

Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport

Voytenko V.A., Vodichev V.A., Kalinin A.G.
Odessa National Polytechnic University
Odessa, Ukraine

Abstract. The aim of this article was to analyze the profitability of using a multi-motor electric drive instead of a single-motor electric drive in a city vehicle to ensure the reduction of the electrical energy losses. To achieve the goal a mathematical model was used to calculate the energy losses in the single-motor and multi-motor electric drives of a bus with a different number of traction induction motors. The calculation was carried out for the steady-state driving modes with different speeds and transient acceleration modes. The change in the load torque of the vehicle's motors due to the change in the rolling friction force of the wheels with a different number of passengers carried was taken into account. The novelty of the work is that the use of a multi-motor electric drive shown for the first time allowed the reduction in the energy losses in the traction induction electric motors when the vehicle is moving at a constant speed and during acceleration with a different number of passengers carried. Moreover, to obtain energy saving, the number of motors used in a multi-motor electric drive should vary depending on the speed and acceleration, as well as on the total load torque of the multi-motor drive. The formula was obtained analytically for the calculation of the number of motors of a multi-motor electric drive, which would ensure energy saving compared to a single-motor electric vehicle.

Keywords: induction motor, vehicle, power, energy loss, single-motor and multi-motor drive, voltage frequency, voltage amplitude.

DOI: 10.5281/zenodo.3239179

Analiza indicatorilor tehnici și energetici a unei transmisii electrice cu multe motoare pentru transportul public urban

Voitenko V.A., Vodichev V.A., Kalinin A.G.
Universitatea Politehnică Națională din Odessa
Odessa, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a analiza fezabilitatea utilizării unei transmisii electrice cu mai multe motoare în locul unui motor cu motor unic într-un vehicul urban pentru a asigura reducerea pierderilor de energie electrică la deplasarea pe o rută. Pentru a atinge obiectivul, se utilizează un model matematic pentru a calcula pierderile de energie în unitățile electrice monomotoare și multimotoare ale unei magistrale cu un număr diferit de motoare asincrone de tracțiune. Calculul a fost efectuat pentru cele mai caracteristice secțiuni ale ciclului urban al autobuzului: moduri de conducere la starea de echilibru cu viteze diferite și moduri de accelerare tranzitorie. Pentru a controla viteza motoarelor, se folosește legea proporțională a variației tensiunii pe bobina statorică și frecvența. Se ia în considerare schimbarea momentului de încărcare a motoarelor vehiculului datorită modificării forței de frecare la rulare a roților cu un număr diferit de pasageri transportați. Se ia în considerare modificarea sarcinii datorită rezistenței la aer atunci când se schimbă viteza de mișcare. Noutatea lucrării constă în faptul că s-a demonstrat pentru prima dată că utilizarea unui mecanism electric asincron cu mai multe motoare permite reducerea pierderilor de energie în motoarele electrice asincrone de tracțiune atunci când vehiculul se deplasează cu o viteză constantă și în timpul accelerării cu un număr diferit de pasageri transportați. Mai mult decât atât, pentru a obține economii de energie, numărul de motoare utilizate într-un motor electric cu mai multe motoare ar trebui să varieze în funcție de viteză și de accelerație, precum și de momentul de încărcare total al transmisiei multimotor.

Cuvinte-cheie: motor asincron, vehicul, putere, pierdere de energie, unitate electrică cu motor și multimotor, frecvență de tensiune, amplitudine de tensiune.

Анализ технических и энергетических показателей многодвигательного электропривода для городского общественного транспорта

Войтенко В.А., Водичев В.А., Калинин А.Г.
Одесский национальный политехнический университет
Одесса, Украина

Аннотация. Целью работы является анализ целесообразности применения многодвигательного электропривода вместо однодвигательного в городском транспортном средстве для обеспечения уменьшения потерь электрической энергии при движении по маршруту. Для достижения цели на

математической модели выполнен расчет потерь энергии в однодвигательном и многодвигательном электроприводах автобуса с разным количеством тяговых асинхронных двигателей. Расчет проведен для наиболее характерных участков городского цикла движения автобуса: установившихся режимов движения с разными скоростями и переходных режимов ускорения. Для управления скоростью двигателей использован пропорциональный закон изменения напряжения на обмотке статора и частоты. Учтено изменение момента нагрузки двигателей транспортного средства из-за изменения силы трения качения колес при разном количестве перевозимых пассажиров. Учтено изменение нагрузки из-за сопротивления воздуха при изменении скорости движения. Новизна работы заключается в том, что впервые показано, что применение многодвигательного асинхронного электропривода позволяет уменьшить потери энергии в тяговых асинхронных электродвигателях при движении транспортного средства с постоянной скоростью и при разгоне при разном количестве перевозимых пассажиров. Причём, для получения экономии электроэнергии количество двигателей, используемых в многодвигательном электроприводе, должно меняться в зависимости от скорости и ускорения, а также от суммарного момента нагрузки многодвигательного электропривода. Аналитически получена формула, которая позволяет на основании мощности постоянных и переменных потерь в сравниваемых электродвигателях, определить количество двигателей малой мощности, входящих в состав многодвигательного электропривода, при котором будет обеспечена экономия электроэнергии при применении многодвигательного электропривода вместо однодвигательного.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, транспортное средство, мощность, потери энергии, однодвигательный и многодвигательный электропривод, частота напряжения, амплитуда напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что загрязнение окружающей среды, в частности вызванное выхлопными газами автомобилей и автобусов, является серьезной 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 тягово-ый электрический привод.

Для ТС, в которых используется автономный источник энергии, важным является вопрос выбора рациональной структуры электропривода, при которой будет обеспечена минимизация потерь электрической энергии. Это позволит увеличить дальность пробега при одинаковом начальном количестве энергии. При изменении количества перевозимых пассажиров и груза, при изменении угла наклона дороги и скорости движения ТС для минимизации потерь электрической энергии может потребоваться использовать разное количество двигателей, которые через редуктор с несколькими входными валами, приводят в движение карданный вал или полуоси ведущих колёс ТС [1].

В современных ТС как правило используют синхронные двигатели (СД) с возбуждением от постоянных магнитов или асинхронные двигатели (АД). СД с

возбуждением от постоянных магнитов являются наиболее энергоэффективными, поскольку не расходуют энергию на создание магнитного поля и имеют наиболее высокие значения удельного момента и удельной мощности. АД являются наиболее простыми по конструкции, наиболее надёжными и дешёвыми [2].

Аналізу мощности потерь в АД и методам их уменьшения посвящено значительное количество публикаций. В литературных источниках предложена математическая модель для анализа потерь в АД при питании от преобразователя частоты (ПЧ) [3], разработаны методы управления для обеспечения работы АД с минимальными потерями в меди при полеориентированном управлении [4, 5] и прямом управлении крутящим моментом [6], проанализирована энергоэффективность АД при питании синусоидальным и несинусоидальным напряжением [7].

Разработаны модели для исследования потерь в стали АД при питании от ПЧ [8], выполнена оценка потерь на вихревые токи [9], проведен анализ основных и гармонических потерь в стали для двигателей разной мощности [10, 11, 12]. Проанализированы потери энергии в АД при несимметричных провалах напряжения [13], а также потери в различных элементах системы ПЧ-АД [14 – 18]. В работе [19] сообщается об упрощенной эквивалентной схеме, с помощью которой включают в баланс

мощности паразитные нагрузки от пространственных гармоник. В работе [20] для определения потерь в АД предложен метод эквивалентной нагрузки. Предложена новая схема управления минимизацией потерь для приводов метрополитена на базе линейного асинхронного двигателя [21]. Разработан метод минимизации потерь для лифтовых систем с АД для определения оптимальной скорости [22].

Математическое описание режимов работы, в которых возможно снижение потерь в АД при питании от тиристорного преобразователя напряжения, выполнено в работах [23, 24].

Таким образом, в литературных источниках отсутствует сравнительная оценка потерь электрической энергии в однодвигательном и многодвигательном электроприводах по системе ПЧ-АД в установившихся и переходных режимах при различных нагрузках. Это не дает возможности обосновать выбор наилучшей по энергетическим показателям однодвигательной или многодвигательной системы электропривода для городских транспортных средств.

Целью работы является анализ и обоснование целесообразности применения многодвигательного электропривода вместо однодвигательного в городском транспортном средстве для обеспечения уменьшения потерь электрической энергии.

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Упрощённая функциональная схема однодвигательного и многодвигательного тягового электропривода показана на рис. 1 и на рис. 2. На этих функциональных схемах приняты следующие обозначения: 1 – тяговые электродвигатели; 2 – редуктор; 3 – карданный вал; 4 – механический дифференциал; 5 – полуоси ведущих колёс; 6 – ведущие колёса.

На рис. 3 показана функциональная схема многодвигательного тягового электропривода каждого ведущего колеса. На рис. 3 приняты такие же обозначения, как и на рис. 1 и рис. 2.

Применение на ТС многодвигательного электропривода имеет ряд преимуществ по сравнению с применением однодвигательного электропривода.

Для улучшения управляемости ТС важно распределить нагрузку поровну между

передней и задней осью. Один большой и тяжёлый ТЭД приходится размещать в передней или в задней части ТС (рис.1), что перегружает переднюю или заднюю ось и ухудшает управляемость ТС. В многодвигательном электроприводе (рис.2) используются несколько ТЭД меньших размеров и меньшей массы, которые можно разместить между осями в средней части ТС без большого ущерба для его конструкции. В результате масса двигателей будет распределена более равномерно между передней и задней осью, что улучшит управляемость ТС.

При использовании однодвигательного или многодвигательного тягового электропривода для каждого ведущего колеса (рис.3) двигатели, как правило, располагают на неподрессоренной части ТС. Поэтому при эксплуатации ТС на неровных дорогах ТЭД подвергаются механическим ударным нагрузкам. Это уменьшает надежность и долговечность ТЭД.

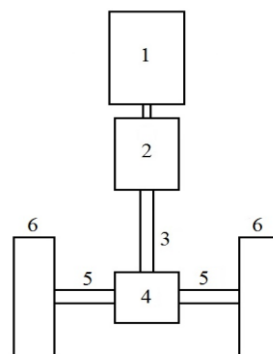


Рис.1. Функциональная схема однодвигательного тягового электропривода.

Fig. 1. Functional diagram of a single-motor traction drive.

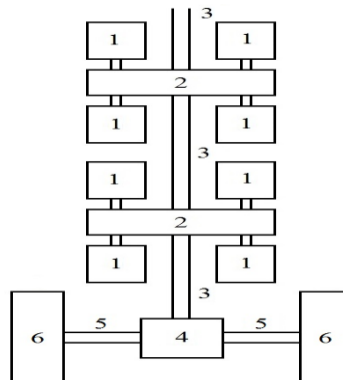


Рис.2. Функциональная схема многодвигательного тягового электропривода.

Fig. 2. Functional diagram of a multi-motor traction drive.

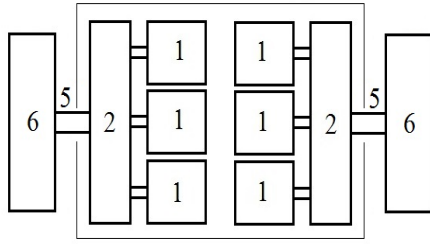


Рис.3. Функциональная схема многодвигательного тягового электропривода каждого ведущего колеса.

Fig. 3. Functional diagram of the multi-motor traction drive of each drive wheel.

При использовании однодвигательного или многодвигательного тягового электропривода, выполненного по функциональным схемам, приведенным на рис.1 и рис.2, благодаря наличию карданного вала, двигатели располагают на подрессоренной части ТС.

В результате они будут подвергаться на много меньшим механическим ударным нагрузкам. Это повышает надежность и долговечность ТЭД особенно при эксплуатации ТС на плохих дорогах.

Поскольку в многодвигательном электроприводе используются двигатели меньшего габарита, чем в однодвигательном, то они лучше встраиваются в конструкцию корпуса ТС.

При использовании многодвигательного тягового электропривода повышается надежность электропривода и ТС в целом. В ТС с одним ТЭД (рис.1) повреждение ТЭД приводит к остановке ТС. При использовании многодвигательного тягового электропривода поломка одного или нескольких ТЭД не является критичной, поскольку ТС может продолжать движение с помощью остальных неповреждённых двигателей.

В результате уменьшаются потери от простоя ТС. Кроме того, уменьшается цена двигателей, находящихся в резерве не ремонтном предприятии.

Сравнительный анализ и оценка энергетических показателей однодвигательного и многодвигательного электропривода проведены на примере украинского автобуса «Богдан» модели А-09202.

Автобус предназначен для перевозки 45 пассажиров, масса автобуса с пассажирами составляет 8230 кг, он оснащён двигателем внутреннего сгорания мощностью 89 кВт.

Проведенный расчет показал, что при КПД главной передачи и карданного вала равным 90%, а КПД электропривода – 80%, для перемещения полностью загруженного пассажирами автобуса по асфальтированной горизонтальной дороге на расстояние 100 км со скоростью 50 км/час требуется потратить 271 МДж (или 75,2 кВт×час.) электрической энергии. Стоимость электрической энергии, потраченной на выполнение этой работы в 3,5 раза меньше стоимости дизельного топлива. Поэтому экономическая эффективность замены дизельного двигателя электрическим приводом очевидна.

Для оценки энергетической эффективности электрического привода был проведен расчет потерь энергии в ТЭД.

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

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

где P_{2H} – номинальная мощность механической энергии на валу АД; η_H – номинальный коэффициент полезного действия АД.

Мощность потерь энергии в меди обмотки 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 вращения вала АД, которая соответствует текущему значению частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора; s – скольжение ротора относительно магнитного поля, соответствующее значению момента, который развивает АД.

При работе АД в номинальном режиме мощность потерь энергии в меди обмотки ротора

$$\Delta P_{M.2.H} = M_{AD.H} \omega_0 s_H, \quad (3)$$

где $M_{AD.H}$ – номинальный момент развиваемый АД; s_H – номинальное значение скольжения ротора относительно магнитного поля.

Если принять, что при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора жёсткость рабочего участка

механической характеристики АД не изменятся, то для текущего значения момента на валу АД и текущего значения скольжения его вала 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:

$$\begin{aligned} \Delta P_{M.2} &= M_{AD} \omega_0 \frac{M_{AD}}{M_{AD.H}} s_H = \frac{M_{AD}^2}{M_{AD.H}^2} M_{AD.H} \omega_0 s_H ; \\ \Delta P_{M.2} &= \frac{M_{AD}^2}{M_{AD.H}^2} \Delta P_{M.2.H} ; \end{aligned} \quad (5)$$

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 ротора по формуле:

$$\Delta P_{M.1} = \Delta P_{M.2} \frac{R_1}{R_2'} , \quad (6)$$

где R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора АД; R_2' – 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 ротора через номинальную мощность потерь энергии в меди обмотки ротора АД по формуле:

$$\Delta P_{M.1} = \frac{M_{AD}^2}{M_{AD.H}^2} \Delta P_{M.2.H} \frac{R_1}{R_2'} . \quad (7)$$

Если принять, что вектор тока намагничивания отстаёт от вектора тока, протекающего в обмотке ротора на $\pi/2$ электрических радиан, то значение тока намагничивания для

номинального режима работы АД можно определить по формуле:

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

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

$$\begin{aligned} \Delta P_{M.1.0.H} &= 3 \cdot R_1 \cdot I_{0.H}^2 ; \\ \Delta P_{M.1.0.H} &= 3 \cdot R_1 \cdot I_{1.H}^2 (1 - \cos^2 \varphi_H) . \end{aligned} \quad (9)$$

Мощность дополнительных потерь энергии в двигателе считаем постоянной независимо от значения частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора и от момента нагрузки на валу АД

$$\Delta P_{\text{доб.н}} = 0,005 \cdot \frac{P_{2H}}{\eta_H} . \quad (10)$$

Мощность потерь энергии в стали для номинального режима работы АД

$$\Delta P_{C.H} = \Delta P_H - (\Delta P_{M.1.H} + \Delta P_{M.2.H} + \Delta P_{M.1.0.H} + \Delta P_{\text{доб}}) . \quad (11)$$

При постоянном значении частоты и амплитуды напряжения 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 можно определить по формуле:

$$\Delta P_{H.CONST} = \Delta P_{C.H} + \Delta P_{M.1.0.H} + \Delta P_{\text{доб.н}} . \quad (12)$$

Для номинального режима работы АД мощность переменных потерь

$$\Delta P_{H.VARIA.} = \Delta P_{M.1.H} + \Delta P_{M.2.H} . \quad (13)$$

Из формул (5), (7) и (13) следует, что мощность переменных потерь энергии в АД при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора, но при про-

извольном значении момента нагрузки на валу АД можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta P_{VARIA} &= \Delta P_{M.2.H} \left(\frac{M_{AD}}{M_{AD.H}} \right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = \\ &= \Delta P_{H.VARIA} \left(\frac{M_{AD}}{M_{AD.H}} \right)^2. \end{aligned} \quad (14)$$

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

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 большой мощности несколькими двигателями меньшей мощности, которые работают при одинаковых значениях амплитуды и частоты напряжения на обмотке статора, должно выполняться условие:

$$\begin{aligned} (\Delta P_{VARIA.45} + \Delta P_{CONST.45}) N_{45} \leq \\ \leq (\Delta P_{VARIA.90} + \Delta P_{CONST.90}), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta P_{VARIA.45}$; $\Delta P_{CONST.45}$ – мощность переменных и постоянных потерь энергии в АД мощностью 45 кВт; $\Delta P_{VARIA.90}$; $\Delta P_{CONST.90}$ – мощность переменных и постоянных потерь энергии в АД мощностью 90 кВт; N_{45} – количество АД мощностью 45 кВт, которые заменяют один АД мощностью 90 кВт.

В частности, при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора в формулу (15) подставим правую часть формулы (14) 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:

$$\begin{aligned} \left(\Delta P_{H.VARIA.45} \left(\frac{M_{AD.\Sigma}}{N_{45} \cdot M_{AD.H.45}} \right)^2 + \Delta P_{CONST.45} \right) N_{45} \leq \\ \leq \left(\Delta P_{H.VARIA.90} \left(\frac{M_{AD.\Sigma}}{M_{AD.H.90}} \right)^2 + \Delta P_{CONST.90} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

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

После преобразований формулу (16) можно представить в виде:

$$aN_{45}^2 - bN_{45} + c \leq 0, \quad (17)$$

где

$$a = \Delta P_{CONST.45}; \quad (18)$$

$$b = \Delta P_{H.VARIA.90} \left(\frac{M_{AD.\Sigma}}{M_{AD.H.90}} \right)^2 + \Delta P_{CONST.90}; \quad (19)$$

$$c = \Delta P_{H.VARIA.45} \left(\frac{M_{AD.\Sigma}}{M_{AD.H.45}} \right)^2. \quad (20)$$

Решая неравенство (17), получим условие, которому должно удовлетворять количество двигателей мощностью 45 кВт, чтобы потери энергии в многодвигательном электроприводе были меньше потерь энергии в однодвигательном электроприводе:

$$N_{45.min} \leq N_{45} \leq N_{45.max}. \quad (21)$$

где

$$N_{45.min} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad (22)$$

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

Задача имеет решение при выполнении условия:

$$b^2 - 4ac \geq 0. \quad (24)$$

В противном случае использование нескольких двигателей меньшей мощности вместо одного АД большой мощности не приведёт к положительному энергетическому эффекту.

Например, при номинальном значении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора необходимо определить количество АД мощностью 45 кВт, 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 (18) – (23) 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 (21) следует, что при номинальном значении частоты и амплитуды 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.

Определим количество АД мощностью 30 кВт, которое надо использовать вместо одного АД мощностью 90 кВт для получения энергетического эффекта при суммарном моменте нагрузки $M_{AD,\Sigma} = M_{AD,H.45}$. На основании формул (18) – (23), с учётом мощности потерь в номинальном режиме работы двигателей, 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 (24) 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 30 кВт вместо одного АД мощностью 90 кВт не приводит к положительному энергетическому эффекту.

Поскольку потери энергии в АД сложным образом зависят от амплитуды и 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 пакете SimPower Systems была разработана математи-

ческая модель системы преобразователь частоты – АД, в которой можно задать требуемый закон изменения напряжения и частоты и определить мощность потерь в АД.

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

$$\Delta P_c = \Delta P_{c,H} \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1,H}} \right)^2 \frac{\Omega_{0\Omega L}}{\Omega_{0\Omega L,H}} \left(0,7 + 0,3 \frac{\Omega_{0\Omega L}}{\Omega_{0\Omega L,H}} \right), \quad (25)$$

где $\Psi_1, \Psi_{1,H}$ – текущее и номинальное значение потокосцепления обмотки статора АД; $\Omega_{0\Omega L}, \Omega_{0\Omega L,H}$ – текущее и номинальное значения круговой частоты напряжения на обмотке статора АД; 0,7 и 0,3 – коэффициенты, которые учитывают доли потерь на гистерезис и на вихревые токи в стали для номинального режима работы АД.

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

$$\Delta P_{M.1} + \Delta P_{M.1.0} = R_s (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)), \quad (26)$$

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:

$$\Delta P_{M.2} = R_r (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)), \quad (27)$$

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.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении автобуса с 45 пассажирами при скорости движения около 56 км/час, которая соответствует частоте напряжения 50 Гц и фазному действующему значению напряжения на обмотке статора 220 В приведены в таблице 1. Из неё видно, что если вместо одного двигателя номинальной мощностью $P_n = 90$ кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или два двигателя мощностью 30 кВт, то это позволит

уменьшить суммарную мощность потерь ΔP_{Σ} электрической энергии соответственно на 0,931 кВт (на 24,6%) и на 0,537 кВт (на 14,2%). Из таблицы 1 также видно, что использование одного двигателя мощностью

30 кВт недопустимо для длительного режима работы, суммарная мощность потерь энергии в АД превышает номинальное значение 1359 Вт. Следовательно, двигатель мощностью 30 кВт будет перегреваться.

Таблица 1¹.

Мощность потерь энергии в двигателях автобуса при движении с постоянной скоростью с 45 пассажирами².

P_n , kW	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30	4×30
$\Delta P_{M1} + \Delta P_{M10} + \Delta P_{M2}$, kW	0,602	1,474	0,838	2,159	0,577×2	0,299×3	0,202×4
ΔP_c , kW	2,703	1,139	2,332	0,8533	0,884×2	0,895×3	0,899×4
ΔP_{Σ} , kW	3,7889	2,8576	3,6592	3,1773	3,2516	4,0764	5,0652

Результаты аналогичного расчёта при движении автобуса с 22 пассажирами показали, 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 питания 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 меньше

номинальной, поэтому при движении наполовину загруженного автобуса со скоростью 55,6 км/час можно использовать один двигатель мощностью 30 кВт.

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении автобуса без пассажиров при скорости около 56 км/час приведены в таблице 2. 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 питания соответственно на 1,354 кВт (на 38,2%) и на 1,362 кВт (на 38,2%).

Таблица 2³.

Мощность потерь энергии в двигателях автобуса при движении с постоянной скоростью без пассажиров⁴.

P_H , kW	1×90	1×45	2×45	1×30	2×30	3×30
$\Delta P_{M1} + \Delta P_{M10} + \Delta P_{M2}$, kW	0,368	0,815	0,263 ×2	1,170	0,346 ×2	0,197 ×3
ΔP_c , kW	2,715	1,153	1,173×2	0,870	0,892×2	0,900×3
ΔP_{Σ} , kW	3,5669	2,2126	3,3612	2,2048	2,8056	3,7854

Аналогичные расчёты были проведены при движении полного, наполовину полного и пустого автобуса по горизонтальной дороге с максимальной скоростью примерно равной 28 км/час и 14 км/час. Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении автобуса с 45 пассажирами со скоростью 28 км/час (действующее значение напряжения на обмотке статора 110 В, частота 25 Гц) показали, 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, соответственно на 0,376 кВт (на 18,6%) и на 0,192 кВт (на 9,5%). Если вместо двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 30 кВт, то это уменьшит мощность потерь энергии на 0,137кВт, что несколько меньше по сравнению с вариантом, когда используются два двигателя мощностью 30 кВт.

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении автобуса с 22 пассажирами со скоростью, 28 км/час

показали, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или один двигатель мощностью 30 кВт, то мощность потерь электрической энергии уменьшится соответственно на 0,560 кВт (на 29,0%) и на 0,475 кВт (на 24,6%).

Результаты расчёта для случая движения автобуса без пассажиров со скоростью, соответствующей частоте напряжения 25 Гц и среднеквадратичному значению фазного напряжения на обмотке статора 110 В, показали, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать один двигатель мощностью 45 кВт или один двигатель мощностью 30 кВт, то мощность потерь электрической энергии уменьшится соответственно на 0,695 кВт (на 37,4%) и на 0,723 кВт (на 38,9%). Применение двух двигателей мощностью 45 кВт или двух двигателей мощностью 30 кВт даст значительно меньший эффект (соответственно 0,041 кВт и 0,364 кВт).

Результаты расчёта мощности потерь энергии в АД при движении полностью загруженного автобуса со скоростью около 14 км/час, которая соответствует частоте напряжения 12,5 Гц и среднеквадратичному значению фазного напряжения на обмотке статора 55 В, показали, 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, соответственно на 0,046 кВт (на 3,4%) и на 0,005 кВт (на 0,4%). Для наполовину загруженного автобуса использование одного двигателя мощностью 45 кВт, или двух двигателей мощностью 30 кВт приводит к уменьшению мощности потерь электрической энергии соответственно на 0,240 кВт (на 19,0%) и 0,104 кВт (на 8,3%).

Для пустого автобуса использование одного двигателя мощностью 45 кВт или одного двигателя мощностью 30 кВт позволит уменьшить мощность потерь электрической энергии соответственно на 0,373 кВт (на 31,1%) и на 0,358 кВт (на 29,8%).

Кроме режимов движения с постоянной скоростью было проведено исследование эффективности работы многодвигательного привода в характерных для городского цикла движения автобуса переходных режимах. Были оценены потери энергии в меди обмоток статора ΔE_1 и ротора ΔE_2 , в стали ΔE_{steel} , и добавочные потери ΔE_{DOB} 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.

Результаты расчёта потерь энергии в АД при разгоне полного автобуса за 12,5 секунд при изменении частоты напряжения на статоре от 0Гц до 50Гц приведены в таблице 3. Из неё видно, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать 4 двигателя мощностью 45 кВт, то это позволит уменьшить суммарные потери электрической энергии ΔE_{Σ} 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 при разгоне автобуса примерно на 105,3 кДж (на 36%).

Результаты аналогичного расчёта потерь энергии в АД при разгоне пустого автобуса показали, что если вместо одного двигателя мощностью 90 кВт использовать 3 двигателя мощностью 45 кВт, то потери электрической энергии уменьшатся примерно на 1,75 кДж (на 1,7%).

Таблица 3⁵.

Потери энергии при разгоне автобуса⁶.

P_H, kW	1×90	2×45	3×45	4×45	5×45	5×30	6×30	7×30	8×30
$\Delta E_1 + \Delta E_2, kJ$	173,7	(86,82+	(34,01+	(20,77+	(15,57+	(24,21+	(17,44+	(13,78+	(11,61+
	+95,98	40,35)×2	15,34)×3	9,050)×4	6,575)×5	11,54)×5	8,136)×6	6,295)×7	5,200)×8
$\Delta E_{steel}, kJ$	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
$\Delta E_{DOB}, kJ$	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
$\Delta E_{\Sigma}, kJ$	289,21	274,09	179,33	162,04	164,94	208,74	190,15	183,92	184,57

^{5,6} Appendix 1

III. ВЫВОДЫ

1. При движении автобуса по горизонтальной дороге с постоянной скоростью при любом количестве пассажиров 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. Это приводит к тому, что, чем меньше загружен автобус при одинаковой скорости движения (а точнее при одинаковых значениях частоты и амплитуды 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. Важно отметить, что это справедливо для любой скорости движения автобуса.

2. При уменьшении частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора уменьшаются потери в стали. Поэтому, чем меньше скорость движения автобуса, тем меньше энергетический эффект от использования одного или нескольких двигателей малой мощности.

3. При разгоне автобуса по 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 существенно увеличиваются переменные потери в однодвигательном электроприводе. В многодвигательном электроприводе, благодаря распределению момента нагрузки между двигателями, переменные потери и 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

двигателя в однодвигательном электроприводе. При движении вверх по дороге, имеющей уклон, избыточная мощность многодвигательного электропривода может быть полезной.

4. При разгоне пустого автобуса перегрузка двигателя по моменту не так велика, как при разгоне полного автобуса. При этом переменные потери энергии в многодвигательном электроприводе близки по значению к переменным потерям энергии в однодвигательном электроприводе благодаря распределению момента нагрузки между двигателями малой мощности за счёт увеличения их количества. В результате постоянные потери в многодвигательном электроприводе увеличиваются, и энергетический эффект оказывается значительно меньше или отсутствует вообще.

5. В рассмотренном примере применение одного или нескольких двигателей мощностью 45 кВт в большинстве рассмотренных случаев оказалось более предпочтительным по энергетическим показателям, чем использование нескольких двигателей мощностью 30 кВт. Но если для рассматриваемой конструкции автобуса двигатели мощностью 45 кВт являются слишком большими по размерам или по весу, или являются слишком дорогими по цене, то можно использовать несколько двигателей меньшего габарита.

6. Применение многодвигательного электропривода в городском цикле движения автобуса позволит уменьшить мощность потерь электрической энергии, потребляемой от автономного бортового источника питания. Это увеличит пробег транспортного средства при одной зарядке аккумуляторных батарей или создаст резерв энергии батарей для обогрева салона в зимнее время.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Table 1. ²Power loss in motors of the bus when driving at a constant speed with 45 passengers.

³Table 2. ⁴Power loss in motors of the bus when driving at a constant speed without passengers.

⁵Table 3. ⁶Energy loss during acceleration of the bus.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Starjinsky V.E., Mardosevich E.I., Lobkova M.P. Optimizacionnie rascheti mnogostupenchatikh i mnogopotchnikh zubchatikh mekhanizmov priborov [Optimization calculations of multistage and multithreaded gear mechanisms of devices]. *Aktualnie voprosy mashinovedeniya*, 2015, vol. 4, pp. 276-279. (In Russian).

- [2] Voytenko V.A. Trebovania k parametram asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya elektromobilya [Requirements for the parameters of asynchronous traction motor of electric vehicle]. *Elektrotekhnicheskie i komp'uternie sistemy*, 2014, no. 15(91). – pp. 129 – 131. (In Russian).
- [3] Lassi Aarniovuori, Lasse I. E. Laurila, Markku Niemela, Juha J. Pyrhonen Measurements and Simulations of DTC Voltage Source Converter and Induction Motor Losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 5, pp. 2277 – 2287. doi: [10.1109/TIE.2011.2161061](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161061)
- [4] Antonio T. Alexandridis, George C. Konstantopoulos, Qing-Chang Zhong Advanced Integrated Modeling and Analysis for Adjustable Speed Drives of Induction Motors Operating With Minimum Losses. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, vol. 30, no 3, pp. 1237 – 1246. doi: [10.1109/TEC.2015.2392256](https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2392256)
- [5] S. Lim, K. Nam Loss-minimising control scheme for induction motors. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2004, vol. 151, no. 4, pp. 385 – 397. doi: [10.1049/ip-epa:20040384](https://doi.org/10.1049/ip-epa:20040384)
- [6] Ali M. Bazzi, Veysel T. Buyukdegirmenci, Philip T. Krein System-Level Power Loss Sensitivity to Various Control Variables in Vector-Controlled Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 1367 – 1373. doi: [10.1109/TIA.2013.2252320](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2252320)
- [7] Lassi Aarniovuori, Paavo Rasilo, Markku Niemelä, Juha J. Pyrhönen Analysis of 37-kW Converter-Fed Induction Motor Losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 9, pp. 5357 – 5365. doi: [10.1109/TIE.2016.2555278](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2555278)
- [8] Zhao Haisen, Zhang Dongdong, Wang Yilong, Zhan Yang, Xu Guorui Piecewise Variable Parameter Loss Model of Laminated Steel and Its Application in Fine Analysis of Iron Loss of Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 832 – 840. doi: [10.1109/TIA.2017.2740278](https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2740278)
- [9] Yanping Liang ; Xu Bian ; Honghao Yu ; Cangxue Li 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*, 2015, vol. 62, no. 11, pp. 6779 – 6785. doi: [10.1109/TIE.2015.2438051](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2438051)
- [10] Krzysztof Komez, Maria Dems Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 7, pp. 2934 – 2946. doi: [10.1109/TIE.2011.2168795](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2168795)
- [11] Katsumi Yamazaki, Akihiro Suzuki, Motomichi Ohto, Teruyuki Takakura Harmonic Loss and Torque Analysis of High-Speed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 933 – 941. doi: [10.1109/TIA.2012.2191252](https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2191252)
- [12] Zhao Haisen ; Wang Yilong ; Zhang Dongdong ; Zhan Yang ; Xu Guorui ; Luo Yingli Piecewise variable parameter model for precise analysis of iron losses in induction motors. *IET Electric Power Applications*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 361 – 368. doi: [10.1049/iet-epa.2016.0009](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0009)
- [13] Vijaya Huchche ; Nita Patne ; Anjali Junghare Computation of Energy Loss in an Induction Motor During Unsymmetrical Voltage Sags—A Graphical Method. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, volume 14, no. 5, pp. 2023 – 2030 doi: [10.1109/TII.2017.2763606](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2763606)
- [14] M. Nasir Uddin ; Sang Woo Nam New Online Loss-Minimization-Based Control of an Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 926 – 933. doi: [10.1109/TPEL.2007.915029](https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.915029)
- [15] Patrick W. Wheeler, Jon C. Clare, Maurice Apap, Keith J. Bradley Harmonic Loss Due to Operation of Induction Machines From Matrix Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 2, pp. 809 – 816, doi: [10.1109/TIE.2007.910527](https://doi.org/10.1109/TIE.2007.910527)
- [16] J.R. Espinoza ; G. Joos A current-source-inverter-fed induction motor drive system with reduced losses, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, vol. 34, no 4, pp. 796 – 805. doi: [10.1109/28.703977](https://doi.org/10.1109/28.703977)
- [17] Osama S. Ebrahim ; Mohamed A. Badr ; Ali S. Elgandy ; Praveen K. Jain ANN-Based Optimal Energy Control of Induction Motor Drive in Pumping Applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 652 – 660. doi: [10.1109/TEC.2010.2041352](https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2041352)
- [18] Yunxiang Wu ; Mohsin A. Shafi ; Andrew M. Knight ; Richard A. McMahon Comparison of the Effects of Continuous and Discontinuous PWM Schemes on Power Losses of Voltage-Sourced Inverters for Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 182 – 191. doi: [10.1109/TPEL.2010.2054837](https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2054837)
- [19] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Luca Ferraris, Mario Lazzari Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 796 – 803. doi: [10.1109/TEC.2008.921467](https://doi.org/10.1109/TEC.2008.921467)
- [20] A. Mihalcea, B. Szabados, J. Hoolboom Determining total losses and temperature rise in induction motors using equivalent loading methods. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2001, vol. 16, no. 3, pp. 214 – 219. doi: [10.1109/60.937199](https://doi.org/10.1109/60.937199)

- [21] Dong Hu, Wei Xu, Renjun Dian, Yi Liu, Jianguo Zhu Loss Minimization Control of Linear Induction Motor Drive for Linear Metros. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 9, pp. 6870 – 6880. doi: [10.1109/TIE.2017.2784343](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2784343)
- [22] Shreelakshmi M P ; Vivek Agarwal Trajectory Optimization for Loss Minimization in Induction Motor Fed Elevator Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 6, pp. 5160 – 5170. doi: [10.1109/TPEL.2017.2735905](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2735905)
- [23] Boyko, A. , Budashko V., Yushkov Y., Boyko N. Synthesis and research of automatic system balancing of asynchronous motor currents with voltage converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, no. №1/2(79), pp. 22 – 34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.1-60544](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.1-60544)
- [24] Boyko A., Volyanskaya Ya. Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. №4/5 (88), pp. 50 – 59. doi: [10.15587/1729-4061.2017.1-8545](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.1-8545)

Сведения об авторах.



Войтенко Владимир Андреевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. E-mail: elektrik.wa.@gmail.com,



Калинин Александр Георгиевич, старший преподаватель кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. E-mail: agk@opu.ua



Водичев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. E-mail: vva@eei.opu.ua,