

РОЗПОДІЛ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ЛІНІЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА З МАГНІТНИМ ПІДВІСОМ

Представлені результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження розподілу магнітної індукції коаксіально-лінійного синхронного двигуна з магнітним підвісом (КЛСД-МП). Дослідження розподілу магнітної індукції проводилося в повітряному зазорі КЛСД-МП, а також на поверхні бігуна.

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции коаксиально-линейного синхронного двигателя с магнитным подвесом (КЛСД-МП). Исследования распределения магнитной индукции проводилось в воздушном зазоре КЛСД-МП, а также на поверхности бегуна.

ВСТУП

Коаксіально-лінійний синхронний двигун з магнітним підвісом (КЛСД-МП) [1] використовується у якості електромагнітного вібратора зі змінною резонансною частотою. Такі вібратори можуть застосовуватись при зануренні у ґрунт палів, шпунтів та інших будівельних елементів, а також для віброуцільнення бетонних сумішей, ґрунтів тощо [2].

Загальний вигляд КЛСД-МП зображено на рис. 1: МП – магнітний підвіс; ВЗ – вібробуджувач; 1 – статор КЛСД-МП; 2 – підшипникові щити; 3 – вал бігуна; 4 – постійні магніти МП (NdFeB); 5 – концентратори магнітного потоку МП; 6 – магнітопровід індуктора МП; 7 – обмотка МП; 8 – концентратори магнітного потоку ВЗ; 9 – постійні магніти ВЗ (NdFeB); 10 – магнітопровід індуктора ВЗ; 11 – обмотка ВЗ; 12 – пружини; 13 – додаткова маса.

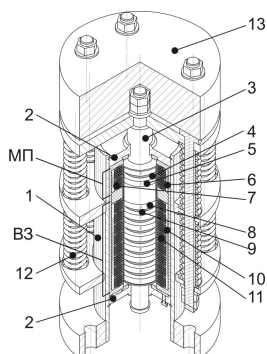


Рис. 1. Загальний вигляд коаксіально-лінійного двигуна з магнітним підвісом

За принципом дії КЛСД-МП складається з двох частин: вібробуджувача (ВЗ) та магнітного підвісу (МП) (див. рис. 1). Вібробуджувач забезпечує вимушені механічні коливання бігуна. Магнітний підвіс використовується у якості "електромагнітної пружини" зі змінною жорсткістю для зміни резонансної частоти коливань.

Роботу КЛСД-МП можна пояснити наступним чином. При подачі на обмотку статора ВЗ від перетворювача частоти (ПЧ) струму змінної полярності виникає електромагнітна сила, яка виводить з положення рівноваги коливальну систему двигуна. Переміщення бігуна та пов'язаної з ним додаткової маси призводить до деформації.

При зміні напрямку проходження струму в обмотках ВЗ бігун зміщується у протилежний до попереднього руху бік під дією електромагнітної сили і накопиченої в пружинах енергії, в результаті чого виникає коливальний рух бігуна.

Після подачі постійного струму на обмотку статора МП від регулятора струму виникає електромагнітна сила, яка за своїм впливом на бігун аналогічна до сили, що створюється деякою деформованою ме-

ханічною пружиною.

Одним з найпоширеніших способів розрахунку електромагнітних сил, що виникають у електричних машинах, є їх визначення за максимальним значенням магнітної індукції [3].

В роботах [4,5] недостатньо були проведені дослідження по розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі вібробуджувача КЛСД. В роботі [6] не були проведені дослідження по розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі магнітного підвісу, а також, дослідження по взаємному впливу магнітних полів ВЗ та МП при різних відстанях розташування їх індукторів один відносно іншого. Отже, дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП між індукторами ВЗ і МП та бігуном є актуальним.

Мета роботи. Визначення характеру розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП і впливу на нього відстані взаємного розташування вібробуджувача та магнітного підвісу.

МОДЕЛЮВАННЯ КЛСД-МП

Для проведення комп'ютерного моделювання була розроблена модель КЛСД-МП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics [7] (рис. 2): 1 – вал бігуна; 2 – корпус; 3 – повітряне середовище; 4 – магнітопровід статора; 5 – обмотки; 6 – концентратори магнітного потоку; 7 – постійні магніти; МП – магнітний підвіс; ВЗ – вібробуджувач.

Для моделі встановлено наступні основні параметри середовищ:

- відносна магнітна проникність для повітряного середовища (1) та валу (3): $\mu_r = 1,00$;
- для корпусу (2) та концентраторів магнітного потоку (6) з вбудованої бібліотеки матеріалів обрано Soft Iron (магнітом'яка сталь);
- для магнітопроводу статора (4) значення магнітної проникності $\mu_r(B)$ задано згідно табличних значень [8] як для електротехнічної сталі Э2312 (з такої сталі виготовлені магнітопроводи фізичної моделі КЛСД-МП);
- для постійних магнітів (7): $\mu_r = 1,06$ та залишкова індукція $B_r = \pm 1,20$ Тл (знак магнітної індукції чергується для магнітів ВЗ за формулою SN-NS-SN, див. рис. 2).

Чисельний розрахунок магнітного поля виконувався методом скінченних елементів. Задача розв'язувалася як вісесиметрична, в циліндричній системі координат, в площині roz для векторного потенціалу A , що має єдину ϕ -компоненту – $\mathbf{A} = (0, A_\phi, 0)$, в магнітостатичному наближенні.

Розрахунок розподілу магнітної індукції бігуна при радіальній відстані $\Delta r = 1$ мм до його поверхні проводився без елементів статора поз. 2, 4, 5 (див. рис. 2) і при зворотній полярності постійних магнітів вібробуджувача (за формулою NS-SN-NS). Результат розрахунків наведено на рис. 4 (крива – а).

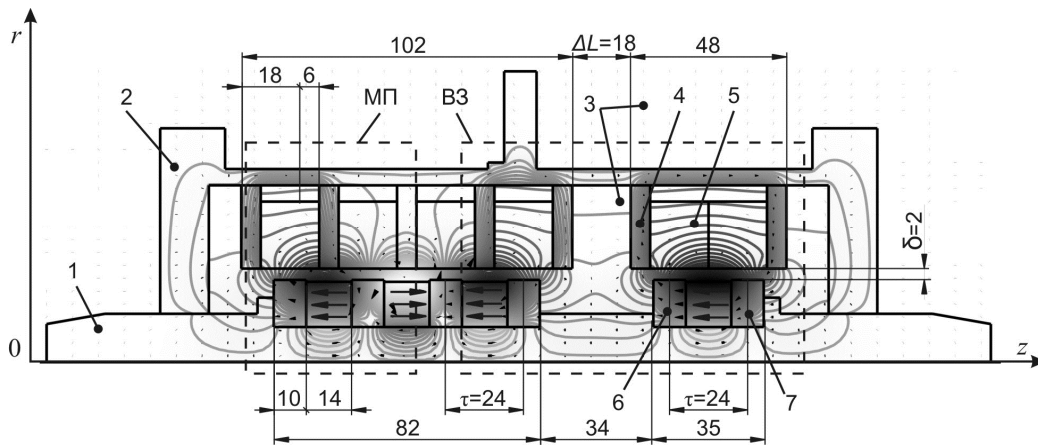


Рис. 2. Модель КЛСД-МП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics

Результат розрахунків розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі між бігуном та магнітопроводами ВЗ і МП за умови відсутності струму в обмотках статора зображено на рис. 6 (крива – а).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ НА БІГУНІ КЛСД-МП

Стенд для проведення дослідження зображено на рис. 3, де: 1 – пінопластова оболонка; 2 – бігун КЛСД-МП; 3 – вимірювальний щуп; 4 – вимірювальна лінійка; 5 – текстолітові прокладки; 6 – вимірювач магнітної індукції.

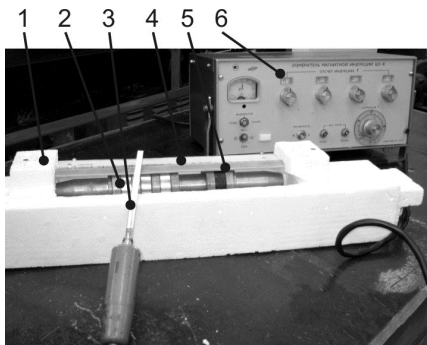


Рис. 3. Стенд для дослідження розподілу магнітної індукції бігуна КЛСД-МП с магнітним підвісом

Радіальна відстань від поверхні бігуна до вимірювального щупа складає $\Delta L=1$ мм.

За початок відліку береться точка на осі z , у якій виміряне значення магнітної індукції ще наближається до 0. Така точка для приведеної моделі знаходиться на 25 мм лівіше від крайнього лівого концентратора. Вимірювання значень індукції на поверхні бігуна КЛСД-МП проводяться з кроком $\Delta z=2,5$ мм. Вимірювання закінчується при досягненні координати $z=200$ мм, оскільки після неї виміряні значення індукції наближаються до 0.

Розподіл магнітної індукції на поверхні бігуна КЛСД-МП, що був отриманий в ході експериментального дослідження фізичної моделі зображений на рис. 4 (крива – б).

Максимальне значення індукції для середньої пари полюсів вібробуджувача складає: отримане розрахунком $B_{B3,p}=0,67$ Тл, отримане експериментом $B_{B3,e}=0,60$ Тл. Відносна відмінність між ними складає 10,4%. Для магнітного підвісу отримані наступні дані: $B_{MP,p}=0,41$ Тл, $B_{MP,e}=0,38$ Тл. Відносна відмінність – 7,3%.

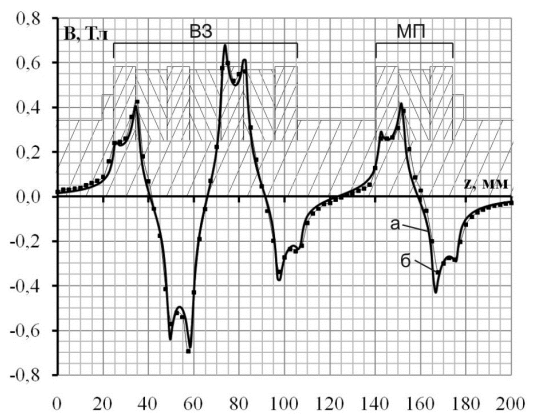


Рис. 4. Характер розподілу магнітної індукції на поверхні бігуна КЛСД-МП (заштриховані області – контур перерізу складових бігуна)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ В ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ КЛСД-МП БЕЗ СТРУМУ В ОБМОТКАХ

Для проведення дослідження було розроблено стенд (рис. 5): 1 – корпус КЛСД-МП; 2 – бігун; 3 – кронштейн; 4 – вимірювач магнітної індукції; 5 – вимірювальний щуп; 6 – регулюючий гвинт; 7 – підшипниковий щит. За допомогою регулюючого гвинта 6 (див. рис. 5) бігун 2 встановлюється у положення, при якому полюси бігуна та статора знаходяться один напроти одного (у створі).

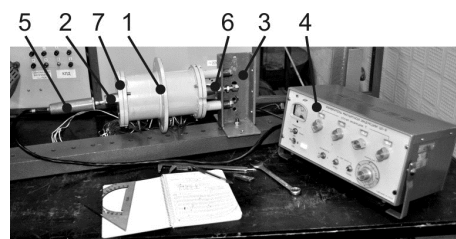


Рис. 5. Стенд для дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП

Вимірювання значень магнітної індукції у повітряному зазорі між бігуном та індукторами КЛСД-МП проведено з кроком $\Delta z=2,5$ мм. За початок вимірювань прийнято точку, що лежить на внутрішній поверхні лівого підшипникового щита 7 (див. рис. 5). В цій точці виміряне значення магнітної індукції ще

наближається до 0. Вимірювання закінчується при досягненні координати $z=200$ мм, оскільки після неї виміряні значення індукції наближаються до 0.

Характер розподілу магнітної індукції у повітряному зазорі КЛСД-МП за експериментальними даними наведено на рис. 6 (крива – б). Максимальні значення індукції для середньої пари полюсів вібробуджувача: $B_{\delta,V3,p}=0,54$ Тл, $B_{\delta,V3,e}=0,80$ Тл, відмінність – 32,5%. Для магнітного підвісу: $B_{\delta,MP,p}=0,42$ Тл, $B_{\delta,MP,e}=0,33$ Тл, відмінність – 21,4%.

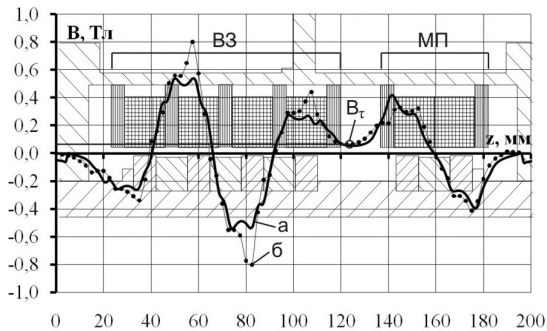


Рис. 6. Характер розподілу магнітної індукції в зазорі КЛСД-МП (заштриховані області – контур перерізу складових статору та бігуна)

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВІДСТАНІ ВЗАЄМНОГО РОЗТАШУВАННЯ ВІБРОБУДЖУВАЧА І МАГНІТНОГО ПІДВІСУ

Оцінка впливу відстані взаємного розташування між вібробуджувачем і магнітним підвісом може бути зроблена з залежності мінімального значення магнітної індукції B_z в проміжку між ВЗ та МП від відстані між ними (див. рис. 6). Для приведеної в статті фізичної моделі ця відстань складає $\Delta L=18$ мм.

Залежність $B_z=f(\Delta L)$ була отримана моделюванням КЛСД-МП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics і приведена на рис. 7.

З графіку видно, що при розміщенні індукторів ВЗ та МП без проміжку між ними ($\Delta L=0$ мм), мінімальне значення магнітної індукції складає $B_z=0,222$ Тл, що відповідає 52,8% від максимального значення магнітної індукції $B_{\delta,MP,p}$ полюса МП. При збільшенні відстані до $\Delta L=18$ мм, мінімальне значення індукції набуває $B_z=0,055$ Тл (13,1% від $B_{\delta,MP,p}$). З подальшим збільшенням ΔL мінімальне значення індукції B_z спадає за експонентою.

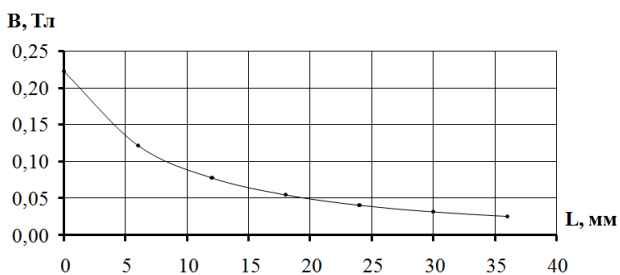


Рис. 7. Залежність $B_z=f(\Delta L)$ мінімального значення індукції в проміжку між індукторами МП та ВЗ від відстані між ними

Отже, значення довжини проміжку між індукторами ВЗ та МП при їх розміщенні в одному корпусі впливає на характер розподілу магнітного поля в їх активних зонах. Для зменшення впливу магнітних полів ВЗ та МП одне на одне пропонується значення довжини проміжку між індукторами обирати не меншим ніж величина полюсної поділки τ .

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ В ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ КЛСД-МП ЗІ СТРУМОМ В ОБМОТКАХ

Конструкція стенду для дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП зі струмом в обмотках наведена на рис. 8: 1 – корпус КЛСД-МП; 2 – автотрансформатор; 3 – вимірювальний щуп; 4 – амперметр; 5 – кронштейн; 6 – регулювальний гвинт; 7 – осцилограф.

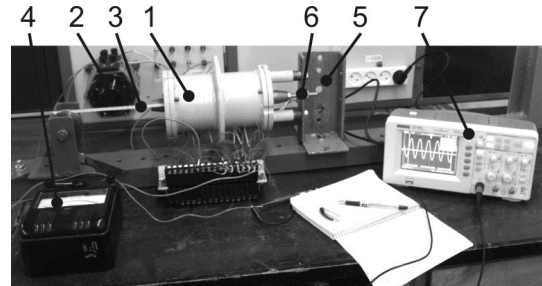


Рис. 8. Стенд для дослідження розподілу магнітної індукції КЛСД-МП зі струмом в обмотках

Обмотки ВЗ та МП фізичної моделі КЛСД-МП, що досліджується, складаються з 4 та 2 котушок (відповідно). Кожна котушка містить $w=550$ витків мідного емальованого проводу перерізом $S_{np}=0,418$ мм².

Для проведення дослідження був розроблений вимірювальний щуп (рис. 9), що являє собою текстолітову рейку, в кінці якої розміщена котушка з 40 витків тонкого мідного ізолюваного проводу (індуктивний датчик ІД). Котушка намотана на каркас 5×5 мм. У бічній стороні рейки, в пазу, розміщуються провідники, що під'єднані до котушки. Провідники з'єднані з коаксіальним екранованим проводом.

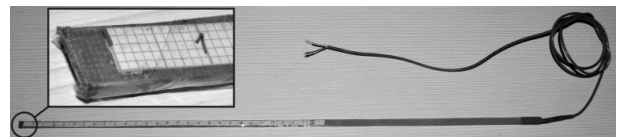


Рис. 9. Зовнішній вигляд вимірювального щупа

Принципова електрична схема стенду зображена на рис. 10: МП – обмотки магнітного підвісу; ВЗ – обмотки вібробуджувача; ІД – датчик вимірювального щупа; Т1 – автотрансформатор; OSC – осцилограф; РА1 – амперметр. Стенд підключається до джерела змінної напруги $U \sim 220$ В з частотою $f=50$ Гц.

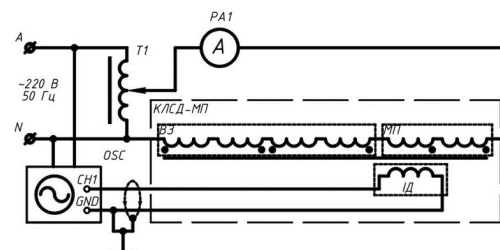


Рис. 10. Принципова електрична схема стенду

Визначення магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП проводиться обчисленням по значенням наведеної ЕРС у датчику ІД вимірювального щупу 3 (див. рис. 8). Для встановлення величини змінного струму через обмотки двигуна $I=1,0$ А використовується автотрансформатор 2, а для його контролю – амперметр 4.

Вимірювання значень наведеної у датчику ЕРС проведено з кроком $\Delta z=2,5$ мм. За початок відліку прийнято точку, у якій вимірне значення ЕРС ще наближається до 0. Така точка для приведеної моделі знаходиться на відстані 2,5 мм від внутрішньої поверхні підшипникового щита. Бігун встановлюється у початкове положення (як у попередньому дослідженні).

Для обчислення значень магнітної індукції $|B_{em}|$ по відповідним значенням вимірної ЕРС використувався вираз:

$$|B_{em}| = \frac{S_{i0}E}{4,44fw_{i0}}, \quad (1)$$

де S_{i0} – площа котушки індуктивного датчика ІД ($S_{i0}=25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$); E – вимірне значення ЕРС, В; f – частота мережі ($f=50$ Гц); w_{i0} – кількість витків індуктивного датчика ІД ($w_{i0}=40$).

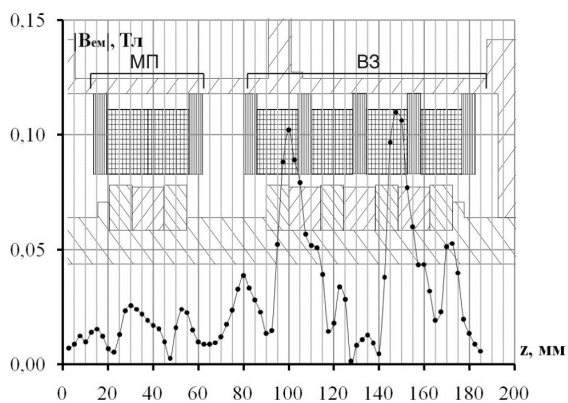


Рис. 11. Характер розподілу магнітної індукції в зазорі КЛСД-МП зі струмом в обмотках (заштриховані області – контур перерізу складових статору та бігуна)

Характер розподілу магнітної індукції у повітряному зазорі між статором та бігуном КЛСД-МП зі струмом в обмотках $I=1,0$ А наведено на рис. 11.

Максимальне значення індукції для середнього полюсу вібробуджувача за результатами експериментального дослідження складає $|B_{em,B3}|=0,110$ Тл, для магнітного підвісу – $|B_{em,MT}|=0,026$ Тл.

ВИСНОВОК

В ході роботи по дослідженню розподілу магнітної індукції КЛСД-МП були розроблені експериментальні стенди та методика випробування. Отримані максимальні значення індукції дослідним шляхом та розрахунком різняться в межах 10,4% для вібробуджувача і 7,3% для магнітного підвісу. Цю розбіжність можна пояснити неточностями вимірювань під час проведення експериментальних досліджень.

За результатами досліджень було виявлено, що вплив магнітних полів ВЗ та МП одне на одне при розміщенні їх індукторів в одному корпусі є значним при розташуванні їх безпосередньо один біля одного. При збільшенні проміжку між ними до значення більшого за полюсну поділку взаємний вплив зменшується до прийнятної величини.

Отримані результати по дослідженню розподілу магнітної індукції КЛСД-МП можуть використовуватись при проектуванні електричних машин такого типу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент на корисну модель №51151. Вібробуджувач. Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Пархоменко Д.І. та інші. Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи та корисні моделі", 10.07.2010 р., бюл. №13.

2. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. Учеб. пособие для студ. строительных и автомобильных и автомобильно-дорожных вузов. М., "Высш. Школа", 1977, 255 с. с ил.

3. А.В. Иванов-Смоленский. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика". - М: Высш. шк., 1989. – 312 с.: ил.

4. Голенков Г.М., к.т.н., Пархоменко Д.І., Дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі лінійного синхронного двигуна з магнітним підвісом // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. - 2012.- № 1 - с. 22-24.

5. Голенков Г.М., к.т.н., доц., Бондар Р.П., Макогон С.А., Подольцев А.Д., д.т.н. Численный расчет магнитного поля и основных характеристик электровибратора на основе коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. - 2007.-№ 1 - с. 8-12.

6. Голенков Г.М., к.т.н., Пархоменко Д.І., Макогон С.А., Бондар Р.П. Моделирование работы коаксиально-линейного синхронного вибратора с магнитным подвесом // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. - 2008.-№ 1 - с. 18-20.

7. www.comsol.com.

8. В.Г. Герасимов, П.Г. Грудинский, Л.А. Жукова и др., Электротехнический справочник 6-е изд., том 1. – М: Энергия, 1980.

Bibliography (transliterated): 1. Patent na korisnu model' №51151. Vibrobudzhuvach. Bogaenko M.V., Golenkov G.M., Parhomenko D.I. ta inshi. Vidano vidpovidno do Zakonu Ukraini "Pro ohoronu prav na vinahodi ta korisni modeli", 10.07.2010 r., byul. №13. 2. Bauman V.A., Byhovskij I.I. Vibracionnye mashiny i processy v stroitel'stve. Ucheb. posobie dlya stud. stroitel'nyh i avtomobil'no-dorozhnyh vuzov. M., "Vyssh. Shkola", 1977, 255 s. s il. 3. A.V. Ivanov-Smolenskij. `Elektrornagnitnye sily i preobrazovanie `energii v `elektricheskih mashinah: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. "Elektrornehanika". - M: Vyssh. shk., 1989. - 312 s.: il. 4. Golenkov G.M., k.t.n., Parhomenko D.I., Doslidzhennya rozpodilu magnitnoї indukciї v povitryanomu zazorі linijnogo sinhronnogo dviguna z magnitnim pidvisom // Elektrotehnika i elektromehanika: Naukovo-praktichnij zhurnal. - 2012.-№ 1 - s. 22-24. 5. Golenkov G.M., k.t.n., doc., Bondar R.P., Makogon S.A., Podol'cev A.D., d.t.n. Chislennyj raschet magnitnogo polya i osnovnih harakteristik `elektrovibratora na osnove koaksial'no-linejnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami // Elektrotehnika i elektromehanika: Naukovo-praktichnij zhurnal. - 2007.-№ 1 - s. 8-12. 6. Golenkov G.M., k.t.n., Parhomenko D.I., Makogon S.A., Bondar R.P. Modelyuvannya roboti koaksial'no-linejnogo sinhronnogo vibratora z magnitnim pidvisom // Elektrotehnika i elektromehanika: Naukovo-praktichnij zhurnal. - 2008.-№ 1 - s. 18-20. 7. www.comsol.com. 8. V.G. Gerasimov, P.G. Grudinskij, L.A. Zhukova i dr., `Elektrotehnicheskij spravochnik 6-e izd., tom 1. - M: `Energiya, 1980.

Надійшла 25.10.2012

Голенков Геннадій Михайлович, к.т.н., доц.

Пархоменко Д.І.

Київський національний університет будівництва

і архітектури

кафедра електротехніки та електроприводу

03680, Київ, Повітрофлотський проспект, 31

тел. 066 4431611, 067 2336450

e-mail: parkhomenkodm@gmail.com

Golenkov G.M., Parkhomenko D.I.

Magnetic induction distribution in a linear synchronous motor with magnetic suspension.

Results of computer simulation and experimental investigations of magnetic induction distribution in a coaxial linear synchronous motor with magnetic suspension are presented. The magnetic induction distribution has been studied both in the motor air gap and on the runner surface.

Key words – coaxial linear synchronous motor, magnetic suspension, magnetic induction distribution.