

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОДНОДВИГАТЕЛЬНОГО И МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В. А. Войтенко, В. А. Водичев, А. Г. Калинин

Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. Целью работы является проведение приближённого сравнительного анализа энергетических показателей однодвигательного и многодвигательного асинхронных тяговых электроприводов на основании оценки потерь энергии в тяговых асинхронных электродвигателях разной мощности. Для регулирования швидкості тяговых асинхронних електродвигунів використовується пропорційний закон частотного керування. Показано, что применение многодвигательного асинхронного электропривода позволяет уменьшить потери энергии в тяговых асинхронных электродвигателях в статических и в динамических режимах работы.

Ключевые слова: однодвигательный электропривод, многодвигательный электропривод, асинхронный электропривод, мощность потерь энергии.

Введение

Загрязнение окружающей среды выхлопными газами автомобилей и автобусов является серьёзной проблемой современного общества. В связи с этим страны Европейского союза рассматривают программу постепенного запрещения использования в городах транспортных средств (ТС) с двигателями внутреннего сгорания и перевод их на тяговый электрический привод. При разработке тягового электропривода целесообразно провести сравнение, как минимум, двух технических решений, а именно: использование однодвигательного электропривода и использование многодвигательного электропривода [1-5]. В общем случае сравнение этих технических решений следует проводить по энергетике, по массогабаритным показателям и по стоимости используемого оборудования. При сравнении энергетических показателей однодвигательного и многодвигательного электропривода важно обратить внимание на минимизацию потерь электрической энергии в тяговых электродвигателях (ТЭД). Особенно это важно для ТС, в которых используется автономный источник энергии, поскольку минимизация потерь электрической энергии позволяет увеличить дальность пробега ТС при одинаковом начальном количестве энергии. При изменении суммарной массы перевозимых пассажиров и груза, при изменении угла наклона дороги и скорости движения ТС для минимизации потерь электрической энергии может потребоваться использовать разное количество ТЭД.

В современных ТС как правило используют

синхронные двигатели (СД) с возбуждением от постоянных магнитов или асинхронные двигатели (АД). Известно, что СД с возбуждением от постоянных магнитов являются более энергоэффективными, поскольку не расходуют энергию на создание магнитного поля и имеют более высокие значения удельного момента и удельной мощности. В свою очередь АД являются более простыми по конструкции, более надёжными и более дешёвыми [6,7]. Поскольку в АД (в отличие от СД) имеются не только потери энергии в обмотке статора, в стали статора, механические и добавочные потери энергии, но присутствуют потери энергии в обмотке ротора, а также потери энергии в обмотке статора от тока намагничивания, то можно утверждать, что исследование энергетической эффективности однодвигательного и многодвигательного электропривода, проведённое на базе АД даст более обобщённые результаты, чем аналогичное исследование, проведённое на базе СД [8-25]. В связи с этим в статье рассматривается асинхронный тяговый электропривод.

1. Цель работы

Целью работы является проведение предварительного приближённого сравнительного анализа энергетической эффективности однодвигательного и многодвигательного асинхронных тяговых электроприводов на основании оценки потерь энергии в тяговых асинхронных электрических двигателях разной мощности. Для регулирования скорости тяговых асинхронных электродвигателей в первой зоне используется пропорциональный закон частотного управления. Для упрощения анализа энергетических процессов, которые протекают в асинхронном двигателе

ле, використовується математическа модель асинхронного двигателя, отримана на основі Т-образної схеми заміщення АД.

2. Предмет (об'єкт) дослідження

Упрощена функціональна схема однодвигательного і многодвигательного тягового електропривода показана на рис. 1 і на рис. 2. На цих функціональних схемах прийняті наступні позначення: 1 – тягові електродвигатели; 2 – редуктор; 3 – карданний вал; 4 – механічний диференціал; 5 – полуосі ведучих коліс; 6 – ведучі колеса.

Із рис.2 слідує, що для приведення в рух карданного вала і ведучих коліс ТС в многодвигательном тяговом електроприводі необхідно використовувати редуктори з кількома входними валами [5].

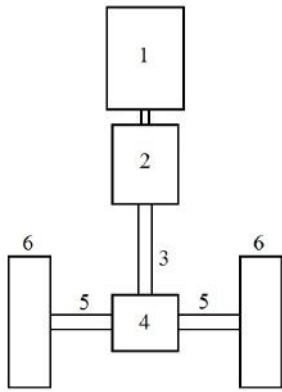


Рис. 1 Функціональна схема однодвигательного тягового електропривода

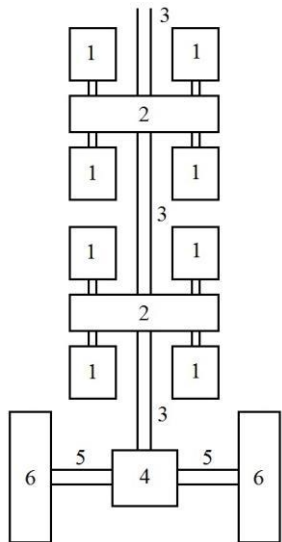


Рис. 2 Функціональна схема многодвигательного тягового електропривода

Застосування на ТС многодвигательного електропривода дозволяє отримати ряд переваг порівняно з застосуванням однодвигательного електропривода:

1. Для покращення управляемості ТС важливо розподілити навантаження порівну між передньою і задньою осями. Один великий і важкий ТЭД потрібно розмістити в передній або в задній частині ТС (рис.1), що переважає передню або задню ось і, відповідно, погіршує управляемість ТС. В многодвигательном електроприводі (рис.2) використовуються кілька ТЭД меншого розміру і меншої маси, які можна розмістити між осями ТС без значущого змінення конструкції ТС. В результаті маса двигателів буде розподілена більш рівномірно між передньою і задньою осями, що покращить управляемість ТС.

2. Оскільки в многодвигательном електроприводі використовуються двигатели меншого габарита, ніж в однодвигательном електроприводі, то вони краще встраиваються в конструкцію корпусу ТС.

3. При використанні многодвигательного тягового електропривода підвищується надійність електропривода і ТС в цілому. При використанні в ТС одного ТЭД (рис.1) пошкодження ТЭД призводить до зупинки ТС. При використанні в ТС многодвигательного тягового електропривода поломка одного або кількох ТЭД не є критичною, оскільки ТС може продовжити рух з допомогою решти непошкоджених двигателів. В результаті втрати від простою ТС можуть бути зменшені.

Проведемо порівняльний аналіз і оцінку енергетических показувачів однодвигательного і многодвигательного електроприводів на прикладі українського автобуса «Богдан», основні параметри якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.
Основні параметри автобуса «Богдан»
(модель А-09202)

Модель автобуса «Богдан»	А-09202
Маса порожнього автобуса	5000 кг
Максимальне кількість пасажирів	45 чоловік
Повна маса вантажного автобуса	8230 кг.
Витрата дизельного палива на 100 км шляху	(15-16) літрів
Максимальна швидкість при повній завантаженості	95 км/год
Здатність подолати підйом	20%
Максимальна потужність, розвивається двигателем внутрішнього згорання	89 кВт при 3200 об/хв.
Максимальний крутячий момент, розвивається двигателем внутрішнього згорання	304 Нм при 1600 об/хв.

3. Метод исследования

Для повышения энергетической эффективности электрического привода был проведен расчет потерь энергии в ТЭД для случаев применения одного ТЭД мощностью (90 кВт), и применения нескольких одинаковых ТЭД мощностью 45 кВт и мощностью 30 кВт. В расчетах учитывалась сила трения качения колес автобуса по асфальтированной горизонтальной дороге, которая практически не зависит от скорости движения ТС, и сила сопротивления воздуха, значение которой пропорционально значению скорости движения ТС во второй степени. Расчеты по определению потерь энергии в ТЭД были выполнены для полностью загруженного автобуса (45 пассажиров), для автобуса, загруженного наполовину (22 пассажира), и для пустого автобуса (при отсутствии пассажиров и водителя).

При определении потерь энергии в ТЭД использовались паспортные данные и параметры схемы замещения асинхронных двигателей общепромышленного исполнения серии 4А соответствующей мощности. Была рассчитана мощность потерь энергии в обмотке статора от тока нагрузки и от тока намагничивания, мощность потерь энергии в обмотке ротора от тока нагрузки, мощность потерь энергии в стали и мощность добавочных потерь. Потери механической энергии в АД не учитывались из-за их малости. Скорость ТЭД регулировалась только в первой зоне при использовании пропорционального закона частотного управления. Номинальная частота фазного напряжения 220В, подаваемого на обмотку статора АД, равна 50 Гц. Этой частоте соответствует синхронная скорость вращения вала двигателя 157 рад/с и скорость движения автобуса 56,5 км/час (при отсутствии сопротивления движению ТС). Расчеты по определению потерь энергии в ТЭД были выполнены также и для значений частоты напряжения на обмотке статора 25 Гц (фазное напряжение 110В) и 12,5 Гц (фазное напряжение 55В), что соответствует скорости движения автобуса примерно 28 км/час и 14 км/час (также при отсутствии сопротивления движению).

В таблице 2 приведены некоторые параметры асинхронных двигателей общепромышленного исполнения серии 4А мощностью 90 кВт, 45 кВт и 30 кВт, а также указана номинальная мощность потерь энергии в обмотке статора, в обмотке ротора, в стали АД и мощность добавочных потерь АД.

Суммарную мощность потерь энергии при работе АД в номинальном режиме определяем по формуле:

$$\Delta P_H = P_{2H} \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right), \quad (1)$$

где P_{2H} – номинальное значение мощности механической энергии на валу АД;

η_H – номинальное значение коэффициента полезного действия АД.

Мощность потерь энергии в обмотке ротора определяли по формуле:

$$\Delta P_{M.2} = M_{AD} \omega_0 s, \quad (2)$$

где M_{AD} – момент, развиваемый АД;

ω_0 – синхронная угловая скорость вала АД, которая соответствует текущему значению частоты напряжения на обмотке статора;

s – скольжение ротора относительно магнитного поля, которое соответствует текущим значениям частоты и напряжения на обмотке статора и текущему значению момента, который развивает АД.

Из формулы (2) следует, что при работе АД в номинальном режиме мощность электрических потерь энергии в обмотке ротора можно определить по формуле:

$$\Delta P_{M.2.H} = M_{AD.H} \omega_{0H} s_H, \quad (3)$$

где $M_{AD.H}$ – номинальный момент, развиваемый АД;

ω_{0H} – синхронная угловая скорость вращения вала АД, которая соответствует номинальному значению частоты напряжения на обмотке статора;

s_H – номинальное значение скольжения ротора относительно магнитного поля, которое соответствует номинальным значениям частоты и напряжения на обмотке статора, а также номинальному значению момента, который развивает АД.

Если принять, что при номинальных значениях частоты и напряжения на обмотке статора жёсткость рабочего участка механической характеристики АД не изменяется, то для текущего значения момента, развиваемого АД, и для текущего значения скольжения АД можно записать:

$$s = \frac{M_{AD}}{M_{AD.H}} s_H. \quad (4)$$

После подстановки в формулу (2) правой части формулы (4) и после преобразований получим:

$$\Delta P_{M.2} = M_{AD} \omega_0 \frac{M_{AD}}{M_{AD.H}} s_H = \frac{M_{AD}^2}{M_{AD.H}^2} M_{AD.H} \omega_0 s_H;$$

Таблиця 2.

Номинальные параметры АД			
Тип АД	4A250M4Y3	4A200L4Y3	4A180M4Y3
Номинальная мощность АД, кВт	90,0	45,0	30,0
Номинальный механический момент АД, Нм	580,8	291,3	194,8
Критический механический момент АД, Нм	1335,8	728,2	448,0
Суммарная номинальная мощность потерь энергии, Вт	6774,2	3913,0	2967,0
Составляющие потерь энергии в АД			
Мощность добавочных потерь $\Delta P_{доб}$, Вт	483,9	244,6	164,8
Мощность потерь энергии в стали, соответствующая номинальному режиму работы АД $\Delta P_{с.н}$, Вт	2631,1	1122,4	861,6
Номинальная мощность потерь энергии в обмотке ротора $\Delta P_{M.2.H}$, Вт	1185,4	731,7	581,0
Суммарная номинальная мощность потерь энергии в обмотке статора от тока нагрузки и от тока намагничивания, $\Delta P_{M.1.H} + \Delta P_{M.1.0.H}$, Вт	2473,8	1814,3	1359,6
Составляющие потерь энергии в обмотке статора АД			
Номинальная мощность потерь энергии в обмотке статора от тока ротора $\Delta P_{M.1.H}$, Вт	2034,6	1463,4	1097,7
Номинальная мощность потерь энергии в обмотке статора от тока намагничивания $\Delta P_{M.1.0.H}$, Вт	439,2	350,9	261,9

$$\Delta P_{M.2} = \frac{M_{AD}^2}{M_{AD.H}^2} \Delta P_{M.2.H} \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что при номинальных значениях частоты и напряжения на обмотке статора мощность электрических потерь энергии в обмотке ротора будет пропорциональна квадрату момента нагрузки на валу АД. То же самое можно сказать о мощности электрических потерь энергии в обмотке ротора при других текущих значениях частоты и напряжения на обмотке статора.

Если принять, что вектор тока намагничивания отстаёт от вектора тока, протекающего в обмотке ротора, на $\pi/2$ эл.радиан, то мощность потерь электрической энергии в обмотке статора можно представить в виде суммы мощности потерь электрической энергии от тока ротора и от тока намагничивания.

Поскольку при одинаковом значении тока ротора, который протекает и в обмотке статора, мощность потерь электрической энергии пропорциональна сопротивлению обмотки, то можно определить мощность потерь электрической энергии в меди обмотки статора от тока, протекающего в обмотке ротора, по формуле:

$$\Delta P_{M.1} = \Delta P_{M.2} \frac{R_s}{R_r}, \quad (6)$$

где R_s – активное сопротивление фазы обмотки статора АД;

R_r – активное сопротивление фазы обмотки ротора АД, приведенное к параметрам обмотки статора АД.

После подстановки в формулу (6) правой части формулы (5) можно определить мощность потерь электрической энергии в меди обмотки статора от тока, протекающего в обмотке ротора, через номинальную мощность потерь электрической энергии в обмотке ротора АД по формуле:

$$\Delta P_{M.1} = \frac{M_{AD}^2}{M_{AD.H}^2} \Delta P_{M.2.H} \frac{R_s}{R_r}. \quad (7)$$

Если, как уже было сказано, принять, что вектор тока намагничивания отстаёт от вектора тока, протекающего в обмотке ротора, на $\pi/2$ эл.радиан, то значение тока намагничивания для номинального режима работы АД можно определить по формуле:

$$I_{0.H} = I_{1.H} \sin \varphi_H = I_{1.H} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}. \quad (8)$$

Определяем мощность потерь энергии в меди обмотки статора от тока намагничивания для номинального режима работы АД:

$$\Delta P_{M.1.0.H} = 3R_s I_{0.H}^2;$$

$$\Delta P_{M.1.0.H} = 3R_s I_{1.H}^2 (1 - \cos^2 \varphi_H). \quad (9)$$

Мощность дополнительных потерь энергии в двигателе будем считать постоянной и независимой от значений частоты и напряжения на обмотке статора, а также независимой от значения момента нагрузки на валу АД:

$$\Delta P_{\text{доб.н}} = 0,005 \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \quad (11)$$

Мощность потерь энергии в стали для номинального режима работы АД определяем по формуле:

$$\Delta P_{\text{сн}} = \Delta P_{\text{н}} - (\Delta P_{\text{м.1.н}} + \Delta P_{\text{м.2.н}} + \Delta P_{\text{м.1.0.н}} + \Delta P_{\text{доб.н}}) \quad (12)$$

При определённых постоянным значениях частоты и напряжении на обмотке статора потери энергии в АД можно разделить на постоянные потери, мощность которых не зависит или почти не зависит от момента нагрузки на валу АД, и на переменные потери энергии, мощность которых зависит от момента нагрузки на валу АД. К постоянным потерям можно отнести потери энергии в стали, потери энергии в меди обмотки статора от тока намагничивания и дополнительные потери энергии в АД. Для номинального режима работы АД мощность постоянных потерь энергии можно определить по формуле:

$$\Delta P_{\text{н.конст}} = \Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{м.1.0.н}} + \Delta P_{\text{доб.н}} \quad (13)$$

К переменным потерям можно отнести потери энергии в обмотке статора и в обмотке ротора от тока, протекающего в обмотке ротора. Для номинального режима работы АД мощность переменных потерь энергии можно определить по формуле:

$$\Delta P_{\text{н.вариа}} = \Delta P_{\text{м.1.н}} + \Delta P_{\text{м.2.н}} \quad (14)$$

В таблице 3 приведена мощность постоянных и переменных потерь энергии для номинального режима работы АД мощностью 90кВт, 45кВт и 30кВт.

Из формул (5), (7) и (14) следует, что мощность переменных потерь энергии в АД при номинальном значении частоты и напряжения на обмотке статора, но при произвольном значении момента нагрузки на валу АД можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{вариа}} &= \Delta P_{\text{м.2.н}} \left(\frac{M_{\text{ад}}}{M_{\text{ад.н}}} \right)^2 \left(1 + \frac{R_{\text{с}}}{R_{\text{р}}} \right) = \\ &= \Delta P_{\text{н.вариа}} \left(\frac{M_{\text{ад}}}{M_{\text{ад.н}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Будем полагать, что мощность постоянных потерь энергии $\Delta P_{\text{н.конст}}$ не изменяется при изменении момента нагрузки на валу АД.

Таблица 3.

Мощность постоянных и переменных потерь энергии для номинального режима работы АД

Тип АД	4A250M4У3	4A200L4У3	4A180M4У3
Мощность постоянных потерь энергии $\Delta P_{\text{н.конст}}$, Вт	3554,2	1717,9	1288,3
Мощность переменных потерь энергии $\Delta P_{\text{н.вариа}}$, Вт	3220,0	2195,1	1678,7

В качестве примера определим количество двигателей мощностью 45 кВт, которое надо использовать вместо одного двигателя мощностью 90 кВт, чтобы потери энергии в многодвигательном электроприводе были меньше потерь энергии в однодвигательном электроприводе. Для достижения энергетического эффекта при замене одного двигателя большей мощности несколькими двигателями меньшей мощности, которые работают при одинаковых значениях амплитуды и частоты напряжения на обмотке статора, должно выполняться условие:

$$\begin{aligned} &(\Delta P_{\text{вариа.45}} + \Delta P_{\text{конст.45}}) N_{45} \leq \\ &\leq (\Delta P_{\text{вариа.90}} + \Delta P_{\text{конст.90}}), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\Delta P_{\text{вариа.45}}$; $\Delta P_{\text{конст.45}}$ – мощность переменных и постоянных потерь энергии в АД мощностью 45кВт;

$\Delta P_{\text{вариа.90}}$; $\Delta P_{\text{конст.90}}$ – мощность переменных и постоянных потерь энергии в АД мощностью 90кВт;

N_{45} – количество АД мощностью 45кВт, которое необходимо подключить вместо одного АД мощностью 90кВт.

В частности при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора в формулу (16) подставим правую часть формулы (15) с учетом количества используемых двигателей мощностью 45 кВт и мощностью 90 кВт, а также с учётом того, что суммарный момент нагрузки поровну распределяется между двигателями мощностью 45 кВт:

$$\left(\Delta P_{\text{н.вариа.45}} \left(\frac{M_{\text{ад}\Sigma}}{N_{45} M_{\text{ад.н.45}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{конст.45}} \right) N_{45} \leq$$

$$\leq \left(\Delta P_{H.VARIA.90} \left(\frac{M_{AD\Sigma}}{M_{AD.H.90}} \right)^2 + \Delta P_{CONST.90} \right). \quad (17)$$

где $M_{AD.H.45}$, $M_{AD.H.90}$ – номинальное значение момента одного АД мощностью 45 кВт и одного АД мощностью 90 кВт;

$M_{AD\Sigma}$ – суммарный момент нагрузки.

После преобразований формулу (17) можно представить в виде:

$$aN_{45}^2 - bN_{45} + c \leq 0, \quad (18)$$

где

$$a = \Delta P_{CONST.45}; \quad (19)$$

$$b = \Delta P_{H.VARIA.90} \left(\frac{M_{AD\Sigma}}{M_{AD.H.90}} \right)^2 + \Delta P_{CONST.90}; \quad (20)$$

$$c = \Delta P_{H.VARIA.45} \left(\frac{M_{AD\Sigma}}{M_{AD.H.45}} \right)^2. \quad (21)$$

Решая неравенство (18), получим условие, которому должно удовлетворять количество двигателей мощностью 45 кВт, чтобы мощность потерь энергии в многодвигательном электроприводе была меньше мощности потерь энергии в однодвигательном электроприводе:

$$N_{45.min} \leq N_{45} \leq N_{45.max}, \quad (22)$$

где

$$N_{45.min} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad (23)$$

$$N_{45.max} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (24)$$

Задача имеет решение при выполнении условия:

$$b^2 - 4ac \geq 0. \quad (25)$$

Если условие (25) не выполняется, то использование нескольких двигателей меньшей мощности вместо одного АД большей мощности не приведёт к положительному энергетическому эффекту.

Например, при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора необходимо определить количество АД мощностью 45кВт, которое надо использовать вместо одного АД мощностью 90кВт для получения энергетического эффекта при суммарном моменте нагрузки $M_{AD\Sigma} = M_{AD.H.45}$. На основании формул (19)-(24) получим:

$$a = 1717,9 \text{ Вт};$$

$$b = 4364,2 \text{ Вт};$$

$$c = 2195,1 \text{ Вт};$$

$$N_{45.min} = 0,691;$$

$$N_{45.max} = 1,850.$$

Таким образом, из неравенства (22) следует, что при номинальных значениях частоты и напряжения на обмотке статора при суммарном моменте нагрузки $M_{AD\Sigma} = M_{AD.H.45}$ для получения энергетического эффекта надо вместо одного АД мощностью 90 кВт использовать один АД мощностью 45 кВт.

Теперь при номинальных значениях частоты и напряжения на обмотке статора определим количество АД мощностью 30кВт, которое надо использовать вместо одного АД мощностью 90кВт для получения энергетического эффекта при суммарном моменте нагрузки $M_{AD\Sigma} = M_{AD.H.45}$. На основании формул (19)-(24) с учётом параметров, приведенных в таблице 3, получим:

$$a = \Delta P_{CONST.30} = 1288,3 \text{ Вт};$$

$$b = \left(\Delta P_{H.VARIA.90} \left(\frac{M_{AD\Sigma}}{M_{AD.H.90}} \right)^2 + \Delta P_{CONST.90} \right) = 4364,2 \text{ Вт};$$

$$c = \Delta P_{H.VARIA.30} \left(\frac{M_{AD\Sigma}}{M_{AD.H.30}} \right)^2 = 3753,8 \text{ Вт}.$$

В рассматриваемом случае условие (25) не выполняется. Поэтому при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора при суммарном моменте нагрузки $M_{AD\Sigma} = M_{AD.H.45}$ использование нескольких АД мощностью 30кВт вместо одного АД мощностью 90кВт не приведёт к положительному энергетическому эффекту.

Поскольку потери энергии в АД сложным образом зависят от амплитуды и от частоты напряжения на обмотке статора, а также от момента нагрузки на валу АД, то записать достаточно точные и простые уравнения связи между потерями энергии в АД при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора и потерями энергии в АД при других значениях частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора не представляется возможным. Поэтому для того, чтобы определить при каком количестве двигателей в многодвигательном электроприводе будет получен наибольший энергетический эффект, необходимо провести исследование сравниваемых вариантов на математической модели. Для этого в MatLab в пакете SimPowerSystems была разработана мате-

математическая модель системы ПЧ-АД, в которой можно задать требуемый закон частотного управления АД и определить мощность потерь энергии в АД.

При математическом моделировании мощность потерь энергии в стали статора АД определялась по формуле:

$$\Delta P_c = \Delta P_{сн} \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1н}} \right)^2 \frac{\Omega_{0эл}}{\Omega_{0элн}} \left(0,7 + 0,3 \frac{\Omega_{0эл}}{\Omega_{0элн}} \right), \quad (19)$$

где $\Psi_1, \Psi_{1н}$ – текущее и номинальное значение потокоцепления обмотки статора АД, которые были определены с помощью математической модели системы ПЧ-АД;

$\Omega_{0эл}, \Omega_{0элн}$ – текущее и номинальное значения круговой частоты напряжения на обмотке статора АД;

0,7 и 0,3 – коэффициенты, которые учитывают долю потерь на гистерезис и долю потерь на вихревые токи в стали АД для номинального режима работы АД.

Мощность потерь энергии на активном сопротивлении 3-х фаз обмотки статора от тока нагрузки и от тока намагничивания определялась по формуле:

$$\Delta P_{M.1} + \Delta P_{M.1.0} = R_s (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)), \quad (20)$$

где R_s – активное сопротивление фазы обмотки статора АД;

$i_a(t); i_b(t); i_c(t)$ – мгновенные значения тока в фазах обмотки статора.

Мощность потерь энергии на активном сопротивлении 3-х фаз обмотки ротора от тока нагрузки определялась по формуле:

$$\Delta P_{M.2} = R_r (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)), \quad (21)$$

где R_r – активное сопротивление фазы обмотки ротора АД;

$i_a(t); i_b(t); i_c(t)$ – мгновенные значения тока в фазах обмотки ротора.

4. Результаты исследования

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении полностью загруженного автобуса (45 пассажиров), наполовину загруженного автобуса (22 пассажира) и пустого автобуса при значениях скорости движения автобуса, которые соответствуют значениям частоты напряжения на обмотке статора 50 Гц и 25 Гц и соответственно среднеквадратичным фазным значениям напряжения 220В и 110В, приведены в таблицах 4-9. В этих таблицах приняты следующие обозначения:

$P_{н,с}$ – суммарная номинальная мощность всех тяговых двигателей, кВт;

$\Delta P_{1,2,эл}$ – суммарная мощность потерь электрической энергии в обмотках статора и ротора всех тяговых двигателей, кВт;

$\Delta P_{сталь}$ – суммарная мощность потерь энергии в стали статора всех тяговых двигателей, кВт;

$\Delta P_{с}$ – суммарная мощность потерь энергии во всех тяговых двигателях, кВт;

$V_{авто}$ – скорость движения автобуса при текущих значениях амплитуды и частоты напряжения на обмотке статора и текущем значении момента сопротивления движению автобуса, км/час;

$M_{ад,с}$ – суммарный момент, развиваемый всеми тяговыми двигателями, который зависит от загрузки автобуса и от скорости его движения, Нм.

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении полностью загруженного автобуса (45 пассажиров) при скорости движения, которая соответствует частоте напряжения 50 Гц и среднеквадратичному фазному значению напряжения на обмотке статора 220В приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты расчёта мощности потери энергии в АД при движении полностью загруженного автобуса (45 пассажиров) при скорости движения, которая соответствует частоте 50 Гц и значению фазного напряжения на обмотке статора 220В

Количество пассажиров	45						
	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30	4×30
$P_{н,с}$, кВт							
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,421+	1,027+	(0,311+	1,469+	(0,411+	(0,226+	(0,1616+
	0,181	0,447	0,108)×2	0,6902	0,166)×2	0,073)×3	0,04087)×4
$\Delta P_{сталь}$, кВт	2,703	1,139	1,166×2	0,8533	0,884×2	0,895×3	0,899×4
$\Delta P_{с}$, кВт	3,7889	2,8576	3,6592	3,1773	3,2516	4,0764	5,0652
$V_{авто}$, км/час	56,26	55,84	56,21	55,45	56,02	56,2	56,29
$M_{ад,с}$, Нм	228,8	227,8	114,3×2	226,8	114,1×2	76,22×3	57,22×4

Из таблицы 4 видно, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или два двигателя мощностью 30 кВт, то это позволит уменьшить мощность потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии соответственно на 0,931 кВт (на 24,6%) и на 0,537 кВт (на 14,2%). Из таблицы 4 также видно, что использование одного двигателя мощностью 30 кВт недопустимо для длительного режима работы, поскольку приводит к перегрузке двигателя по моменту, и при этом суммарная мощность потерь энергии в АД превышает номинальное значение (таблица 2). Следовательно, в рассматриваемом режиме движения автобуса двигатель мощностью 30 кВт будет перегреваться.

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении наполовину загруженного автобуса (22 пассажира) при скорости движе-

ния, которая соответствует частоте 50 Гц и фазному напряжению на обмотке статора 220В приведены в таблице 5. Из таблицы 5 видно, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или один двигатель мощностью 30 кВт, то это позволит уменьшить мощность потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии, соответственно на 1,169 кВт (на 32,9%) и на 1,033 кВт (на 28,2%). Использование одного двигателя мощностью 30 кВт приводит к полной загрузке двигателя по моменту, мощность потерь энергии в стали также достигает номинального значения, но суммарная мощность потерь энергии в АД не превышает номинального значения. Поэтому при движении наполовину загруженного автобуса со скоростью 55,61 км/час можно использовать один двигатель мощностью 30 кВт.

Таблица 5.

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении наполовину загруженного автобуса (22 пассажира) при скорости движения, которая соответствует частоте 50 Гц и значению фазного напряжения на обмотке статора 220В

Количество пассажиров	22					
	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30
$P_{H\Sigma}$, кВт						
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,338+ 0,134	0,777+ 0,328	(0,252+ 0,080)×2	1,096+ 0,509	(0,325+ 0,123)×2	(0,188+ 0,054)×3
$\Delta P_{СТАЛЬ}$, кВт	2,709	1,146	1,169×2	0,862	0,889×2	0,897×3
ΔP_{Σ} , кВт	3,6649	2,4956	3,4912	2,6318	3,0036	3,9114
$V_{АУТО}$, км/час	56,3	55,95	56,26	55,61	56,10	56,25
$M_{АД\Sigma}$, Нм	197,5	196,6	98,7×2	195,8	98,5×2	65,8×3

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении пустого автобуса при скорости движения, которая соответствует частоте 50 Гц и значению фазного напряжения на обмотке статора 220В приведены в таблице 6. Из неё видно, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель

мощностью 45 кВт или один двигатель мощностью 30 кВт, то это позволит существенно уменьшить мощность потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии, соответственно на 1,354 кВт (на 38,2%) и на 1,362 кВт (на 38,2%).

Таблица 6.

Результаты расчёта мощности потери энергии в АД при движении пустого автобуса при скорости движения, которая соответствует частоте 50 Гц и значению фазного напряжения на обмотке статора 220В

Количество пассажиров	0					
	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30
$P_{H\Sigma}$, кВт						
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,271+ 0,097	0,580+ 0,235	(0,205+ 0,058)×2	0,806+ 0,364	(0,257+ 0,089)×2	(0,158+ 0,039)×3
$\Delta P_{СТАЛЬ}$, кВт	2,715	1,153	1,173×2	0,870	0,892×2	0,900×3
ΔP_{Σ} , кВт	3,5669	2,2126	3,3612	2,2048	2,8056	3,7854
$V_{АУТО}$, км/час	56,34	56,04	56,3	55,76	56,17	56,3
$M_{АД\Sigma}$, Нм	168,1	167,4	84,0×2	166,6	83,85×2	56,0×3

Аналогічні розрахунки були проведені при русі повного, наполовину повного і порожнього автобуса по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю приблизно рівної 28 км/год. Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі повністю завантаженого автобуса (45 пасажирів) зі швидкістю приблизно рівної 28 км/год, яка відповідає частоті напруги 25 Гц і значенню фазного напруги на обмотці статора 110В (таблиця 7), показали, що якщо замість одного двигача потужністю 90 кВт використовувати один двигач потужністю 45

кВт або два двигача потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела енергії відповідально на 0,376 кВт (на 18,6%) і на 0,192 кВт (на 9,5%). Можливо замість двигача потужністю 90 кВт використовувати один двигач потужністю 30 кВт, що зменшить потужність втрат енергії на 0,137кВт (на 6,8%), що декілька менше порівняно з варіантом, коли використовуються два двигача потужністю 30 кВт.

Таблиця 7.

Результати розрахунку потужності втрати енергії в АД при русі повністю завантаженого автобуса (45 пасажирів) при швидкості русі, яка відповідає частоті напруги 25 Гц і значенню фазного напруги на обмотці статора 110В

Кількість пасажирів	45						
	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30	4×30
$P_{н.с.}$, кВт	1,292+	0,658+	(0,219+	0,941+	(0,280+	(0,167+	(0,129+
$\Delta P_{1,2,эл.}$, кВт	0,109	0,274	0,065)×2	0,433	0,102)×2	0,044)×3	0,025)×4
$\Delta P_{сталь}$, кВт	1,139	0,471	0,489×2	0,348	0,369×2	0,376×3	0,379×4
ΔP_{Σ} , кВт	2,0239	1,6476	2,0352	1,8868	1,8316	2,2554	2,7912
$V_{авто}$, км/год	28,05	27,72	28,01	27,39	27,86	28,00	28,07
$M_{ад.с.}$, Нм	177,1	176,7	88,53×2	176,3	88,44×2	59,0×3	44,3×4

Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі наполовину завантаженого автобуса (22 пасажирів) зі швидкістю, яка відповідає частоті напруги 25 Гц і значенню фазного напруги на обмотці статора 110В, приведені в таблиці 8. З неї видно, що якщо замість одного двигача потужністю 90

кВт використовувати один двигач потужністю 45 кВт або один двигач потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела живлення, відповідально на 0,560 кВт (на 29,0%) і на 0,475 кВт (на 24,6%).

Таблиця 8.

Результати розрахунку потужності втрати енергії в АД при русі наполовину завантаженого автобуса (22 пасажирів) при швидкості русі, яка відповідає частоті напруги 25 Гц і значенню фазного напруги на обмотці статора 110В

Кількість пасажирів	22						
	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30	4×30
$P_{н.с.}$, кВт	1,228+	0,464+	(0,175+	0,647+	(0,214+	(0,139+	(0,113+
$\Delta P_{1,2,эл.}$, кВт	0,073	0,182	0,044)×2	0,287	0,068)×2	0,030)×3	0,017)×4
$\Delta P_{сталь}$, кВт	1,144	0,478	0,493×2	0,355	0,372×2	0,378×3	0,381×4
ΔP_{Σ} , кВт	1,9289	1,3686	1,9132	1,4538	1,6376	2,1354	2,7032
$V_{авто}$, км/год	28,09	27,82	28,06	27,57	27,94	28,05	28,11
$M_{ад.с.}$, Нм	145,8	145,4	72,9×2	145,1	72,8×2	48,6×3	36,4×4

Результати розрахунку потужності втрат енергії в АД при русі порожнього автобуса (без водія і без пасажирів) при швидкості русі, яка відповідає частоті напруги 25 Гц і значенню фазного напруги на обмотці статора 110В, приведені в таблиці 9. З неї

видно, що якщо замість одного двигача потужністю 90 кВт використовувати один двигач потужністю 45 кВт або один двигач потужністю 30 кВт, то це дозволить зменшити потужність втрат електричної енергії, споживаної від автономного бортового джерела енергії, соот-

ветственно на 0,695 кВт (на 37,4%) и на 0,723 кВт (на 38,9%). Применение двух двигателей мощностью 45 кВт или двух двигателей мощно-

стью 30 кВт даст значительно меньший эффект (соответственно 0,041 кВт и 0,364 кВт).

Таблица 9.

Результаты расчёта мощности потери энергии в АД при движении пустого автобуса со скоростью, которая соответствует частоте напряжения 25 Гц и значению фазного напряжения на обмотке статора 110В

Количество пассажиров	0						
	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30	4×30
$P_{Н,Σ}$, кВт	1,180+	0,322+	(0,141+	0,432+	(0,164+	(0,117+	(0,101+
$\Delta P_{1,2,эл}$, кВт	0,047	0,114	0,028)×2	0,178	0,043)×2	0,019)×3	0,011)×4
$\Delta P_{СТАЛЬ}$, кВт	1,149	0,484	0,496×2	0,362	0,376×2	0,380×3	0,382×4
$\Delta P_{Σ}$, кВт	1,8599	1,1646	1,8192	1,1368	1,4956	2,0424	2,6352
$V_{АУТО}$, км/час	28,13	27,92	28,1	27,72	28,01	28,1	28,14
$M_{АД,Σ}$, Нм	116,4	116,1	58,2×2	115,9	58,1×2	38,8×3	29,1×4

Был также проведен расчёт мощности потерь энергии в АД при движении полностью загруженного автобуса (45 пассажиров), наполовину загруженного автобуса (22 пассажира) и пустого автобуса (без водителя и без пассажиров) со скоростью (около 14 км/час), которая соответствует частоте напряжения 12,5 Гц и значению фазного напряжения на обмотке статора 55В. Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении полностью загруженного автобуса показывают, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или два двигателя мощностью 30 кВт, то это приведёт к незначительному уменьшению мощности потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии, соответственно на 0,046 кВт (на 3,4%) и на 0,005 кВт (на 0,4%).

Если при движении наполовину загруженного автобуса вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт, или два двигателя мощностью 30 кВт, то это приведёт к уменьшению мощности потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии, соответственно на 0,240 кВт (на 19,0%) и 0,104 кВт (на 8,3%).

Если при движении пустого автобуса вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или один двигатель мощностью 30 кВт, то это позволит уменьшить мощность потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии, соответственно на 0,373 кВт (на 31,1%) и на 0,358 кВт (на 29,8%).

Кроме статических режимов было проведено исследование эффективности работы многодвигательного привода в динамических режимах, а именно были оценены потери электриче-

ской энергии в обмотках статора и ротора АД, в стали АД и добавочные потери энергии при разгоне полного и пустого автобуса за 12,5 секунд до скорости примерно равной 56 км/час, которая соответствует частоте напряжения на обмотке статора равной 50 Гц при использовании закона частотного управления, который обеспечивает постоянное значение критического момента ($M_K = \text{const}$).

Результаты расчёта потерь энергии в АД при разгоне полностью загруженного автобуса (45 пассажиров) и при разгоне пустого автобуса приведены в таблицах 10-11. В этих таблицах приняты следующие обозначения:

$P_{Н,Σ}$ – суммарная номинальная мощность всех тяговых двигателей, кВт;

$\Delta E_{1,2,эл}$ – суммарная электрическая энергия потерь в обмотках статора и ротора всех тяговых двигателей за время разгона (за 12,5 с), кДж;

$\Delta E_{СТАЛЬ}$ – суммарная энергия потерь в стали статора всех тяговых двигателей за время разгона (за 12,5 с), кДж;

$\Delta E_{ДОБ}$ – суммарная энергия добавочных потерь во всех двигателях за время разгона (за 12,5 с), кДж

$\Delta E_{Σ}$ – суммарная энергия потерь во всех тяговых двигателях за время разгона (за 12,5 с), кДж;

$V_{АУТО}$ – скорость, до которой разгоняется автобус за 12,5 с при текущих значениях амплитуды и частоты напряжения на обмотке статора и при текущем значении момента сопротивления движению автобуса, км/час;

$M_{АД,Σ}$ – наибольшее значение суммарного момента, развиваемого всеми тяговыми двигателями при разгоне автобуса, который зависит от загрузки автобуса и от времени разгона автобуса, Нм.

Результаты расчёта потерь энергии в АД при разгоне полного автобуса за 12,5 секунд от 0 Hz до 50 Hz приведены в таблице 10. Из неё видно, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать 4 двигателя мощностью 45 кВт, то это позволит уменьшить потери электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии при разгоне автобуса, примерно на 127,17 кДж (на 44%). Если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать 7 двигателей мощностью 30 кВт, то это позволит уменьшить потери электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника питания при разгоне автобуса, примерно на 105,3 кДж (на 36%).

Результаты расчёта потерь энергии в АД при разгоне пустого автобуса приведены в таблице 11. Из неё видно, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать 3 двигателя мощностью 45 кВт, то это позволит уменьшить потери электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии при разгоне автобуса, примерно на 1,75 кДж (на 1,7%). Если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать 5 двигателей мощностью 30 кВт, то это увеличит потери электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии при разгоне автобуса, примерно на 11,32 кДж (на 11,0%).

Таблица 10.

Потери энергии при разгоне полного автобуса за 12,5 секунд от 0 Hz до 50 Hz при законе частотного управления, который обеспечивает постоянное значение критического момента ($M_K = \text{const}$)

Количество пассажиров в автобусе	45									
	1×90	2×45	3×45	4×45	5×45	5×30	6×30	7×30	8×30	
$P_{H\Sigma}$, кВт	1×90	2×45	3×45	4×45	5×45	5×30	6×30	7×30	8×30	
$\Delta E_{1,2,эл}$, кДж	173,7 +95,98	(86,82+ 40,35)×2	(34,01+ 15,34)×3	(20,77+ 9,050)×4	(15,57+ 6,575)×5	(24,21+ 11,54)×5	(17,44+ 8,136)×6	(13,78+ 6,295)×7	(11,61+ 5,200)×8	
$\Delta E_{СТАЛЬ}$, кДж	13,48	6,820×2	7,370×3	7,632×4	7,786×5	3,938×5	4,056×6	4,139×7	4,201×8	
$\Delta E_{ДОБ}$, кДж	6,049	3,057×2	3,057×3	3,057×4	3,057×5	2,060×5	2,060×6	2,060×7	2,060×8	
ΔE_{Σ} , кДж	289,21	274,09	179,33	162,04	164,94	208,74	190,15	183,92	184,57	
$V_{АУТО}$, км/час	52,73	53,14	54,32	54,7	54,91	53,85	54,21	54,44	54,61	
$M_{АДС}$, Нм	1266,2	627,7×2	423,8×3	319,9×4	257,4×5	252,9×5	211,7×6	181,9×7	159,8×8	

Таблица 11.

Потери энергии при разгоне пустого автобуса за 12,5 секунд от 0 Hz до 50 Hz при законе частотного управления, который обеспечивает постоянное значение критического момента ($M_K = \text{const}$)

Количество пассажиров в автобусе	0									
	1×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30	7×30	
$P_{H\Sigma}$, кВт	1×90	2×45	3×45	4×45	3×30	4×30	5×30	6×30	7×30	
$\Delta E_{1,2,эл}$, кДж	53,63+ 29,03	(29,46+ 13,18)×2	(16,15+ 6,849)×3	(12,33+ 5,020)×4	(25,62+ 12,25)×3	(15,48+ 7,151)×4	(11,50+ 5,143)×5	(9,591+ 4,175)×6	(8,566+ 3,653)×7	
$\Delta E_{СТАЛЬ}$, кДж	14,52	7,449×2	7,769×3	7,927×4	3,919×3	4,100×4	4,206×5	4,277×6	4,328×7	
$\Delta E_{ДОБ}$, кДж	6,049	3,057×2	3,057×3	3,057×4	2,060×3	2,060×4	2,060×5	2,060×6	2,060×7	
ΔE_{Σ} , кДж	103,23	106,29	101,48	113,34	131,55	115,16	114,55	120,62	130,25	
$V_{АУТО}$, км/час	54,39	54,41	54,87	55,07	53,74	54,31	54,6	54,79	54,92	
$M_{АДС}$, Нм	821,0	400,3×2	269,8×3	204,0×4	264,4×3	199,9×4	160,9×5	134,8×6	116,1×7	

Из таблиц 10-11 следует, что при разгоне автобуса на горизонтальной дороге от нуля до максимальной скорости энергетические преимущества многодвигательного электропривода проявляются только при разгоне полного автобуса с большой перегрузкой двигателя по моменту. При этом резко увеличиваются переменные потери в однодвигательном электроприводе. Поскольку в многодвигательном электроприводе суммарный момент нагрузки распределяется между всеми двигателями поровну, то суммарные переменные потери энергии и суммарные потери энергии в

многодвигательном электроприводе оказываются значительно меньшими. Это позволяет значительно уменьшить расход энергии при разгоне ТС. При этом, как следует из таблицы 10, для получения максимального энергетического эффекта суммарная мощность всех двигателей в многодвигательном электроприводе должна в 2,0 - 2,3 раза превышать мощность одного двигателя в однодвигательном электроприводе. Это позволит обеспечить большую скорость движения автобуса вверх по дороге, имеющей уклон.

Выводы

1. Проведённые исследования показали, что при движении полного, наполовину полного и пустого автобуса по горизонтальной дороге с постоянной скоростью двигатель мощностью 90 кВт оказывается существенно недогруженным. При этом суммарные потери энергии в однодвигательном электроприводе оказываются достаточно большими за счёт наличия больших постоянных потерь. Использование вместо одного двигателя большой мощности одного или нескольких двигателей малой мощности с меньшими постоянными потерями энергии позволяет уменьшить суммарные потери энергии, несмотря на то, что переменные потери в двигателях малой мощности могут быть больше переменных потерь в двигателе большой мощности. Чем меньше загружен автобус при одной и той же скорости движения (а точнее при одних и тех же значениях частоты и напряжения на обмотке статора), тем меньше доля переменных потерь и тем больше доля постоянных потерь в суммарных потерях энергии. В результате чем меньше загружен автобус, тем больше энергетический эффект от использования одного или нескольких двигателей малой мощности вместо одного АД большой мощности. Важно отметить, что это справедливо для любой скорости движения ТС.

2. При уменьшении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора уменьшаются потери в стали двигателя (уменьшаются постоянные потери энергии). Поэтому чем меньше скорость движения автобуса (чем меньше значение частоты напряжения на обмотке статора), тем меньше энергетический эффект от использования одного или нескольких двигателей малой мощности вместо одного АД большой мощности.

3. При разгоне автобуса на горизонтальной дороге от нуля до максимальной скорости энергетические преимущества многодвигательного электропривода проявляются только при большой перегрузке двигателя по моменту (например, разгоне полного автобуса или при разгоне с большим ускорением). При этом резко увеличиваются переменные потери в однодвигательном электроприводе. В многодвигательном электроприводе благодаря распределению момента нагрузки между двигателями переменные потери и, как следствие, суммарные потери энергии оказываются значительно меньшими. Это позволяет значительно уменьшить расход энергии при разгоне ТС. При этом суммарная мощность всех двигателей в многодвигательном электроприводе в 2,0 - 2,3 раза превышает мощность одного дви-

гателя в однодвигательном электроприводе. Это позволит увеличить скорость движения автобуса вверх по дороге, имеющей уклон, с помощью более мощного многодвигательного электропривода.

4. При разгоне пустого автобуса с тем же ускорением, что и полного автобуса, перегрузка двигателя по моменту не так велика, как при разгоне полного автобуса. При этом, благодаря распределению момента нагрузки между несколькими двигателями малой мощности, суммарные переменные потери энергии в многодвигательном электроприводе близки по значению к переменным потерям энергии в однодвигательном электроприводе. Поскольку постоянные потери в многодвигательном электроприводе увеличиваются с увеличением количества используемых маломощных двигателей, то энергетический эффект от применения многодвигательного электропривода оказывается значительно меньше или отсутствует вообще.

5. Для анализа энергетических процессов, которые протекают в асинхронном двигателе, в статье использовалась упрощённая математическая модель асинхронного двигателя, полученная на основании Т-образной схемы замещения АД. Для проведения более точного анализа энергетических процессов необходимо использовать более сложные и более точные математические модели асинхронных двигателей. В статье не учитываются проблемы, связанные с температурным режимом работы двигателя, с системой питания от источника с ограниченной мощностью и т.д. Тем не менее, результаты проведённого исследования показывают, что применение многодвигательного электропривода в городском цикле движения ТС позволяет существенно уменьшить потери электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника энергии.

Список использованной литературы

1. Вершинин, Д. В. Визначення параметрів основних вузлів електричної схеми електробуса [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Є. 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, Є. А. Смотров // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів Вип. 1. 2010. – С. 39–44.
3. Вершинин, Д.В. Визначення вимог до енергетичних параметрів електроприводу моторколіс електробуса [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, О. Г. Дашко, Є. О. Смо-

тров // «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, №28. – С. 303–304.

4. Вершинин, Д. В. Некоторые особенности построения системы управления многодвигательного электротранспортного средства [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электротехника и электромашиностроение*. Вып. 75. К. : Техніка, 2010. – С. 12–21.

5. 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.

6. Войтенко, В. А. Требования к параметрам асинхронного тягового двигателя электромотоцикла. [Текст] / В. А. Войтенко, // *Электротехнические и компьютерные системы* – № 15 (91). – К. : Техніка – 2014. – С. 129–131.

7. Старжинский, В. Е. Оптимизационные расчеты многоступенчатых и многопоточных зубчатых механизмов приборов. [Текст] / В. Е. Старжинский, Е. И. Мардосевич, М. П. Лобкова. // *Актуальные вопросы машиноведения*. – 2015. – Том 4. – С. 276–279.

8. Mendes, A. M. S. Thermal performance of a three-phase induction motor under fault tolerant operating strategies. [Text] / A. M. S. Mendes, X. M. Lopez-Fernandez. // *IEEE Transactions on Power Electronics*, – 2008. №23 (3). – p.p. 1537–1544.

9. Xiaofeng, Ding. Testing and modeling of Losses in Induction Machines. [Text] / Ding Xiaofeng, Liu Jinglin. // *Micro-motor*. – 2011.5, №44 (5). – p.p. 84–87.

10. Ruifang, Liu. Modeling of Eddy-Current Loss of Electrical Machines and Transformers Operated by Pulse-width-Modulated Inverters. [Text] / Liu Ruifang. // *IEEE Transactions on Magnetics*, – 2008, №44 (8): – p.p. 2021–2028.

11. Yuqing, Liu. Analysis and calculation of iron losses in induction motors fed by inverters. [Text] / Liu Yuqing, Li Yuqing // *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, – 2002. Vol.21 (2): – p.p. 29–31.

12. Xinzhen, Wu. Loss calculation for induction machine rotor bar with non-sinusoidal current. [Text] / Wu Xinzhen, Wang Xiangheng, Luo Cheng. // *Proceedings of the CSEE*, – 2005.9, №25 (17): – p.p. 131–135.

13. Pinglin, Huang. Analytical Calculation of the Iron Losses of Electric Machine Fed by PWM Inverter. [Text] / Huang Pinglin, Llu Qiansheng, Cai Yang. // *Proceedings of the CSEE*. – 2007.4, №27 (12): – p.p. 19–23.

14. Bradley, K. Predicting inverter induced harmonic loss by improved harmonic injection. [Text] / K. Bradley, W. Cao, J. Clare. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2008. №23(5): – p.p. 2619–2624.

15. Junfeng, Liu. Stator resistance influence on speed Sensorless system and on-line tuning. [Text] / Liu Junfeng, Li Yesong. // *Electric Drive*. – 2007, №11: – p.p. 6–9.

16. Sun, D. S. Research on Voltage-Chopping and Energy-Saving Controlling Technology for Three-Phase AC Asynchronous Motor. [Text] / D. S. Sun. // *Advanced Materials Research*. – 2012. p.p. 433-440, p.p. 1033–1037. doi: 10.4028 / www.scientific.net/amr.433-440.1033

17. 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

18. 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.

19. Dhaoui, M. A New Method for Losses Minimization IFOC Induction Motor Drives. [Text] / M. Dhaoui, L. Sbita. // *International Journal of Systems Control*, – 2010. № 1 (2), – p.p. 93–99.

20. Alssa, K. Vector Control Using Series Iron Loss Model of Induction Motors and Power Loss Minimization. [Text] / K. Alssa, K. D. Eddine. // *World Acad. Sci., Eng., Technol.*, – 2009. №52, – p.p. 142–148.

21. 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

22. Yang, Y. Improvement of Electric Submersible Pump in High Temperature. [Text] / Y. Yang. // *China Science and Technology Fortune*. – 2010.

23. Ostrovsky, A. Bazitratina method of determining the circuit parameters of the induction motor replacement. [Text] / A. Ostrovsky. *Praci Tavria State Agrotechnological University*, – 2012. №12 (2), – p.p. 66–72.

24. Ovcharov, S. Ways to reduce energy consumption in mobile units. [Text] / S. Ovcharov, A. Vovk. // Praci Tavria State Agrotechnological University, – 2013. №13 (4), – p.p. 21–26.

25. 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

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, DV., Vodichev, V. A., Voitenko, V. A., Dashko, O. G., Smotrov, E. O. (2010), "Determination of requirements for the energy parameters of the electric motor-wheel drive of the electric bus" [Vyznachennya vymoh do enerhetychnykh parametriv elektropryvodu motor-kolis elektrobusa], «Problems of automated electric drive. Theory and Practice» Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" - Kharkiv: NTU "KhPI", No. 28, p.p. 303–304.
4. 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.
5. 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.
6. Voitenko, V. A. (2014), "Requirements for the parameters of an asynchronous traction motor of an electric vehicle". [Trebovaniya k parametram asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya elektromobilya], Electrotechnical and Computer Systems - No. 15 (91), Kiev, Technics, p.p. 129–131.
7. Starzhinsky, V. E., Mardosevich, E. I., Lobkova, M. P. (2015), "Optimization calculations of multistage and multithreaded gear mechanisms of devices". [Optimizatsionnyye raschety mnogostupenchatykh i mnogopotochnykh zubchatykh mekhanizmov priborov], Actual issues of mechanical engineering, Volume 4, p.p. 276–279.
8. Mendes, A. M. S., Lopez-Fernandez, X. M. (2008), "Thermal performance of a three-phase induction motor under fault tolerant operating strategies", IEEE Transactions on Power Electronics, No. 23 (3), p.p. 1537–1544.
9. Xiaofeng, Ding., Jinglin, Liu. (2011), "Testing and modeling of Losses in Induction Machines." Micro-motor, No. 44 (5), p.p. 84–87.
10. Ruifang, Liu. (2008), "Modeling of Eddy-Current Loss of Electrical Machines and Transformers Operated by Pulse-width-Modulated Inverters", IEEE Transactions on Magnetics, No. 44 (8), p.p. 2021–2028.
11. Yuqing, Liu., Yuqing, Li. (2002), "Analysis and calculation of iron losses in induction motors fed by inverters", Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, Vol. 21 (2), p.p. 29–31.
12. Xinzheng, Wu., Xiangheng, Wang., Cheng, Luo. (2005), "Loss calculation for induction machine rotor bar with non-sinusoidal current", Proceedings of the CSEE, No. 25 (17), p.p. 131–135.
13. Pinglin, Huang., Qiansheng, Llu., Yang, Cai. (2007), "Analytical Calculation of the Iron Losses of Electric Machine Fed by PWM Inverter", Proceedings of the CSEE, No. 27 (12), p.p. 19–23.
14. Bradley, K., Cao, W., Clare, J. (2008), "Predicting inverter induced harmonic loss by improved harmonic injection", IEEE Transactions on Power Electronics, No. 23 (5), p.p. 2619–2624.
15. Junfeng, Liu., Yesong, Li. (2007), "Stator resistance influence on speed Sensorless system and on-line tuning", Electric Drive, No. 11, p.p. 6–9.
16. Sun, D. S. (2012), "Research on Voltage-Chopping and Energy-Saving Controlling Technology for Three-Phase AC Asynchronous Motor", Advanced Materials Research, p.p. 433–440, p.p. 1033–1037. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.1033
17. 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
18. Grouni, S., Ibtouen, R., Kidouche, M., Touhami, O. (2010), "Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Con-

trol”, International Journal of Systems Control, No. 1 (4), p.p. 163–169.

19. Dhaoui, M., Sbita. L. (2010), “A New Method for Losses Minimization IFOC Induction Motor Drives”, International Journal of Systems Control, No. 1 (2), p.p. 93–99.

20. Alssa, K., Eddine, K. D. (2009), “Vector Control Using Series Iron Loss Model of Induction Motors and Power Loss Minimization”, World Acad. Sci., Eng., Technol., No. 52, p.p. 142–148.

21. 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

22. Yang, Y. (2010), “Improvement of Electric Submersible Pump in High Temperature”, China Science and Technology Fortune.

23. Ostrovsky, A. (2012), “Bazitratina method of determining the circuit parameters of the induction motor replacement”, Praci Tavria State Agrotechnological University, No. 12 (2), p.p. 66–72.

24. Ovcharov, S., Vovk, A. (2013), “Ways to reduce energy consumption in mobile units”, Praci Tavria State Agrotechnological University, No. 13 (4), p.p. 21–26.

25. 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.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY INDICATORS OF SINGLE-MOTOR AND MULTIPLE-MOTOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

V. A. Voytenko, V. A. Vodichev, A. G. Kalinin

Odessa National Polytechnic University

Abstract. The aim of the work is to conduct a comparative analysis of single-engine and multi-engine asynchronous traction electric drive based on energy based on the assessment of energy losses in traction asynchronous electric motors of different power using the proportional law of frequency control to control the speed of traction asynchronous electric motors in the first zone. The energy loss analysis in traction asynchronous electric motors was carried out for three values of the voltage frequency on the stator winding 50 Hz, 25 Hz and 12.5 Hz and for three values of the total load moment corresponding to the full, half full and empty bus on the asphalt road. In determining the total load moment, the rolling resistance of the bus and the air resistance were taken into account. As a result of the analysis, a formula was obtained that allows, based on the power of constant and variable losses in compared electric motors corresponding to the nominal load moment, to determine the number of low-power engines that make up the multi-motor drive, which will provide the energy effect from the use of multi-motor electric - the drive instead of the single-motor electric drive. In addition, energy losses in the traction asynchronous electric motors included in the single-engine and multi-motor electric drive during acceleration of a full and empty bus to a maximum speed of 12.5 seconds were evaluated. To estimate the losses in the compared electric motors at voltage different from the nominal value, mathematical modeling was used in the MatLab package. It is shown that the use of a multi-motor asynchronous electric drive allows to reduce energy losses in traction asynchronous electric motors when the vehicle is moving at a constant speed and during acceleration with a different number of passengers. Moreover, to obtain the energy effect, the number of engines used in a multi-motor electric drive should vary depending on the speed and acceleration of the bus, as well as on the total load moment of the multi-motor drive.

Keywords: single-engine and multi-engine asynchronous traction electric drive, energy effect, power, energy losses in steel and copper.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОДНОДВИГУННОГО І БАГАТОДВИГУННОГО АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

В. А. Войтенко, В. А. Водічев, А. Г. Калінін

Одеський національний політехнічний університет

Анотація. Метою роботи є проведення попереднього спрощеного порівняльного аналізу енергетичних показників однодвигунного і багатодвигунного асинхронних тягових електроприводів на підставі оцінки втрат енергії в тягових асинхронних електродвигунах різної потужності. Для регу-

лювання швидкості тягових асинхронних електродвигунів в першій зоні використовується пропорційний закон частотного керування. Аналіз втрат енергії в тягових асинхронних електродвигунах проводився для трьох значень частоти напруги на обмотці статора 50 Гц, 25 Гц і 12,5 Гц і для трьох значень сумарного моменту навантаження, які відповідають руху повного, наполовину повного і порожнього автобуса по горизонтальній дорозі. При визначенні сумарного моменту навантаження враховувався опір коченню автобуса і опір повітря. В результаті проведеного спрощеного аналізу була отримана формула, яка дозволяє на підставі потужності постійних і змінних втрат енергії визначити кількість двигунів малої потужності, що входять до складу багатодвигунного електроприводу, при якому буде забезпечений енергетичний ефект від застосування багатодвигунного електроприводу замість однодвигунного електроприводу. Крім того була проведена оцінка втрат енергії в тягових асинхронних електродвигунах, що входять до складу однодвигунного і багатодвигунного електроприводу при розгоні повного і порожнього автобуса до максимальної швидкості за 12,5 секунд. Для оцінки втрат в порівнюваних електродвигунах при нарузі, відмінній від номінального значення, використовувалося математичне моделювання в пакеті MatLab. Показано, що застосування багатодвигунного асинхронного електроприводу дозволяє зменшити втрати енергії в тягових асинхронних електродвигунах при русі транспортного засобу з постійною швидкістю і при розгоні при різних експлуатаційних умовах. Причому для отримання енергетичного ефекту кількість двигунів, які використовуються в багатодвигунному електроприводі, має змінюватися в залежності від швидкості і прискорення руху автобуса, а також від сумарного моменту навантаження багатодвигунного електроприводу.

Ключові слова: однодвигунний електропривод, багатодвигунний електропривод, асинхронний електропривод, потужність втрат енергії.

Получено 31.07.2019.



Войтенко Владимир Андреевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением, Одесский национальный политехнический университет. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: elektrik.WA.@gmail.com, тел. +38-048-705-84-67.

Vladimir Voytenko, Ph.D, Associate Professor of the department of electromechanical systems with computer control, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: elektrik.WA.@gmail.com, tel. +38-048-705-84-67.

ORCID ID: 0000-0002-2525-6913.



Водичев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханических систем с компьютерным управлением Одесский национальный политехнический университет. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: vva@eei.opu.ua, с.: +38(050)2347722

Vladimir Vodichev, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of electro-mechanical system with computer control, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: vva@eei.opu.ua, с.: +38(050)2347722

ORCID ID: 0000-0002-7204-1149.



Калинин Александр Георгиевич, старший преподаватель кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесский национальный политехнический университет. Просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина. E-mail: agk@opu.ua тел. +38-050-392-1298

Alexander Kalinin senior Lecturer of Department of Department of electro-mechanical systems with computer control, Odessa National Polytechnic University. Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: agk@opu.ua тел. +38-050-392-1298

ORCID ID: 0000-0003-2654-9969.