

This paper proposes an approach to the implementation of the serial interface for data transmission over the power conductors of the stator winding of brushless motor with permanent magnets. Proposed serial interface intended for use in an electromechanical system in the form of a stationary control device with a voltage inverter and the remote executive motor with a control panel. The voltage pulses of the output inverter voltage is used as clock signals of serial interface. On the rising edge of clock signals in accordance with the format of the data packet is formed a sequence of current pulses, the occurrence of which are registered at the input of the external interrupt of controller. Thus, the data inputted from the remote control panel are transmitted to the stationary control device. Using of such serial interface minimizes the number of conductors and, thereby, increases the reliability of the system. References 6, figures 5.

Key words: control command transmission, connection over the power wires, serial interface, permanent magnet brushless motor, electromechanical system, electric drive.

Надійшла 29.02.2016

Received 29.02.2016

УДК 621.3.01, 621.313

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДИФИКАЦИЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА

В.В. Гребеников¹, докт. техн. наук, **П. Шымчак**², канд. техн. наук, **М.В. Прыймак**³, инж. I кат.

1, 3 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев-57, 03680, Украина
e-mail: elm1153@gmail.com

2 – Западнорейнский технологический университет в Щецине,
Аллея Пьястов, 17, г. Щецин, 320588161, Польша

Приведены результаты моделирования электродвигателя с постоянными магнитами, который может быть использован вместо двигателя внутреннего сгорания в городском автобусе средней вместимости. Исследованы четыре типа электродвигателей с различной конфигурацией постоянных магнитов в роторе, выполнен расчет электромагнитного момента и рабочих характеристик в программных пакетах Magnet и MotorSolve, предоставленных компанией InfoLytica. Выполнен тепловой расчет электродвигателя при его жидкостном охлаждении в пакете Comsol. Библ. 5, рис. 6.

Ключевые слова: постоянные магниты, электродвигатель, магнитное поле, пульсации момента, рабочая характеристика, электробус.

Для городских автобусов средней вместимости используются, как правило, дизельные двигатели. Основные показатели одной из модификаций такого двигателя следующие: мощность $P = 114$ кВт (155 л.с.) при частоте вращения $n = 2600$ об/мин; крутящий момент $M = 419$ Нм при $n = 1600...2600$ об/мин. Применение электродвигателя с постоянными магнитами вместо дизельного в городском автобусе позволит снизить уровень вредных выбросов, повысить комфортность для пассажиров за счет уменьшения уровня шума в салоне, а также существенно снизит эксплуатационные расходы [2, 5].

Цель работы – исследование влияния конфигурации магнитной системы ротора с постоянными магнитами на характеристики электродвигателя для электробуса и определение конфигурации, при которой достигается максимальное значение электромагнитного момента и мощности.

Для реализации поставленной цели были исследованы четыре конфигурации магнитной системы ротора: в электродвигателе М1 ротор имеет шесть полюсов с постоянными магнитами (ПМ) радиальной намагниченности; в электродвигателе М2 – шесть полюсов с ПМ тангенциальной намагниченности; М3 – каждый из полюсов имеет три ПМ, размещенных в роторе специальным образом; М4 – каждый из полюсов имеет двенадцать ПМ, размещенных таким образом, что между ними имеется тонкий слой электротехнической стали (рис. 1).

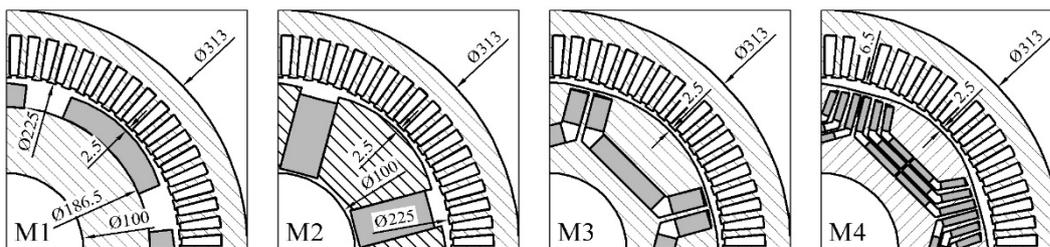


Рис. 1

В англоязычной литературе электродвигатели типа М3 и М4 называются PMA-SynRM (*Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine*) [3, 4]. В электродвигателе М1 магниты имеют непрямоугольную форму, и для их изготовления требуется пресс-форма специальной конфигурации, что целесообразно только при крупносерийном производстве. В электродвигателе М2 между магнитами прямоугольной формы размещаются полюса из конструкционной стали. Такая конструкция технологична и дешева как для мелкосерийного, так и для крупносерийного производства. В электродвигателях М3 и М4 магниты имеют прямоугольную форму и в целях технологичности производства монтируются в пакет электротехнической стали, а распределение магнитного поля в пространстве можно задавать расположением магнитов относительно оси, их количеством на полюс и формой пакета электротехнической стали ротора. Такая конструкция применяется при крупносерийном роботизированном производстве электродвигателей для электротранспорта.

Во всех исследуемых моделях статор имеет неизменную конфигурацию и размеры и аналогичен статору стандартного асинхронного электродвигателя, имеющего внешний диаметр $D_a = 313$ мм, внутренний диаметр статора $D_i = 225$ мм, число пазов $Z_p = 72$ и высоту пазов $h_s = 27,5$ мм, длину активной части сердечника $l_{Fe} = 145$ мм. Величина воздушного зазора между статором и ротором равна $\delta = 2,5$ мм. Общая масса магнитов для каждого электродвигателя одинакова: $m_{PM} = 8,2$ кг.

Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электродвигателях с зубцово-пазовым статором применяется либо скос полюсов на роторе, либо профилирование ферромагнитных полюсов или магнитов [1]. При исследованиях влияния конфигурации магнитной системы на пульсации электромагнитного момента для модели М1 варьировалась глубина профиля магнитов h (разность между максимальным и минимальным расстоянием от центра ротора до наружной поверхности магнитов). Для моделей М2, М3, М4 варьировалась глубина профиля ферромагнитных полюсов ротора h (разность между максимальным и минимальным расстоянием от центра ротора до наружной поверхности ферромагнитных полюсов).

В качестве иллюстрации влияния профилирования ферромагнитных полюсов на пульсации электромагнитного момента для модели электродвигателя М2 на рис. 2 а приведена зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора $M = f(\theta)$ для двух значений глубины профиля полюсов $h = 0$ мм и $h = 3$ мм. На рис. 2 б показана картина магнитного поля этой модели для положения, когда ротор находится на оси d по отношению к включенным фазам, направление намагниченности магнитов показано стрелками.

Расчет магнитного поля и электромагнитного момента для всех исследуемых моделей электродвигателей производился в программном пакете INFOLYTICA MAGNET при следующих условиях: коэрцитивная сила постоянных магнитов задавалась равной $H_{CB} = 919$ кА/м, остаточная индукция – $B_r = 1,24$ Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной $\mu_{PM} = 1,07$; магнитопровод ротора для модели М1 и М2 – конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); магнитопровод статора и ротора для моделей М3 и М4 – сталь СТ2211. Фазы статора включаются следующим образом: А(+), В(-), С(0); плотность тока равна $J = 5,0$ А/мм², а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_3 = 0,4$.

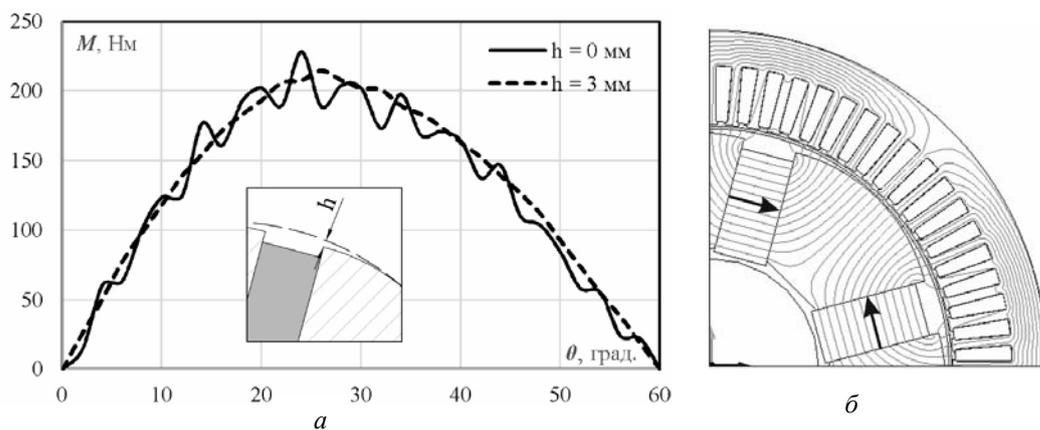


Рис. 2

Профилірованіє полюсів или магнитов существенным образом влияет на снижение пульсации электромагнитного момента, при этом для каждой из исследуемых моделей определено значение глубины профиля, при котором коэффициент пульсации имеет наименьшее значение. Коэффициент пульсации определяется как разница между максимальным и минимальным значениями электромагнитного момента, отнесенного к двойному среднему [1]. Этот коэффициент вычисляется для зоны коммутации, которая для исследуемых моделей равна 20° (геометрических градусов). Глубина профиля полюсов варьировалась в диапазоне $h = 0 \dots 5$ мм.

На рис. 3 а приведена зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для модели М3. Для этой модели минимальное значение коэффициента пульсации получено при глубине профиля полюсов, равной $h = 4$ мм. На рис. 3 б показана картина магнитного поля данной модели для положения, когда ротор находится на оси d относительно включенных фаз, направление намагниченности магнитов на этом рисунке показано стрелками. Таким образом, профилірованіє полюсов ротора позволяет существенно уменьшить пульсации электромагнитного момента, при этом для каждой конфигурации магнитной системы должно быть оптимальное значение глубины профиля. Для исследуемых моделей получены следующие оптимальные значения глубины профиля, при которых коэффициент пульсации имеет минимальное значение: М1 – $h = 2$ мм; М2 – $h = 3$ мм; М3 – $h = 4$ мм; М4 – $h = 4$ мм.

Зависимость электромагнитного момента (рис. 4) от угла поворота ротора для исследуемых моделей вычислялась при оптимальном значении глубины профиля в диапазоне от оси d (поле соответствующих полюсов ротора направлено согласно полю, создаваемому включенными фазами статора) до оси q (поле соответствующих полюсов ротора направлено встречно к полю, создаваемому включенными фазами статора). Для исследуемых моделей этот диапазон равен 60° (геометрических градусов).

Анализируя зависимости электромагнитного момента для четырех типов электродвигателей от угла поворота ротора $M = f(\theta)$, следует отметить, что конфигурация магнитной системы влияет на моментные характеристики. Для исследуемых моделей получены следующие

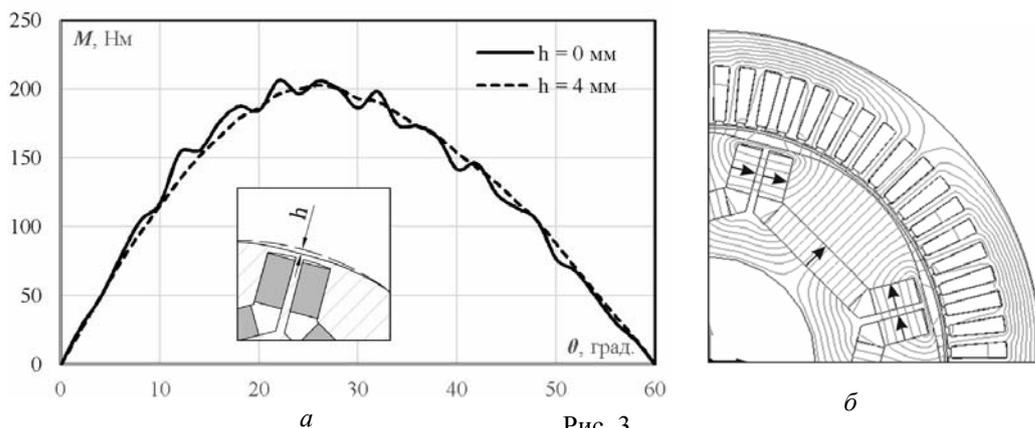


Рис. 3

значения среднего электромагнитного момента, определяемого для зоны коммутации:
 $M_{\text{ср}(M1)} = 191,6$ Нм;
 $M_{\text{ср}(M2)} = 194,9$ Нм;
 $M_{\text{ср}(M3)} = 186,2$ Нм;
 $M_{\text{ср}(M4)} = 173,6$ Нм.
 Однако сделать вывод о существенном преимуществе той или иной магнитной системы нельзя, поскольку много факторов влияют на величину распределения поля (форма постоянных магнитов и их расположение в роторе, насыщение магнитной системы, величина воздушного зазора и т. д.). Тем не менее, поскольку для модели M2 получено наибольшее значение среднего электромагнитного момента и конструкция ротора технологичнее и дешевле в производстве как для мелко-, так и для крупносерийного производства, то для дальнейших исследований эта модель взята за базовую.

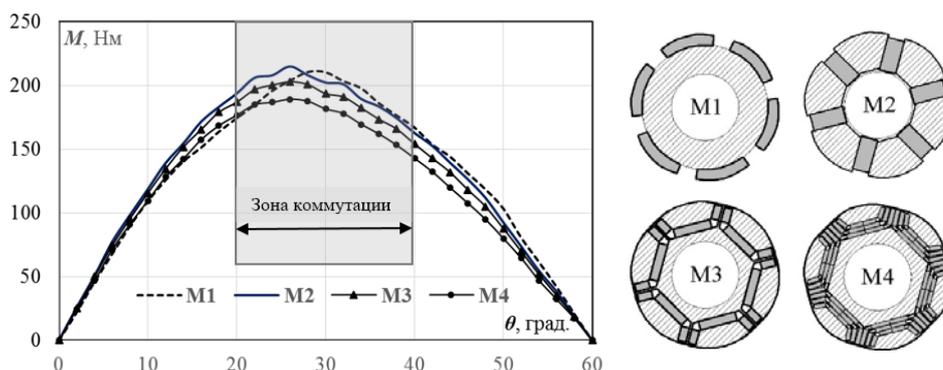


Рис. 4

Для обеспечения повышения удельных показателей электродвигателей (кВт/кг), применяемых в транспортных средствах, необходимо использовать жидкостное охлаждение с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости. Для анализа теплового состояния модели M2 при работе с перегрузкой (при плотности тока более чем $J = 5$ А/мм²) создана трехмерная модель сектора электродвигателя, равного одному полюсному делению. Такая модель (рис. 5 а) учитывает процессы теплообмена не только в объеме электродвигателя, но и в системе жидкостного охлаждения.

Система охлаждения представляет собой множество каналов, расположенных равномерно по всей внешней поверхности корпуса электродвигателя и сориентированных вдоль оси его вращения. По этим каналам с помощью циркуляционного насоса пропускается теплоноситель (вода) с заданной скоростью и заданной начальной температурой. Перемещаясь по каналам системы охлаждения, теплоноситель отбирает тепло, выделяемое обмотками электродвигателя. Тепловая модель учитывает пазовую изоляцию обмоток, зазор между магнитопроводом статора и его корпусом и изменение скорости теплоносителя по мере приближения к стенкам канала системы охлаждения. Тепловые расчеты выполнены в пакете COMSOL.

На рис. 5 б приведена зависимость температуры обмоток в зависимости от производительности циркуляционного насоса для двух значений плотности тока в обмотках, равных соответственно $J = 5$ А/мм² и $J = 12$ А/мм². При производительности циркуляционного насоса, равной $Q = 5$ л/мин, температура обмоток статора при плотности тока $J = 12$ А/мм² не превышает 145 °С, что допустимо для изоляции класса F.

Рабочие характеристики электродвигателя M2, рассчитанные в программном пакете Infolytica MotorSolve, при плотности тока в обмотках $J = 12$ А/мм² представлены на рис. 6 а. На этом рисунке приведены зависимости электромагнитного момента $M = f(n)$ и мощности на валу $P_{\text{out}} = f(n)$ от частоты вращения ротора для модели M2. Следует отметить, что результаты численных

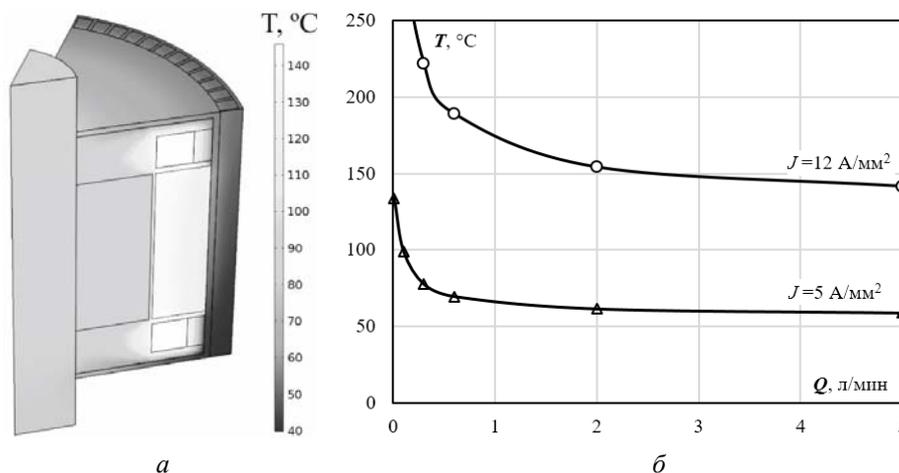


Рис. 5

исследований рабочих характеристик показали, что модель М2 обладает наилучшими показателями по сравнению с остальными моделями.

Так как рабочий диапазон частоты вращения дизельного двигателя, применяемого для городских автобусов средней вместимости, находится в пределах 500...4500 об/мин, то рабочие характеристики электродвигателя М2 также рассчитаны в этом диапазоне. При плотности тока $J = 12 \text{ А/мм}^2$ для диапазона частоты вращения $n = 1600...2600$ об/мин электромагнитный момент равен $M = 470...460$ Нм, крутящий момент дизельного двигателя для этого диапазона частоты вращения составляет $M = 419$ Нм. При частоте вращения $n = 2600$ об/мин мощность на валу электродвигателя равна $P_{out} = 124$ кВт, мощность дизельного двигателя составляет $P = 115$ кВт. При частоте вращения $n = 3200$ об/мин мощность на валу электродвигателя составляет $P_{out} = 150$ кВт, что на 30 % превышает мощность дизельного двигателя. Таким образом, при жидкостном охлаждении и увеличенной плотности тока обеспечивается запас по мощности и моменту, а значит, улучшаются скоростные характеристики электробуса.

На рис. 6 б показаны графики мощности на валу и мощности активных потерь в обмотках статора в зависимости от плотности тока. Мощность потерь в обмотках электродвигателя рассчитана с учетом нагрева обмоток. Из этих зависимостей следует, что при повышении тока в фазах увеличиваются активные потери в обмотках статора, но при этом достигается повышение удельных показателей электродвигателя. Отношение мощности к массе электродвигателя (кВт/кг) при плотности тока $J = 12 \text{ А/мм}^2$ увеличивается примерно в 2,4 раза по сравнению с номинальной плотностью тока ($J = 5 \text{ А/мм}^2$), что является несомненным преимуществом при использовании электродвигателей для транспортных средств.

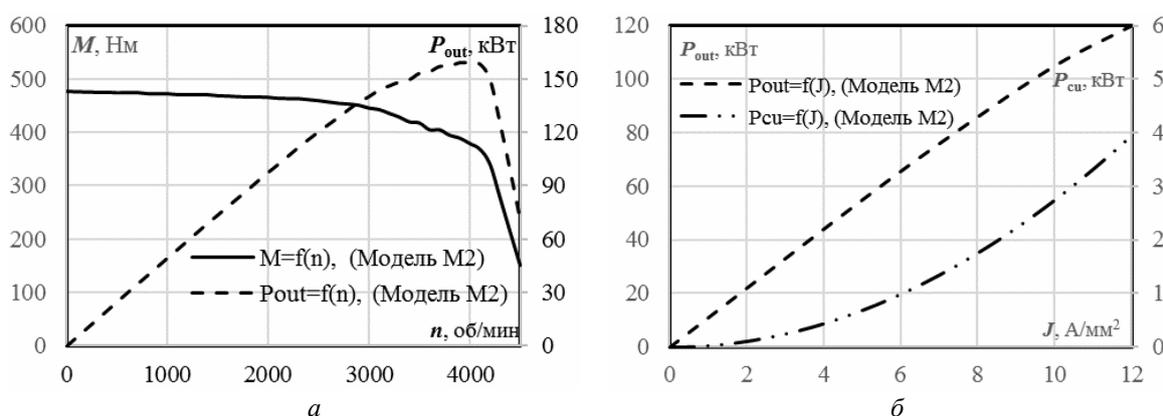


Рис. 6

Таким образом, по результатам исследования моментных и рабочих характеристик четырех типов электродвигателей с различной конфигурацией магнитной системы ротора определена конфигурация с наилучшими характеристиками. Тепловой расчет показал, что при жидкостном охлаждении можно увеличить плотность тока в обмотках в 2,4 раза, обеспечив тем самым увеличение мощности на валу электродвигателя.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. В результате моделирования электродвигателей с различной конфигурацией магнитной системы установлено, что наибольшим электромагнитным моментом обладает конфигурация с тангенциальной намагниченностью постоянных магнитов (М2).

2. Результаты расчетов подтверждают, что электродвигатель (М2) может быть использован в автобусе средней вместимости вместо дизельного двигателя. При жидкостном охлаждении можно увеличить плотность тока до $J = 12 \text{ А/мм}^2$, обеспечив увеличение электромагнитного момента примерно 2,4 раза, по сравнению с номинальной плотностью тока.

1. Гребеников В.В., Прымак М.В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами тангенциальной намагниченности // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП»: Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2014. – Вип. 38. – С. 69–78.

2. Gieras J.F., Bianchi N. Electric Motors for Light Traction // EPE Journal. – 2004. – Vol. 14. – N 1. – P. 12–23.
3. Kashif Saeed Khan. Design of a Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle // Electrical Machines and Power Electronics. School of Electrical Engineering. – 2011. – Stockholm, Sweden. – 61 p.
4. Paradkar M., Boecker J. Design of a High Performance Ferrite Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for an Electric Vehicle // Power Electronics and Electrical Drives Paderborn University. – 2012. – P. 4079–4083.
5. Szymczak P., Grebenikov V., Prymak M. Przegląd elektrycznych silników samochodowych // Wiadomości elektrotechniczne. – 2013. – N 8. – S. 28–33.

УДК 621.3.01, 621.313

В.В. Гребеніков¹, докт. техн. наук, **П. Шимчак²**, канд. техн. наук, **М.В. Приймак³**, інж. I кат.

1, 3 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, м. Київ-57, 03680, Україна

2 – Західнопоморський технологічний університет в Щецині,

Алея П'ястів, 17, м. Щецин, 320588161, Польща

Порівняльний аналіз електродвигунів з постійними магнітами для електробуса

Наведено результати моделювання електродвигуна з постійними магнітами, який може бути використаний замість двигуна внутрішнього згорання в міському автобусі середньої місткості. Досліджено чотири типи електродвигунів з різною конфігурацією постійних магнітів у роторі, виконано розрахунок електромагнітного моменту і робочих характеристик у програмних пакетах Magnet і MotorSolve, наданих компанією Infolytica. Виконано тепловий розрахунок електродвигуна при його рідинному охолодженні в пакеті Comsol. Бібл. 5, рис. 6.

Ключові слова: постійні магніти, електродвигун, магнітне поле, пульсації моменту, робоча характеристика, електробус.

V.V. Grebenikov¹, P. Szymczak², M.V. Pryimak³

1, 3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

2 – West Pomeranian University of Technology Szczecin,

Piast Alley, 17, Szczecin, 320 588 161, Poland

Comparative analysis of magnetic systems modifications for electric motor of electric bus

The simulation results of the motor with permanent magnets, which can be used instead of the internal combustion engine in a bus of medium capacity, are presented. Four types of motors with a different configuration of the permanent magnets in the rotor are studied and the electromagnetic torque and operating characteristics are calculated with the program packages Magnet and MotorSolve, provided by Infolytica. Also the thermal calculation of the motor when the liquid cooling is carried out with the package Comsol. References 5, figures 6.

Key words: permanent magnets, electric motor, magnetic field, torque ripple, operating characteristics, electric bus.

Надійшла 25.02.2016

Received 25.02.2016

УДК 621.313.32

МАГНІТНІ ТА ВИСОКОТЕПЛОПРОВІДНІ КЛИНИ В ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРАХ

Г.М. Федоренко¹, докт. техн. наук, **О.Г. Кенсицький²**, докт. техн. наук, **Д.І. Хвалін³**, асп.

1, 3 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

2 – Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,

вул. Кірова, 36-а, м. Чорнобиль, Київська обл., 07270, Україна

e-mail: denis_h@bigmir.net

Проведено аналіз і дано оцінку впливу магнітних та високотеплопровідних клинів на параметри потужних енергетичних генераторів. Показано, що магнітні клини в пазах статора позитивно впливають на віброакустичні показники, а проникність магнітних клинів якісно впливає на втрати на поверхні ротора та опір розсіювання машини. Також показано, що застосування високотеплопровідних клинів при опосередкованому охолодженні потужної синхронної машини дає змогу знизити робочу температуру обмотки статора, підвищити вихідну потужність та коефіцієнт корисної дії. Бібл. 15, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: потужні генератори, магнітний клин, високотеплопровідний клин.