частоти напруги на статорі від 0 Hz до 50 Hz наведені в таблиці 7. З таблиці видно, що якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати 7 двигуна потужністю 45 кВт, то це дозволить зменшити сумарні втрати електричної енергії при розгоні автобуса, приблизно на 179,76 кДж (на 36,52%). Якщо замість двох двигуна потужністю 90 кВт використовувати 14 двигунів потужністю 30 кВт, то це дозволить

зменшити втрати електричної енергії при розгоні автобуса приблизно на 152,5 кДж (на 31%).

Результати аналогічного розрахунку втрат енергії в АД при розгоні порожнього автобуса показали, що якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати 5 двигунів потужністю 45 кВт, то втрати електричної енергії збільшаться приблизно на 11 кДж (на 5,5%). Якщо замість двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати 9 двигунів потужністю 30 кВт, то втрати електричної енергії збільшаться приблизно на 8,79 кДж (на 4,4%).

Висновки

Проведено розрахунки потужності втрат енергії в АД при русі повністю завантаженого двоповерхового автобуса, наполовину завантаженого автобуса і порожнього автобуса при різних значеннях швидкості руху автобуса. Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі порожнього автобуса показали, що якщо замість кожного з двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, відповідно на 51,1% і на 33%.

З аналогічного розрахунку для повного автобуса видно, що якщо замість кожного з двох двигунів потужністю 90 кВт використовувати два двигуни потужністю 45 кВт або три двигуни потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела живлення відповідно на 7,9% і на 8,9%.

З результатів видно що, чим менше завантажений автобус, тим більше енергетичний ефект від використання декількох двигунів малої потужності замість двох АД великої потужності.

Також було проведено дослідження ефективності роботи багатодвигунного приводу в перехідних режимах розгону і гальмування. Були оцінені втрати енергії при розгоні повного і порожнього автобуса за 15 секунд до швидкості приблизно рівною 56 км / год. Дослідження показують, що економія електричної енергії спостерігається тільки при розгоні автобуса з повним завантаженням. Так при застосуванні 7 - 14 двигунів малої потужності дозволить зменшити втрати електричної енергії приблизно на 30%. При розгоні порожнього автобуса втрати в багатодвигунному електроприводі при застосуванні великої кількості двигунів малої потужності, не демонструє енергетичного ефекту.

Застосування багатодвигунного електроприводу в міському циклі руху автобуса дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела живлення.

Список використаної літератури

1. Вершинин, Д. В. Визначення параметрів основних вузлів електричної схеми електробуса [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, С. О. Смотров // Електромашинобуд. та електрооблад. – Вип. 74. К. : Техніка, 2009. – С. 10–17.

2. Вершинин, Д. В. Багатодвигунний автоматизований електропривод електромобіля [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А.

Войтенко, Е. А. Смотров. // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів Вип. 1. 2010. – С. 39–44.

3. Вершинин, Д. В. Некоторые особенности построения системы управления многодвигательного электротранспортного средства [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров. // Електромашинобуд. та електрооблад. Вип. 75. К. : Техніка, 2010. – С. 12–21.

4. Войтенко В. А. Система контроля тяги электротранспортного средства. [Текст] / В. А. Войтенко. // Електротехнічні та комп'ютерні системи – № 08 (84). – К. : Техніка – 2012. – С. 7–11.

5. Aarniovuori, L. Measurements and Simulations of DTC Voltage Source Converter and Induction Motor Losses. [Text] / L. Aarniovuori, L. I. E. Laurila, M. Niemela and J. J. Pyrhonen // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 5, pp. 2277–2287. doi: 10.1109/TIE.2011.2161061

6. Haisen, Zhao. Piecewise variable parameter loss model of laminated steel and its application in fine analysis of iron loss of inverter-fed induction motors. [Text] / Zhao Haisen, Zhang Dongdong, Wang Yilong, Zhan Yang and Xu Guorui // IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 832–840. doi: 10.1109/TIA.2017.2740278

7. Liang, Yanping. Finite-Element Evaluation and Eddy-Current Loss Decrease in Stator End Metallic Parts of a Large Double-Canned Induction Motor. [Text] / Y. Liang, X. Bian, H. Yu and C. Li // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, no. 11, pp. 6779–6785. doi: 10.1109/TIE.2015.2438051

8. Komez, K. Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motors. [Text] / K. Komez and M. Dems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 7, pp. 2934–2946. doi: 10.1109/TIE.2011.2168795

9. Yamazaki, K. Harmonic loss and torque analysis of high speed induction motors. [Text] / K. Yamazaki, A. Suzuki, M. Ohto and T. Takakura // IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 933–941. doi: 10.1109/TIA.2012.2191252

10. Haisen, Zhao; Piecewise variable parameter model for precise analysis of iron losses in induction motors. [Text] / Zhao Haisen, Zhang Dongdong, Wang Yilong, Zhan Yang, Xu Guorui, ; Luo Yingli // IET Electric Power Applications, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 361–368. doi: 10.1049/iet-epa.2016.0009

11. Hung, N. T. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of

Torque and Flux Dependent Losses. [Text] / N. T. Hung, N.C. Thien, T.P. Nguyen, V. S. Le, D. A. Tuan. // AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and-Related Sciences. – 2014. p.p. 497–507. doi: 10.1007/978-3-642-41968-3 50

12. Kosmodamianskii, A. S. Induction motor drives with minimal power losses. [Text] / A. S. Kosmodamianskii, V. I. Vorob'ev, A. A. Pugachev. // Russian Electrical Engineering, – 2012. №83 (12), p.p. 667–671. doi: 10.3103/sl068371212120073

13. Uddin, M. N. New Online Loss-Minimization-Based Control of an Induction Motor Drive. [Text] / M. N. Uddin and S. W. Nam // IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 926–933. doi: 10.1109/TPEL.2007.915029

14. Espinoza, J. R. A current-source inverter fed induction motor drive system with reduced losses. [Text] / J. R. Espinoza and G. Joos // IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, vol. 34, no 4, pp. 796–805. doi: 10.1109/28.703977

15. Grouni, S. Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Control. [Text] / S. Grouni, R. Ibtouen, M. Kidouche, O. Touhami. // International Journal of Systems Control, – 2010. № 1 (4). – p.p. 163–169.

16. Nikolaos Tsouvalas. Asynchronous motor drive loss optimization. [Text] / Nikolaos Tsouvalas, Ioannis Xydis, Ioannis Tsakirakis, Z. Papazacharopoulos. // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. Volume 181, Issues 1–3, 1 January, – p.p. 301–306

17. Войтенко, В. А. Сравнительный анализ энергетических показателей однодвигательного и многодвигательного асинхронных тяговых электроприводов [Текст] / В. А. Войтенко, В. А. Водичев, А. Г. Калинин // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2019. – № 31. – С. 35–50.

18. Войтенко, В. А. Анализ технических и энергетических показателей многодвигательного электропривода для городского общественного транспорта [Текст] / В. А. Войтенко, В. А. Водичев, А. Г. Калинин // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – № S1-2(41). – С. 95–106. – doi: 10.5281/zenodo.3239179.

References

1. Vershinin, D. V., Voitenko, V. A., Smotrov, E. O. (2009), “Determination of the parameters of the main nodes of the electric circuit of the electric bus” [Vyznachennya parametriv osnovnykh vuzliv elektrychnoyi skhemy elektrobusa], Elektromashynobud. ta elektrooblad., No. 74, Kiev, Technics, p.p. 10–17.

2. Vershinin, D. V., Vodichev, V. A., Voitenko, V. A., Smotrov, E. A. (2010), “Multi-

engine electric automobile electric vehicle” [Bahatodvyhunnyy avtomatyzovanyy elektropryvod elektromobilya], Automation of technological and business processes. No. 1, p.p. 39–44.

3. Vershinin, D. V., Voitenko, V. A., Smotrov, E. A. (2010), “Some features of building a control system for a multi-motor electric vehicle” [Nekotoryye osobennosti postroyeniya sistemy upravleniya mnogodvigatel'nogo elektrotransportnogo sredstva], Elektromashynobud. ta elektrooblad., No. 75, Kiev, Technics, p.p. 12–21.

4. Voitenko, V. A. (2012) “Electric vehicle traction control system”. [Systema kontrolya tyahy élektrotransportnoho sredstva], Electrotechnical and Computer Systems - No. 08 (84), - Kiev, Technics, p.p. 7–11.

5. Aarniovuori, L., Laurila, L. I. E., Niemela, M., Pyrhonen, J. J. (2012) “Measurements and Simulations of DTC Voltage Source Converter and Induction Motor Losses”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 5, pp. 2277–2287. doi: 10.1109/TIE.2011.2161061

6. Haisen, Zhao., Dongdong, Zhang., Yilong, Wang., Yang, Zhan., Guorui, Xu. (2018), “ Piecewise Variable Parameter Loss Model of Laminated Steel and Its Application in Fine Analysis of Iron Loss of In-verter-Fed Induction Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 1, pp. 832–840. doi: 10.1109/TIA.2017.2740278

7. Liang, Yanping., Bian, Xu., Yu, Honghao., Li, Cangxue. (2015), “ Finite-Element Evaluation and Eddy-Current Loss Decrease in Stator End Metallic Parts of a Large Double-Canned Induction Motor”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 11, pp. 6779–6785. doi: 10.1109/TIE.2015.2438051

8. Komeza., Dems, M. (2012), “ Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motors”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 7, pp. 2934–2946. doi: 10.1109/TIE.2011.2168795

9. Yamazaki, K., Suzuki, A., Ohto, M., Takakura, T. (2012) “Harmonic Loss and Torque Analysis of High-Speed Induction Motors”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 3, pp. 933–941. doi: 10.1109/TIA.2012.2191252

10. Haisen, Zhao., Dongdong, Zhang., Yilong, Wang., Yang, Zhan., Guorui, Xu., Yingli, Luo. (2017), “ Piecewise variable parameter model for precise analysis of iron losses in induction motors”. IET Electric Power Applications, vol. 11, no. 3, pp. 361–368. doi: 10.1049/iet-epa.2016.0009

11. Hung, N. T., Thien, N.C., Nguyen, T.P., Le, V. S., Tuan, D. A. (2014). “Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses”, AETA

2013 Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences. p.p. 497–507. doi: 10.1007/978-3-642-41968-3_50

12. Kosmodamianskii, A. S., Vorob'ev, V. I., Pugachev, A. A. (2012), "Induction motor drives with minimal power losses", Russian Electrical Engineering, No. 83 (12), p.p. 667–671. doi: 10.3103/s1068371212120073

13. Uddin, M. N., Nam, S. W. (2008), "New Online Loss-Minimization-Based Control of an Induction Motor Drive". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 2, pp. 926–933. doi: 10.1109/TPEL.2007.915029

14. Espinoza, J.R., Joos, G. (1998), "A current-source-inverter-fed induction motor drive system with reduced losses". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no 4, pp. 796–805. doi: 10.1109/28.703977

15. Nikolaos Tsouvalas, Ioannis Xydis, Ioannis Tsakirakis, Papazacharopoulos, Z. (2007), "Asynchronous motor drive loss optimization", Journal of Materials Processing Technology. Volume 181, Issues 1–3, 1 January, p.p. 301–306.

16. Grouni, S., Ibtouen, R., Kidouche, M., Touhami, O. (2010), "Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Control", International Journal of Systems Control, No. 1 (4), p.p. 163–169.

17. Voitenko, V.A., Vodichev, V.A., Kalinin, A.G. (2019), "Comparative analysis of the energy indicators of single-motor and multiple-motor asynchronous electric drive". [Sravnitel'nyj analiz energeticheskikh pokazatelej odnodvigatel'nogo i mnogodvigatel'nogo asinhronnyh tyagovyh elektroprivodov], Electrotechnical and Computer Systems - No. 31. – p.p. 35–50.

18. Voitenko, V.A., Vodichev, V.A., Kalinin, A.G. (2019), "Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport". [Analiz tekhnicheskikh i energeticheskikh pokazatelej mnogodvigatel'nogo elektroprivoda dlya gorodskogo obshchestvennogo transporta], Problemele energeticii regionale, No. S1-2 (41) p.p. 95–106. doi: 10.5281/zenodo.3239179

ESTIMATION OF ENERGY INDICATORS OF A MULTI-MOTOR TRACTOR ELECTRIC DRIVE FOR PUBLIC TRANSPORT

V. A. Voitenko, V. A. Vodichev, Y. O. Hohokhiia
Odessa Polytechnic State University

Abstract. *The purpose of the work is to analyze the energy parameters of a multi-motor asynchronous traction electric drive in a city vehicle to ensure a reduction in electric energy losses when driving along the route. The research was carried out for a lightweight double-decker bus, the maximum number of passengers transported is set at 100 people. To achieve the goal, mathematical modeling was used in the MatLab package, in which energy losses were calculated in the multi-engine electric drive of a bus with a different number of traction asynchronous motors. The calculation was carried out for the most characteristic sections of the city cycle of the bus: constant modes of movement with different speeds and transient modes of acceleration. To control the speed of the engines, a proportional law was used to change the voltage on the stator winding and frequency, which correspond to the voltage frequency values at the stator winding of 25 Hz and 50 Hz and, respectively, the standard phase ratio of 110 V and 220 V. The change in the loading moment of the vehicle engines due to the change in the rolling friction force of the wheels for three cases of a complete, half-complete and empty bus is taken into account. The load change due to air resistance when the speed changes is taken into account. In operation it is shown that application of multi-motor asynchronous electric drive allows to reduce energy losses in traction asynchronous electric motors when vehicle is moving at constant speed and at acceleration at different number of carried passengers. Moreover, in order to achieve energy saving, the number of engines used in a multi-motor electric drive must vary depending on speed and acceleration, as well as on the total load moment of the multi-motor electric drive.*

Keywords: *bus, induction motor, vehicle, electric traction drive, power, energy losses, multi-motor electric drive.*

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

В. А. Войтенко, В. А. Водичев, Ю. А. Гогохия
Государственный университет «Одесская политехника»

Аннотація. Целью работы является анализ энергетических показателей многодвигательного асинхронного тягового электропривода в городском транспортном средстве для обеспечения уменьшения потерь электрической энергии при движении по маршруту. Для достижения цели использовалось математическое моделирование. Был осуществлен расчет потерь энергии в многодвигательном электроприводе автобуса с разным количеством тяговых асинхронных двигателей. В работе показано, что применение многодвигательного электропривода позволяет уменьшить потери энергии в тяговых асинхронных электродвигателях при движении транспортного средства с постоянной скоростью и при разгоне при разном количестве перевезенных пассажиров.

Ключевые слова: автобус, асинхронный двигатель, транспортное средство, тяговый электропривод, мощность, потери энергии, многодвигательный электропривод.

Отримано 16.04.2021



Войтенко Володимир Андрійович, Державний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Пр-сп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: elektrik.wa@gmail.com, тел. + 38-048-705-84-67

Vladimir Voytenko, Odessa Polytechnic State University, Ph.D, Associate Professor of the Department of electromechanical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: elektrik.wa@gmail.com, tel. +38-048-705-84-67

ORCID ID: 0000-0002-2525-6913.



Водічев Володимир Анатолійович, Державний університет «Одеська політехніка», доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Пр-т. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: vva@eei.opu.ua, тел. +38(050)2347722

Vladimir Vodichev, Odessa Polytechnic State University, Dr. of Science, Professor, Associate Professor of the Department of electromechanical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: vva@eei.opu.ua, tel. +38(050)2347722

ORCID ID: 0000-0002-7204-1149



Гогохія Юрій Олексійович, Державний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри електромеханічної інженерії, Пр-сп. Шевченко, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: strelok.01.02.84@gmail.com, тел. + 38-066-644-7510

Yurii Hohokhiia, Odessa Polytechnic State University, postgraduate student of the Department of electromechanical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: strelok.01.02.84@gmail.com, tel. +38-066-644-7510

ORCID ID: 0000-0003-2453-3162.