

УДК 621.313.392+62-83-52

**І. З. ЩУР** (д-р техн. наук, проф.), **О. В. МАКАРЧУК** (канд. техн. наук, доц.), **В. Б. КОЗІЙ**,  
**І. Г. ШАПОВАЛОВ**, **П. Й. ГОЛУБОВСЬКИЙ**, **Т. Я. КОВЕРКО**, **В. М. КРУГЛЯК**  
Національний університет «Львівська політехніка»  
[i\\_shchur@meta.ua](mailto:i_shchur@meta.ua)

## СИСТЕМА ПРЯМОГО БЕЗКОНТАКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ІНФРАНИЗЬКОЇ ШВИДКОСТІ З МІКРОКОНТРОЛЕРНИМ КЕРУВАННЯМ

У статті представлено результати розроблення безредукторного електропривода (БЕП) зі стабільною робочою частотою обертання 0,5 об/хв. на базі безконтактної синхронної машини з постійними магнітами (СМПМ). Описано методіку розроблення багатополосної СМПМ з номінальним моментом 1 Н·м із застосуванням комп'ютерного моделювання електромагнітного поля. Описано будову оригінальної САК, реалізованої на 8-розрядному мікроконтролері. Приведено результати експериментів з розробленим БЕП.

**Ключові слова:** безредукторний електропривод, синхронна машина з постійними магнітами, багатополосна моментна електрична машина, комп'ютерний розрахунок електромагнітного поля, транзисторний інвертор з ШІМ, мікроконтролерне керування.

**Постановка проблеми.** В останні роки завдяки появі відносно недорогих високоенергетичних постійних магнітів (на основі NdFeB) щораз ширше застосування знаходять системи прямого приводу – безредукторні електроприводи (БЕП) на базі багатополосних електричних машин, побудованих за принципом синхронної [1,2]. БЕП має суттєві переваги у відповідальних високоточних електроприводах, де традиційний механічний редуктор стає чи не основним джерелом похибок регулювання, пов'язаних із проміжками в зачепленнях передач та скінченною їх жорсткістю, що проявляється у вигляді пружних деформацій, які приводять до небажаних коливань [3]. У безконтактному БЕП інфранизької швидкості електрична машина повинна бути багатополосною, моментного типу, а електронна комутація її обмоток якоря повинна здійснюватися за кутовим положенням ротора, яке фіксується відповідним давачем [4-6]. Такі ще нетипові вирішення породжують низку нових проблем як щодо проектування електричної машини, так і розроблення системи електронної комутації її обмоток якоря та способів автоматичного керування моментом і кутовою швидкістю.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Аналізу концепції побудови БЕП присвячено дослідження [7]. В інших роботах вирішуються окремі задачі реалізації БЕП, зокрема: в [8] розглянуто особливості проектування спеціальних багатополосних синхронних машин з постійними магнітами (СМПМ), в [9] проведено порівняльні дослідження відомих способів електронної комутації обмоток якоря та запропоновано перспективні нові, в [10] проаналізовано способи зменшення пульсацій моменту, які в БЕП стають основним джерелом похибок регулювання кутової швидкості.

Особливо складними є задачі розроблення тихохідних БЕП, у яких треба забезпечити стабільність моменту і кутової швидкості одночасно з дотриманням обмежень на розміри і вартість системи приводу, з метою успішного конкурування з традиційними редукторними вирішеннями.

**Мета роботи.** Розроблення та експериментальна перевірка безконтактного БЕП з номінальним моментом 1 Н·м та живленням від бортової мережі напругою 27 В зі стабілізацією робочої частоти обертання в діапазоні 0,5...6 об/хв при накладених обмеженнях на розміри двигуна і вартість системи автоматичного керування.

**Виклад основного матеріалу.** Перед авторами було поставлено завдання розроблення безконтактного БЕП для дистанційного керування відеокамерою спостереження на рухомому транспортному засобі із забезпеченням наступних показників роботи: рух на великій швидкості 36°/с ±5%, рух на малій швидкості 3°/с ±5%, зупинка і фіксація у заданому положенні з точністю позиціонування 0,1°. На розміри СМПМ накладалося обмеження величини зовнішнього діаметра – 160 мм. Вирішення цього завдання проводилося в напрямках проектування багатополосної СМПМ, розроблення мікроконтролерної САК, відлагодження системи електроприводу та експериментальної перевірки роботи усієї системи.

Розробка двигуна для даного застосування починалася з виявлення причин, що призводять до пульсацій частоти обертання. На нашу думку, це наступні фактори: пульсації моменту навантаження прогнозованого та випадкового характеру; відхилення форми напруг живлення від синусоїдальної; магнітна несиметрія магнітопроводу (неоднаковість магнітних характеристик полюсів індуктора); геометрична несиметрія магнітопроводу (відхилення розмірів технологічного характеру, ексцентриситет і радіальне биття ротора); насичення магнітопроводу; зубчаста структура осердя статора. Вплив деяких з цих факторів можна мінімізувати ще на етапі проектування машини. Зокрема, правильний вибір співвідношення між кількостями зубців статора й полюсів ротора та конструкція ротора з постійними магнітами [11], селектування магнітів, профілювання повітряного проміжку, скіс пазів осердя статора або полюсів істотно зменшують реактивний момент, зумовлений зубчастістю осердя, а отже, й амплітуду пульсацій електромагнітного моменту і частоти обертання. Однак, для проведення проектних досліджень з вищезгаданими параметрами, необхідна адекватна математична модель машини.

© Щур І.З., Макарчук О.В., Козій В.Б., Шаповалов І.Г., Голубовський П.Й., Коверко Т.Я., Кругляк В.М., 2013

Сучасне програмне забезпечення класу САЕ (англ. Computer-aided engineering), призначене для моделювання процесів в електромеханічних системах, здебільшого орієнтоване на універсальність та однотипність алгоритмів опису процесів у складних об'єктах з великою кількістю компонентів, що відносяться до різних технічних галузей. Моделі, або математичні описи самих компонентів, що входять до складу цих систем, часто складені на підставі досить спрощеного представлення процесів та явищ у них. Зокрема, для моделей електричних машин використовуються допущення про лінійність електромагнітних зв'язків в них, не враховується реальний просторовий розподіл обмоток якоря, конфігурація магнітопроводу тощо [3]. Однак, як видно з формулювання задачі, потреби проектування електричних машин вимагають опису значно вищої адекватності.

Відмінність пропонованого підходу моделювання полягає у тому, що магнітно-механічна характеристика (ММХ) машини розраховується на підставі теорії електромагнітного поля у двовимірній постановці. Це дає змогу підняти загальний рівень достовірності отриманих результатів, проводити проектні дослідження, пов'язані з мінімізацією реактивного моменту, у взаємозв'язку, враховуючи найважливіші чинники, що впливають на перебіг динамічних процесів у таких машинах.

Загальновідомо, що розрахунок стаціонарного магнітного поля нелінійної в магнітному відношенні системи  $S$ , що задана в нормованому базисі розподілом координат  $S(x, y, z)$  та густин струмів  $\vec{J}(x, y, z)$  зводиться до розв'язування рівняння Максвела (закону повного струму), рівняння неперервності магнітного поля та характеристики намагнічування середовища, відповідно:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad \vec{H} = H[\vec{B}], \quad (1)$$

де  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля;  $\vec{J}$  – вектор густини струму джерел, що належать області розрахунку  $S$ ;  $\vec{B}$  – вектор індукції магнітного поля.

У нелінійних системах  $\vec{B} = \boldsymbol{\mu} \vec{H}$ , де  $\boldsymbol{\mu} = \mu_0 \boldsymbol{\mu}_r$  – матриця магнітної проникності середовища, що залежить від напруженості поля;  $\boldsymbol{\mu}_r$  – матриця відносних магнітних проникностей середовища.

Використовуючи поняття векторного магнітного потенціалу  $\vec{A}$ , друге рівняння в (1), за потреби, замінюють залежністю

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}. \quad (2)$$

Граничні умови для тангенціальних  $\vec{H}_\tau$  та нормальних  $\vec{B}_n$  складових напруженості та індукції поля на границі розділу двох середовищ  $k - m$  з різними магнітними властивостями ( $\mu_k \neq \mu_m$ ) запишемо як

$$H_{\tau k} = H_{\tau m}, \quad B_{nk} = B_{nm}. \quad (3)$$

Для граничних умов на межі області поля з нелінійними характеристиками  $H_n = B_n = 0$ , якщо за межею області поля є середовище з  $\mu = 0$ , й  $H_\tau = B_\tau = 0$ , якщо за межею області поля є середовище з  $\mu = \infty$ .

Розподіл магнітного поля в електричних машинах з радіальним напрямом проходження магнітного потоку у робочому повітряному проміжку та з відношенням активної довжини магнітопроводу статора до діаметра розточки, що перевищує 0,2 ÷ 0,3, цілком задовільно описується у двовимірній постановці. Тобто, вектори  $\vec{B}$  та  $\vec{H}$  матимуть лише дві просторові проекції. Це робить чисельні алгоритми розрахунку поля достатньо швидкодіючими та вимагає прийняття загальноприйнятих допущень [13], тобто поле розглядається у квазістаціонарному наближенні. Однак виникає необхідність у прийнятті низки додаткових допущень, притаманних конкретному об'єкту дослідження, а саме безконтактній СМІМ: 1) відношення довжини машини до полюсної поділки достатньо велике, що дає можливість вважати торцеві ефекти незначними (при цьому магнітне поле є плоскопаралельним, отже, появляється змога розв'язання задачі в двовимірному просторі); 2) частина повного потокозчеплення електричних контурів статора, зумовлена потоками розсіяння у лобових частинах обмотки, лінійно залежить від струмів цих контурів; 3) вектори густин струмів та векторного магнітного потенціалу мають лише одну складову, наприклад,  $J_z$  та  $A_z$ ; 4) характеристики намагнічування сталей та постійних магнітів однозначні, тобто нехтуємо гістерезисом і приймаємо, що зв'язок між векторами  $\vec{B}$  та  $\vec{H}$  є взаємнооднозначний (робоча точка постійного магніту завжди належить прямій повернення); 5) вихрові струми в магнітопроводі не враховуються.

Використання рівняння (2) з урахуванням (1) дає змогу записати рівняння Пуассона у вигляді

$$\operatorname{rot}(\nu \operatorname{rot} \vec{A}) = \vec{J}, \quad (4)$$

де  $\nu = 1/\mu$  – величина, обернена до магнітної проникності середовища.

Враховуючи допущення 3 про те, що векторні величини спрямовані лише вздовж однієї осі (наприклад  $z$ ), це рівняння зводиться до двовимірного рівняння виду

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z. \quad (5)$$

Для алгебризації просторових похідних використовувався метод скінченних елементів (МСЕ). При розв'язанні задачі магнітостатики, тобто розрахунку магнітного поля по заданих граничній умові й густині струмів у струмопровідних областях, яка формулюється на підставі поняття векторного магнітного потенціалу, МСЕ дає наближений (з заданою точністю) розподіл поля цього потенціалу. Решта силових характеристик поля (індукція та напруженість) знаходять за формулами.

Описаний підхід застосовано для виконання проектних розрахунків СМПМ для вказаного вище БЕП. Для виготовлення статора в заданих габаритах використано готові виштамповки від асинхронної машини з 36 пазами та діаметром розточки 94 мм. За попередніми розрахунками для забезпечення електромагнітного моменту 1 Н·м достатньо активної довжини статора 27 мм. Пакет статора виконаний із скошенням пазів. При такій конструкції статора ротор, відповідно до [8], повинен мати 22 пари полюсів. З метою спрощення конструкції ротора та зниження реактивного моменту використано поверхневе розміщення магнітів, які виготовлені з NdFeB та мають поперечний переріз 5,5x3 мм.

Цикл проведеного польового комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів у СМПМ зі вказаними параметрами мав за мету визначити величину результуючого потокозчеплення фазних обмоток та рівень і пульсацію електромагнітного моменту. Також досліджувався вплив на них величини повітряного проміжку  $\delta$  ( $\delta = 0,8$  мм,  $\delta = 1,2$  мм) і його форми – рівномірний чи нерівномірний. Розрахунки проводилися за сталих фазних струмів якоря (діюче значення 0,25 А). Рівень просторової дискретизації за МСЕ для цих випадків показано на рис. 1. Кількість скінченних елементів  $\approx 50000$  шт.

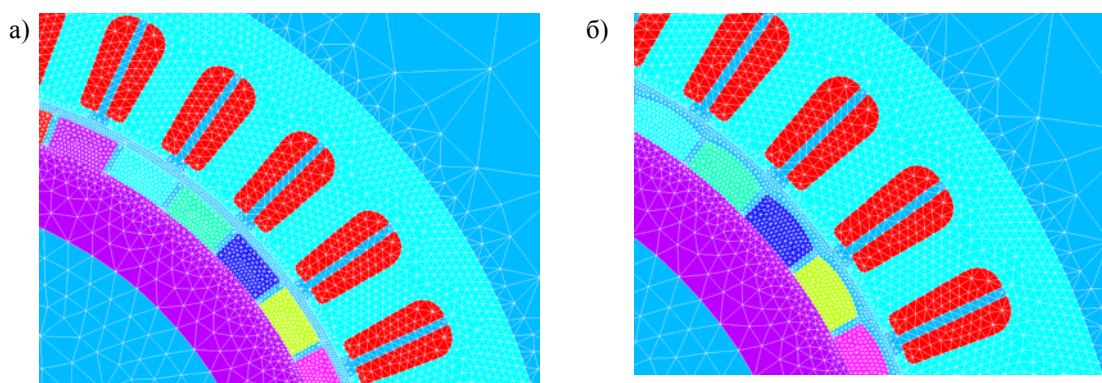


Рисунок 1 – Фрагменти сіток скінченних елементів:  
а) для рівномірного проміжку, б) для нерівномірного проміжку

Розподіл модуля вектора магнітної індукції для випадків рівномірного та нерівномірного проміжків величиною  $\delta = 0,8$  мм показано на рис. 2.

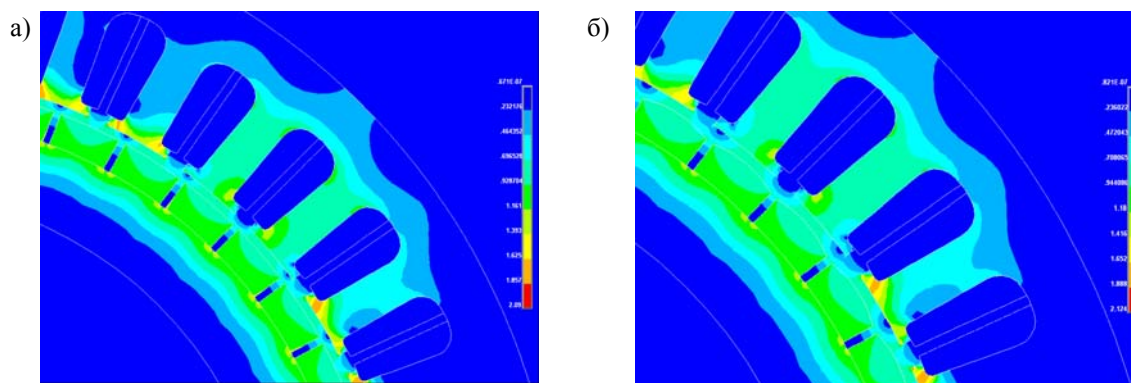


Рисунок 2 – Поле модуля вектора магнітної індукції, Тл:  
а) для рівномірного проміжку, б) для нерівномірного проміжку

Залежності радіальної складової вектора  $\vec{B}$  в робочому проміжку, від кутової координати показано на рис. 3, причому на рис. 3б видно вплив не лише величини проміжку а й його форми.

На рис. 4 представлено залежності потокозчеплення одної з фазних обмоток якоря та електромагнітного моменту від кута повороту ротора для всіх досліджуваних комбінацій величин та форм повітряного проміжку. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання (рис. 2-4) показав перевагу нерівномірного повітряного проміжку за гладкістю електромагнітного моменту. Величина повітряного проміжку може становити 1 мм.

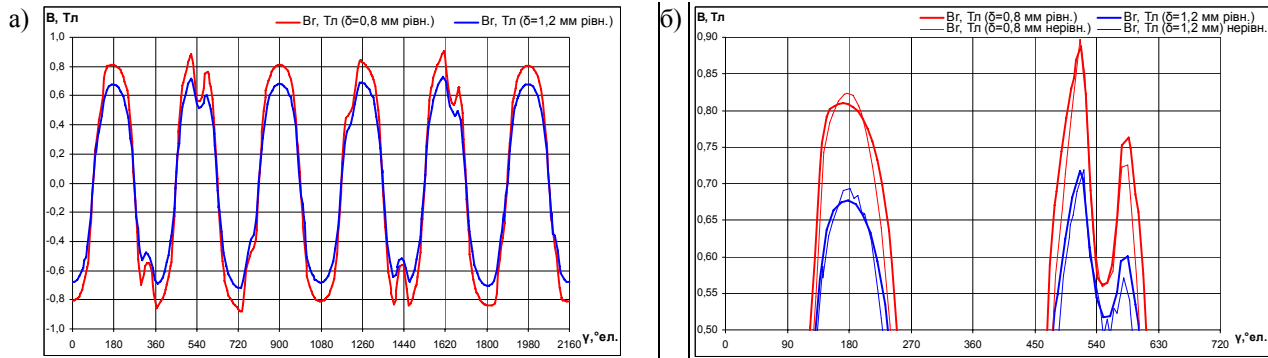


Рисунок 3 – Залежність радіальної складової  $B_r$  вектора  $\vec{B}$  від кутової координати:

а) для рівномірного проміжку, б) амплітуди для рівномірного та нерівномірного проміжків

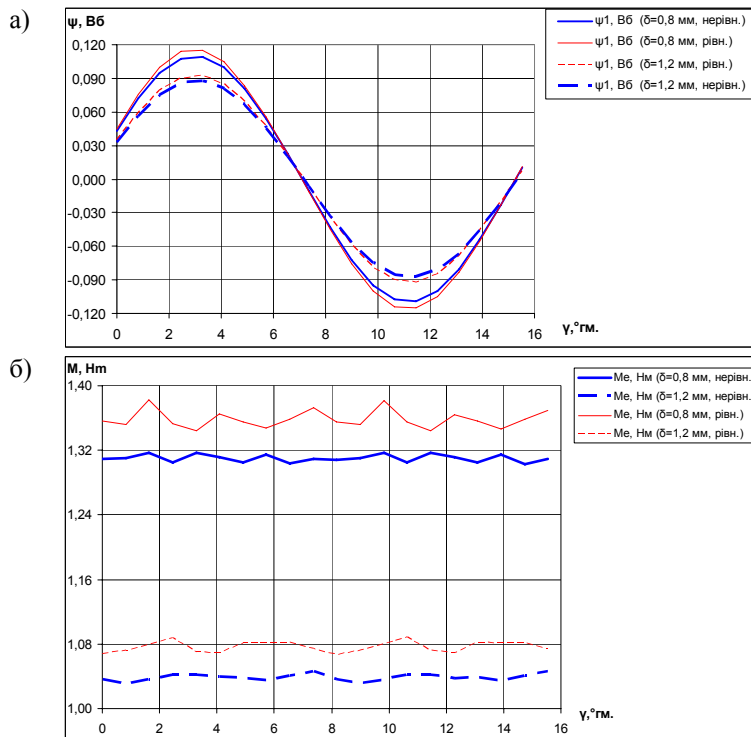


Рисунок 4 – Фазне потокозчеплення (а) та електромагнітний момент (б) в залежності від кута повороту ротора

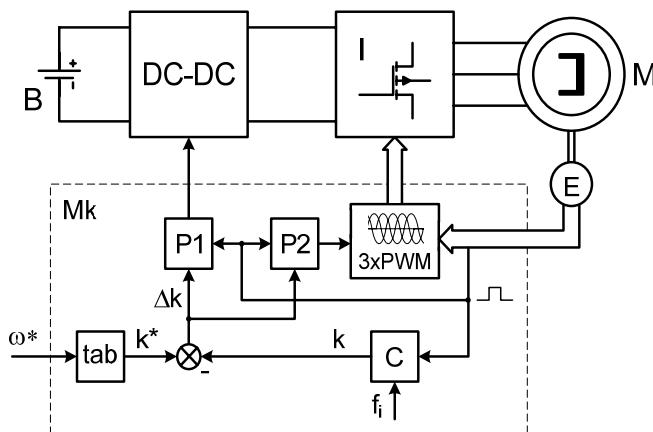


Рисунок 5 – Функціональна схема розробленої системи БЕП

На базі спроектованої СМІМ було розроблено систему безконтактного БЕП, функціональна схема якого показана на рис. 5. Комутація обмоток статора двигуна М здійснюється мостовим транзисторним інвертором І (транзистори MOSFET типу IRF3205) за принципом синусоїдальної трифазної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) 3xPWM, що синхронізована за кутом положення ротора за допомогою абсолютного енкодера Е фірми Kübler (Optic 5876). Кутова швидкість двигуна регулюється шляхом зміни величини напруги, що прикладається до обмоток статора. Зважаючи на низьку розрядність мікроконтролера, зміна амплітуди трифазної синусоїдальної напруги, що формується інвертором, відбувається в порівняно невеликих межах, що забезпечує високий коефіцієнт модуляції та, відповідно, коефіцієнт форми синусоїди. Регулювання напруги в широких межах здійснюється шляхом зміни постійної напруги, що прикладається до інвертора, з допомогою понижувального імпульсного перетворювача постійної напруги DC-DC. Живлення електроприводу здійснюється від бортової акумуляторної батареї В.

З метою зниження вартості усієї системи БЕП, систему керування реалізовано на основі 8-розрядного мікроконтролера Atmega128-16au. На ньому реалізовано весь алгоритм керування, а також формування імпульсних сигналів керування транзисторами інвертора та DC-DC перетворювача.

На вхід мікроконтролера Mk (рис. 5) по послідовному інтерфейсу приходить завдання кутової швидкості  $\omega^*$  та напрямку обертання від системи високого рівня. Враховуючи специфіку БЕП (м'яка механічна характеристика, низька робоча частота обертання), а також відсутність давача швидкості, система автоматичного керування (САК) швидкості виконана за імпульсним принципом. Єдиним давачем присутнім у системі, який виконує роль давача положення ротора, давача частоти обертання та

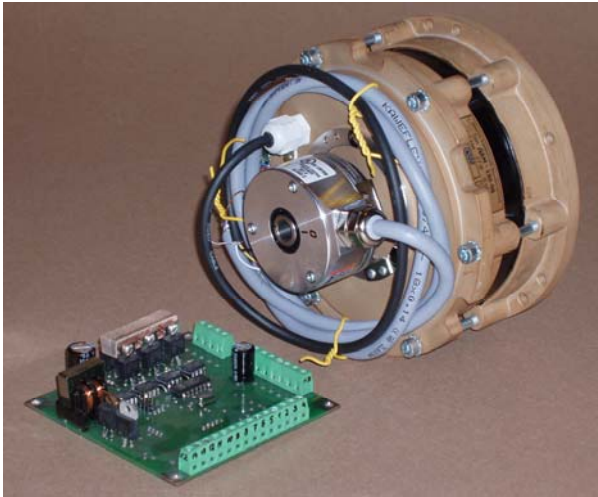
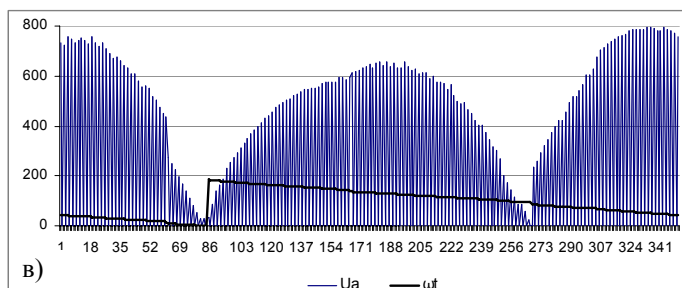
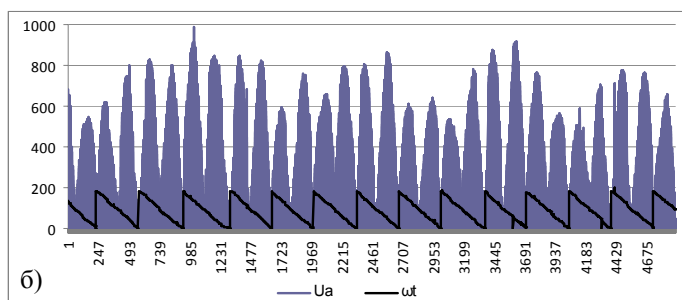
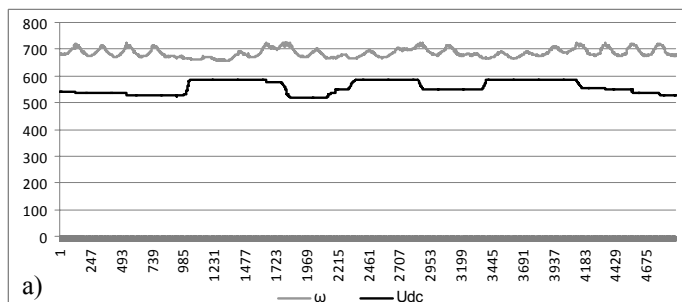


Рисунок 6 – Фото виготовленого БЕП

керування використовується обернена до кутової швидкості величина – час між двома імпульсами енкодера, а точніше – кількість імпульсів  $k$  постійної частоти  $f_i$ , які підраховуються за цей час лічильником  $C$ . Потрібна кількість імпульсів  $k^*$  отримується шляхом перетворення з допомогою таблиці  $tab$  цифрового сигналу задання кутової швидкості  $\omega^*$ . Дискретна САК швидкості реалізована у вигляді від'ємного зворотного зв'язку за кількістю імпульсів  $k$ . Похибка регулювання  $\Delta k = k^* - k$  надходить на два дискретні пропорційно-інтегральні регулятори P1 та P2, на виходах яких формуються завдання на вихідну напругу DC-DC перетворювача та частоту інвертора відповідно.

Враховуючи змінну, залежну від кутової швидкості двигуна, частоту імпульсів, по яких здійснюється

Рисунок 7 – Осцилограми кутової швидкості і  $U_{DC}$  (а), фазної напруги і кутового положення ротора (б) та фрагмент останньої (в)

давача положення камери у просторі, є абсолютний енкодер  $E$ . Даний енкодер має оптичне виконання, він є однооборотним, вихідним сигналом його є 12-розрядний код Грея. У мікроконтролері створена підпрограма для перетворення сигналів енкодера із коду Грея у двійковий код. Далі двійковий код перетворюється у інформацію про фізичне положення камери у градусах, яка передається системі вищого рівня по послідовному інтерфейсу. Крім цього, отриманий двійковий код перетворюється підпрограмою мікроконтролера відповідно до кількості пар полюсів двигуна у електричні градуси. Далі, для кожного розряду енкодера, яке відповідає певному електричному куту, за допомогою ШІМ формуються сигнали для управління транзисторами шестиключового трифазного інвертора напруги. Інформація про частоту обертання отримується у вигляді середньої, за інтервал між двома сусідніми точками енкодера, кутової швидкості. З метою отримання додаткової інформації про частоту обертання, у системі

керування, САК швидкості є суттєво нелінійною. Виходячи з цього, а також завдяки відсутності інформації про параметри механічного навантаження електроприводу, виконати теоретичні розрахунки з метою синтезу САК є важким завданням. Тому здійснювалося експериментальне налагодження на діючому БЕП.

На рис. 6 приведено фотографію створеної системи БЕП інфранизької швидкості у складі СМІМ та плати керування розміром  $100 \times 100$  мм, на якій розміщена як силова частина приводу, так і мікроконтролер з відповідним інтерфейсом. Експериментальне відлагодження алгоритму керування дало позитивні результати щодо відповідності показників роботи системи поставленому завданню.

З метою ілюстрації роботи БЕП за допомогою керуючого мікроконтролера було створено інтерфейс для моніторингу роботи приводу. Для цього по протоколу RS232 з мікроконтролера на комп'ютер передаються дані про біжучі значення вибраних змінних. На рис. 7 приведено осцилограми кутової швидкості (отримується у мікроконтролері дискретно, як було описано вище), модуля фазної напруги (сформованої за принципом ШІМ) та кута положення ротора СМІМ, а також напруги на виході DC-DC перетворювача при роботі в умовах роботи на заданій мінімальній швидкості при штучній періодичній зміні моменту статичного навантаження. Найвні пульсації кутової швидкості, що не перевищують 10% зумовлені відпрацюванням САР зубцевого моменту машини.

**Висновки.** Безредукторне виконання електроприводу інфранизької кутової швидкості дає змогу створити досить компактну, надійну і недорогу систему приводу із заданою точністю регулювання кутової швидкості і положення. Розроблена методика комп'ютерного проектування багатополосних СМПП для БЕП характеризується достатньою для інженерних розрахунків точністю та підтверджується отриманими на практиці показниками. На базі недорогого 8-розрядного мікроконтролера можна реалізувати досить складну САР швидкості і положення БЕП.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е.Овчинников. – СПб.: Корона-Век, 2006. – 336 с.
2. Сабинин Ю.А. Безредукторный позиционный электропривод / Ю.А.Сабинин, А.В.Денисова // Электротехника. – 1999. - №8. – С. 22-28.
3. Свечарник Д.В. Электромашины непосредственного привода: Безредукторный электропривод / Д.В. Свечарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.
4. Столов Л.И. Моментные двигатели постоянного тока / Л.И. Столов, А.Ю. Афанасьев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.
5. Чучман Ю.И. Прецизионный тихоходный безредукторный безконтактный электропривод / Ю.И. Чучман, І.З. Щур, М.В. Черепаняк, В.М. Журкіна // Електроінформ. – 2006. – №2. – С. 11 – 13.
6. Щур І.З. Алгоритм роботи комплексного давача електричного кута положення, швидкості і напрямку обертання для тихохідного електропривода / І.З. Щур, С.О. Малярчук, В.Б. Козій // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – № 544. – С. 168-173.
7. Щур І.З. Стратегії керування безредукторними електроприводами на базі безконтактних вбудованих електромеханічних модулів з постійними магнітами / І.З. Щур, О.В. Макарчук, М.В. Черепаняк // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2008. – № 615. – С. 167-175.
8. Макарчук О.В. Модель безконтактної електричної машини зі збудженням від постійних магнітів / О.В. Макарчук // Технічна електродинаміка. – 2011. – №1. - С. 37-45.
9. Щур І.З. Принципи комутації безконтактного двигуна з постійними магнітами у безредукторному електроприводі / І.З. Щур, В.Б. Козій // Вестн. Націон. ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2008. - Вып. 30. — С. 427-430.
10. Jahns T.M. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives – A review / T.M. Jahns, W.L. Soong // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1996. - V. 43, No. 2. – P. 321-330.
11. Макарчук О.В. Ротори електричних машин зі збудженням від постійних магнітів / О.В. Макарчук, І.Г. Шаповалов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – 2011. – Вип. 1/2011 (13). – С. 21-26.
12. Yang Yee-Pien. Design and control of axial-flux brushless DC wheel motors for electric vehicles-part I: multiobjective optimal design and analysis / Yee-Pien Yang, Yih-Ping Luh, Cheng-Huei Cheung // IEEE Trans. Magnetics. - 2004. – V. 40, No. 1. – P. 1873 – 1882.
13. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.

#### REFERENCES

1. Ovchinnikov I.E. *Vientilnyje Elektricheskije Dvigateli i Elektrichieskij Privod na Ikh Osonie (Malaja i Sriednaja Moshchnost')* [Contactless Electric Motor and Electric Drive Based on Them (Small and Medium Power)]. S.-Petersburg: Korona-Viek, 2006. 336 p.
2. Sabinin J.A., Denisova A.V. Gearless position drive. *Elektrotiekhnik*. 1999; 8: 22-28.
3. Svecharnik D.V. *Elektromashiny Nieposredstviennogo Privoda: Biezrieduktornyj Elektroprivod* [Electric Direct Drive: Gearless Electric Drive]. Moskva: Eniergoatomizdat, 1988. 208 p.
4. Stolov L.I., Afanasjev A.J. *Momientnyje Dvigateli Postojannogo Toka* [Torque DC Motors]. Moskva: Eniergoatomizdat, 1989. 224 p.
5. Chuchman J.I., Shchur I.Z., Cherepaniak M.V., Zrurkina V.M. Precision low-speed gearless contactless electric drive. *Elektroinform*. 2006; 2: 11 – 13.
6. Shchur I.Z., Malarchuk S.O., Koziy V.B. The algorithm of the integrated sensor of electrical angle position, speed and direction of rotation for slow-speed electric drive. *Visnyk Natsionalnogo Universytetu “Lvivska Politekhnik”*: *Electroenergetychni ta Electromechanichni Systemy*. 2005; 544: 168-173.
7. Shchur I.Z., Makarchuk O.V., Cherepaniak M.V. Strategy of control of gearless electric drive based on contactless embedded electromechanical modules with permanent magnets. *Visnyk Natsionalnogo Universytetu “Lvivska Politekhnik”*: *Electroenergetychni ta Electromechanichni Systemy*. 2008.; 615: 167-175.
8. Makarchuk O.V. The model of contactless electrical machine with excitation from permanent magnets. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2011; 1: 37-45.
9. Shchur I.Z., Koziy V.B. The principles of contactless switching of motor with permanent magnets in gearless

electric drive. *Vesnik Nacyonalnogo Universiteta "Kharkovskij Politehnikheskij Institut": Problemy Avtomatizirovannogo Electroprivoda. Teoria i Praktika*. 2008; 30: 427-430.

10. Jahns T.M., Jahns T.M., Soong W.L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives – A review. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 1996, V. 43, No. 2, P. 321-330.

11. Makarchuk O.V., Shapovalov I.G. The rotors of electrical machines with excitation from permanent magnets. *Electromehanični i Energozberihajuchi Systemy. Kremenchutskij Natsionalnyj Universytet*. 2011; 1 (13): 21-26.

12. Yang Yee-Pien, Luh Yih-Ping, Cheung Cheng-Huei. Design and control of axial-flux brushless DC wheel motors for electric vehicles-part I: multiobjective optimal design and analysis. *IEEE Trans. Magnetics*, 2004; V. 40, No. 1, P. 1873 – 1882.

13. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektromagnitnyje Polia I Protsessy v Elektrichieskikh Mashinakh I Ikh Phizicheskoje Modelirovanije* [Electromagnetic Fields and Processes in Electrical Machines and Their Physical Simulation]. Moskva: Energiya, 1969. 304 p.

Надійшла до редакції 16.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

И. З. ЩУР, А. В. МАКАРЧУК, В. Б. КОЗИЙ, И. Г. ШАПОВАЛОВ, Ф. И. ГОЛУБОВСКИЙ, Т. Я. КОВЕРКО,  
В. М. КРУГЛЯК

Национальный университет «Львовская политехника»

**Система прямого бесконтактного электропривода инфранизкой скорости с микроконтроллерным управлением.** В статье представлены результаты разработки безредукторного электропривода (БЭП) со стабильной рабочей частотой вращения 0,5 об/мин на базе бесконтактной синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ). Описана методика разработки многополюсной СМПМ с номинальным моментом 1 Н·м с применением компьютерного моделирования электромагнитного поля. Описано строение оригинальной САК, реализованной на простом микроконтроллере. Приведены результаты экспериментов с разработанным БЭП.

**Ключевые слова:** безредукторный электропривод, синхронная машина с постоянными магнитами, многополюсная моментная электрическая машина, компьютерный расчет электромагнитного поля, транзисторный инвертор с ШИМ, микроконтроллерное управление.

I. SHCHUR, O. MAKARCHUK, V. KOZIY, I. SHAPOVALOV, P. HOLUBOVSKYY, T. KOVERKO,  
V. KRUHLYAK

National University «Lviv Polytechnic»

**Infra Low Speed Direct Drive Contactless System with Control by Microcontroller.** The paper presents the results of the task to develop the gearless electric drive based on PMSM with a nominal torque 1 N·m for remote control by camera of surveillance on moving vehicle with providing following performance: movement at high speed at  $36^\circ/s \pm 5\%$ , movement in low speed at  $3^\circ/s \pm 10\%$ , stop and lock in a predetermined position with positioning accuracy  $0,1^\circ$ . The size of SMPM was limited at outer diameter – 160 mm. Cost of the system has been significantly limited too. Such a task is carried out in the direction of creating of multipole PMSM, developing of microcontroller automatic control system (ACS), debugging of the electric drive system and experimental verification of the entire system work. For development of the torque type PMSM the original method using FEM-analysis of electromagnetic field was created. For control of the PMSM torque we applied three-phase transistor voltage inverter with PWM and DC-DC voltage converter. ACS was realized based on 8-bit microcontroller Atmega128-16au, in which control algorithm and PWM control of voltage inverter and DC-DC converter was implemented. Rotor position sensor of PMSM is 12-bit absolute encoder of firm Kübler. ACS of machine speed has an original structure and implemented by pulse basis. For monitoring of the drive work the interface is created using the control microcontroller, in which the data of the running values of selected variables can transmit by the protocol RS232 from the microcontroller to the computer. The waveforms of basic coordinates that illustrate the work of electric drive on the set minimum speed in a changing torque of static load were adduced.

**Key words:** direct drive, PMSM, multipole torque electric machine, FEM analysis of magnetic field, transistor inverter with PWM, microcontroller control.