

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ВСИПНИХ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ МАШИН ПІД ЧАС РЕМОНТУ

© Чучман Ю. І., Максимович Д., 2004

Розглянуто аналіз залежності техніко-економічних показників асинхронних машин з всипними обмотками від типу застосованої обмотки; подаються приклади виконання обмоток різних типів, які забезпечують мінімізацію витрат міді без збільшення трудомісткості обмотувальних робіт. Одночасно забезпечується зменшення витрат у машинах, збільшення надійності та гарантійного терміну експлуатації зі збереженням їх номінальної потужності та коефіцієнта потужності.

This article deals with the interrelationship of performance characteristics of the induction motors with the fillings windings that are dependent on the type of windings which are used during the repair; there are examples of the realization of the different types of windings that could provide the minimization of copper use without increasing the labor-intensiveness of the procedure. At the same time it provides the decrease of power lose, increase of reliable and the term of its operation in the motors with invariably power factor.

**Постановка проблеми.** Зменшення видатків на матеріальні та трудові ресурси є основою раціональної економічної діяльності сучасних суб'єктів господарювання. Шляхи зменшення зазначених видатків, особливо зважаючи на існуючий рівень використання досягнень науки та техніки, можуть бути вишукані тільки за результатами глибокого та всебічного аналізу ситуації в цій сфері діяльності.

Асинхронні машини малої і середньої потужності з всипними обмотками є основним видом електромеханічних перетворювачів, які використовуються промисловими підприємствами та іншими суб'єктами господарювання [1]. Незважаючи на достатньо високу надійність машин цього виду, масовість їх застосування, інтенсивність експлуатації та помилкові дії обслуговуючого персоналу, а в деяких випадках, і прорахунки проєктантів, вони є основним об'єктом діяльності підприємств, що займаються ремонтом електричних машин [2].

Технічні характеристики та економічні показники асинхронних машин з всипними обмотками значною мірою залежать від типу застосованої обмотки статора.

Вибір типу обмотки асинхронних двигунів серійного та масового виробництва значною мірою залежить від запланованого рівня техніко-економічних показників машин і наявного технологічного обладнання, яке передбачається застосувати для виконання обмотувальних робіт. При організації ремонтних робіт треба мати на увазі, що в умовах масового виробництва усі асинхронні двигуни виготовляють з застосуванням високопродуктивних механізованих способів намотування та вкладання обмоток.

**Аналіз останніх досліджень.** Використання засобів механізації виготовлення обмоток зумовлює необхідність деякого видовження чолових частин котушок, що зумовлено специфікою технологічних прийомів та особливостями конструкції пристроїв, необхідних для їх реалізації [3]. Це видовження спонукає до підвищених витрат обмотувальних дротів. Крім того, переважна більшість асинхронних двигунів потужністю 10–15 кВт виконується з одношаровими або однодвошаровими концентричними обмотками [4, 5]. Заміна таких обмоток обмотками інших типів створює реальну можливість підвищення техніко-економічних показників цих двигунів. Наприклад, за даними [6] застосування верстатів для реалізації розокремленого способу виготовлення статорних обмоток призводить до необхідності збільшення середньої довжини витка

статорної обмотки на 6–12 %, порівняно з ручним способом виготовлення, а застосування верстатів для суміщеного способу намотування – на 10–15 %.

**Задачі дослідження.** Зазначений стан речей дозволяє дійти висновку, що оптимізація структури всипних обмоток та пошук оптимальної геометрії чолових частин обмоток є актуальною проблемою сучасного електромашинобудування, вирішення якої дозволить у масштабах країни зменшити на десятки тонн витрату дефіцитної міді, підвищити надійність та термін служби відремонтованих машин, а в більшості випадків забезпечить зменшення трудомісткості ремонтних робіт.

**Використання міді у всипних обмотках.** У концентричній одношаровій та одно-двошаровій всипних обмотках довжину напіввитка найменшої внутрішньої котушки, так само, як і в котушок рівнокотушкових обмоток, з достатньою для практичної мети точністю можна вирахувати за формулою

$$l_1 = l_s + 2m + \pi t_z \frac{y_1}{2}, \quad (1)$$

де  $l_s$  – довжина активної частини обмотки, розташованої в пазу статора з врахуванням допуску на розпушування пакета;  $m$  – довжина прямолінійної ділянки обмотки, після її виходу з паза, яка залежить від способу виготовлення та вкладання котушок (рис. 1);  $t_z = \frac{\pi D_m}{Z}$  – зубцевий крок, визначений на середині висоти зубця;

$$D_m = D_1 + h_z;$$

$D_1$  – діаметр розточки статора;  $Z$  – кількість зубців статора;  $y_1$  – крок обмотки по пазах для найменшої внутрішньої котушки.

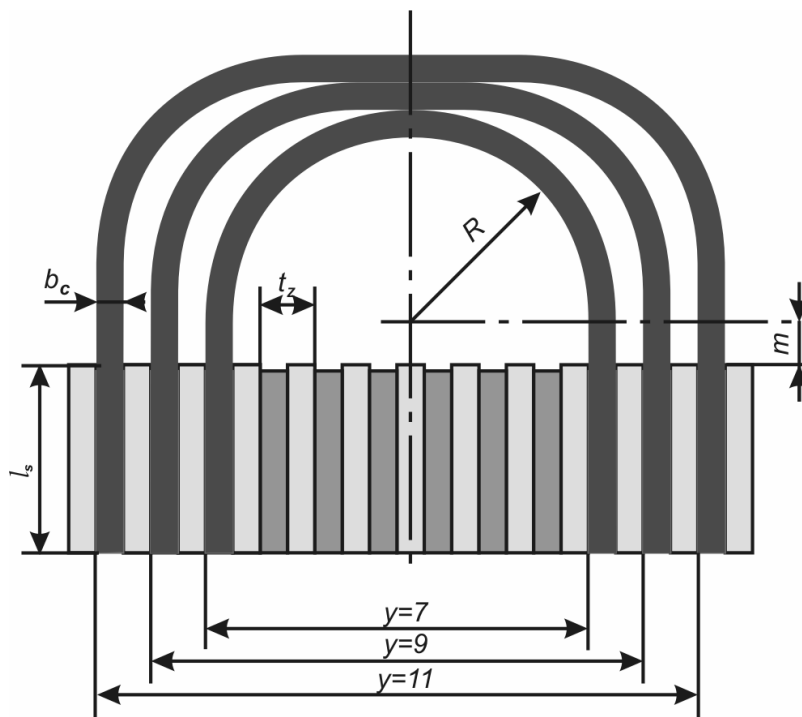


Рис. 1. Схема розташування котушок концентричної обмотки

Довжина напіввитка наступних котушок, які охоплюють найменшу, з достатньою для практичної мети точністю, дорівнює

$$l_i = l_1 + 3(i-1)t_z, \quad (2)$$

де  $i$  – порядковий номер котушки.

З (2) очевидно, що застосування концентричних обмоток призводить до додаткових витрат міді. Для виготовлення таких обмоток з  $q = 2$  необхідно витрати на 6–9 % більше міді, ніж при виготовленні рівнокотушкових обмоток, а при  $q = 3$  – на 11–13 %. Збільшення загальної довжини чолових частин відбувається також за рахунок збільшення довжини прямолінійних ділянок чолових частин котушок на виході з пазів  $m$ . При механізованому вкладанні обмоток в пази ця ділянка в 2–4 рази довша, ніж потрібно при ручному вкладанні. Врахування зазначеного дає можливість ще на 1,5–2,0 % вкоротити обмотку.

**Конструкції та способи виконання всипних обмоток.** Під час виконання ремонтів асинхронних машин, в перебігу яких здійснюється заміна статорних обмоток, як правило, цю заміну проводять зі збереженням типу обмотки та інших обмоткових даних, які були в машині заводського виконання. Але викладене вище дозволяє піддати сумніву раціональність такого технічного рішення особливо в сучасних умовах господарювання.

З попереднього розділу впливає, що застосування концентричних обмоток у всіх випадках призводить до збільшення витрат обмотувальних дротів, порівняно з рівнокотушковими обмотками будь-яких типів. Беручи до уваги, що в силу своїх конструкційних особливостей одношарові концентричні обмотки (рис. 2, а) практично у всіх випадках виконуються з діаметральним кроком, то боротьба з негативними впливами вищих гармонічних на якість машин з такими обмотками стає практично неможливою.

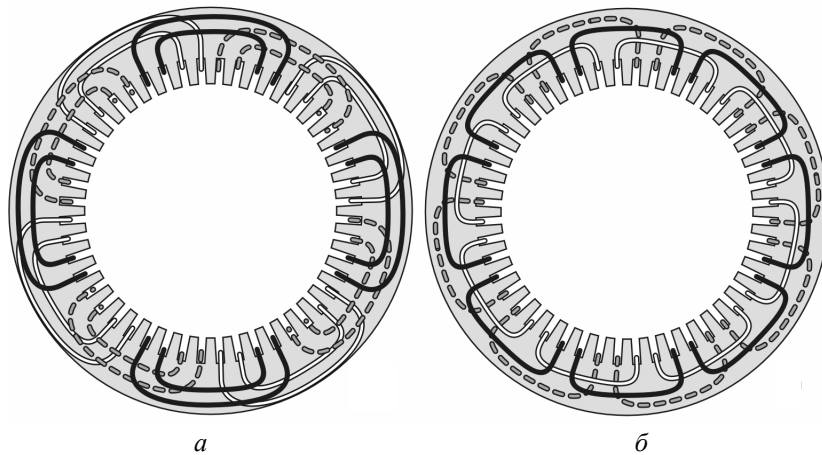


Рис. 2. Одношарові обмотки: концентрична (а) і в розвалку (б)

Вплив реальних умов експлуатації машин та виконання ремонтних операцій, пов'язаних з видаленням обмотки з пазів шихтованих осердь, призводять до погіршення характеристик електротехнічної сталі, з якої виготовлено осердя, що спричиняє підвищення втрат у машині. Поєднання підвищених втрат у сталі з додатковими втратами, зумовленими видовженням чолових частин обмоток, стає причиною помітного погіршення техніко-економічних показників машин, які піддавали ремонту.

Бажання та необхідність покращання якості відремонтованих машин при мінімальних матеріальних видатках на їх ремонт, спричиняють висновок про необхідність переходу до рівнокотушкових обмоток з мінімальним кроком.

До числа таких обмоток належать одношарові рівнокотушкові черговані обмотки у розвалку та двошарові.

Таке технічне рішення, з одного боку, дозволяє зменшити паразитні гармоніки, а з іншого, – звести до мінімуму витрату обмотувальної міді.

Одношарові рівнокотушкові обмотки в розвалку (рис. 2, б) можуть бути виконані за умови, що кількості пазів на полюс і фазу  $q = \frac{Z}{2pm} = 2$ . Крок таких обмоток дорівнює  $y_p = y - 1$ , що забезпечує можливість зменшення витрати обмотувальної міді.

Одношарові рівнокотушкові обмотки з зосередженими чоловими частинами (рис. 3, а) виконуються з діаметральним кроком котушок по пазах  $y = \tau = Z/2p$ , але за рахунок зменшення довжини вильоту чолових частин також забезпечують зменшення витрати обмотувального дроту, порівняно з концентричною.

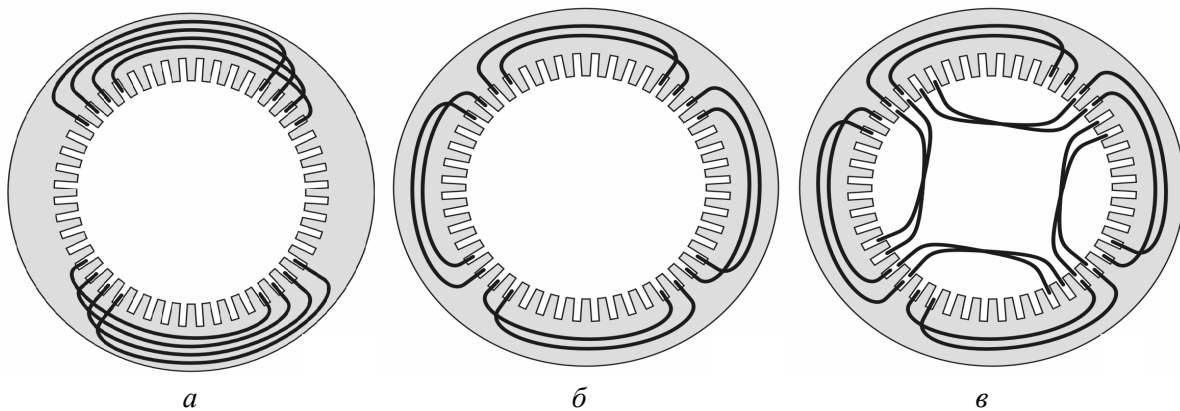


Рис. 3. Різновиди рівнокотушкових обмоток: одношарова з зосередженими чоловими частинами (а); одношарова в розвалку (б); двошарова (в)

У випадках, коли  $q > 2$  обмотки у розвалку з котушками однакових розмірів можуть бути виконані з зосередженими чоловими частинами, як це показано на рис. 3, б. При цьому крок котушок по пазах буде дорівнювати  $y_p = y - (q/2)$ . Такі обмотки можуть бути також виконані з коаксіальними котушками, при цьому середній крок котушок залишається дорівнювати  $y_p$ .

Трудомісткість виготовлення традиційних двошарових обмоток дещо більша, ніж одношарових, що зумовлене необхідністю намотування та вкладання вдвічі більшої кількості котушок, ускладненнями з ізолюванням котушок тощо. Крім того, з метою запобігання утворення несиметрії багатозафазних обмоток, вони вкладаються з “підняттям кроку”, що також призводить до збільшення трудомісткості.

З метою виключення трудомісткої операції “піднімання кроку” при одночасному збереженні переваг, притаманних машинам з двошаровими обмотками, в практиці електромашинобудування знаходять застосування спеціальні схеми і способи вкладання двошарових обмоток.

На рис. 3, в показано схему однієї фази двошарової обмотки, виготовленої з котушок однакових розмірів ( $y = 10$ ). Обмотка має два шари, вкладання кожного з яких не викликає необхідності піднімання кроку. Ця обмотка за своєю суттю є поєднанням двох одношарових обмоток, схема яких показана на рис. 3, б. Довжина чолових частин такої обмотки така сама як і в попередньому випадку. Суттєвою відмінністю такої обмотки є можливість активного впливу на величину вищих гармонік поля, що досягається за рахунок зміщення одного шару обмотки щодо іншого.

Двошарову обмотку без “піднімання кроку” також можна отримати шляхом накладання одна на одну двох одношарових концентричних обмоток. Фрагмент схеми такої обмотки з кроками котушок  $y_1 = 5$  і  $y_2 = 7$  показано на рис. 4. Така обмотка за своїми параметрами практично не відрізняється від обмоток, виготовлених за схемою, подібною до схеми з рис. 3, в, але на її виготовлення треба витратити дещо більше обмотувальної міді.

**Комплексна оцінка оптимізації статорної обмотки асинхронного двигуна.** Вкладання обмоток вручну, як це завжди робиться під час проведення ремонтів асинхронних машин у ремонтних цехах та підприємствах з широкою номенклатурою, створює можливості для застосування котушок зі зменшеною довжиною чолових частин. Такий метод вкладання робить доцільною заміну заводських одношарових та одно-двошарових обмоток на одношарові рівнокотушкові або двошарові обмотки, особливо у випадках, коли останні виконуються без “підняття кроку”.

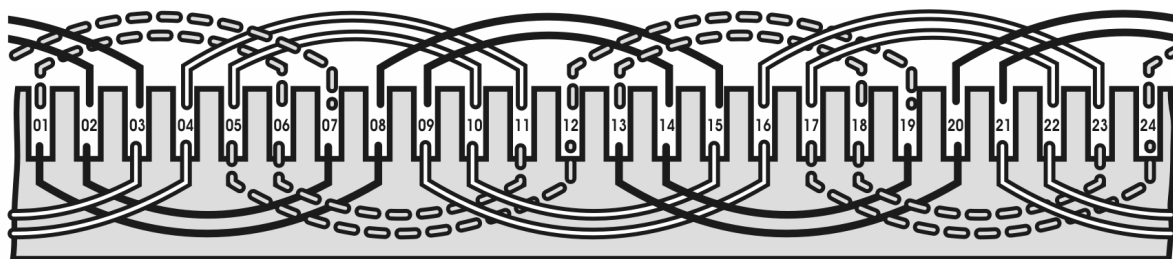


Рис. 4. Двошарова обмотка, утворена з двох одношарових концентричних обмоток

Впровадження зазначених заходів зменшує витрату обмотувальної міді, підвищує ефективність її використання, зменшує нагрівання машин, збільшує термін служби та спрощує технологічні процеси виконання обмотувальних робіт, а отже, зменшує трудомісткість і собівартість ремонту.

Для виконання комплексної оцінки сукупності технічних рішень та реалізації параметричної та структурної оптимізацій статорних обмоток двигунів під час ремонту раціонально використовувати спеціалізований пакет прикладних програм та бази даних про параметри та існуючі схемо-технічні рішення, які знаходять застосування в сучасному електромашинобудуванні [7].

Оцінка ефективності робіт з оптимізації статорної обмотки асинхронного двигуна ілюструється на прикладі модернізації двигунів 4A160S8 і 4A132S4. За паспортом двигун 4A160S8 має такі параметри:  $P = 7.5$  кВт;  $n = 735$  об/хв;  $U = 220/380$ В;  $\eta = 85\%$ ;  $\cos\varphi = 0.73$ ;  $Z = 48$ ; обмотка одношарова концентрична, схема якої показана на рис.2,а; середня довжина витка обмотки  $L_T = 0.616$  м; маса міді  $G_w = 7.53$  кг; а двигун 4A132S4 має параметри:  $P = 7.5$  кВт;  $n = 1460$  об/хв;  $U = 220/380$ В;  $\eta = 87\%$ ;  $\cos\varphi = 0.87$ ;  $Z = 48$ ; обмотка одношарова концентрична, середня довжина витка обмотки  $L_T = 0.596$  м; маса міді  $G_w = 5.16$  кг.

Для двигуна 4A160S8 розглянуто такі варіанти модернізації: перший – заміна заводської одношарової концентричної обмотки (рис. 2, а) на одношарову рівнокотушкову у розвалку (рис. 2, б), другий – заміна вихідної обмотки на двошарову, яка складається з двох одношарових концентричних обмоток, зсунутих одна відносно одної на одну пазову поділку (рис. 4); а для двигуна 4A132S4: перший – заміна заводської обмотки (рис. 3, а) на одношарову рівнокотушкову у розвалку (рис. 3, б), другий – заміна вихідної обмотки на двошарову, яка складається з двох одношарових рівнокотушкових обмоток, зсунутих одна відносно одної на дві пазові поділки (рис. 3, в).

Основні техніко-економічні показники двигунів до і після модернізації, отримані за допомогою розрахунків наведено у таблиці.

#### Техніко-економічні показники двигунів до і після модернізації обмотки

Назва параметра	Тип двигуна					
	4A160S8 (схема обмотки на рис.)			4A132S4(схема обмотки на рис.)		
	2,а	2,б	4	3,а	3,б	3,в
1. Потужність, кВт	7,5	7,6	7,55	7,5	7,61	7,64
2. Довжина чолової частини, в.о.	1,0	0,770	0,770	1,0	0,82	0,82
3. Маса обмотки, кг	7,53	6,63	6,63	5,16	4,27	4,27
4. $\eta$ , %	85	86,7	86,8	85,0	87,4	87,3
5. $\cos\varphi$ , в.о.	0,73	0,733	0,723	0,87	0,89	0,89
6. Втрати в машині при навантаженні 7,5 кВт, Вт	1687	1482	1480	1141	974	987

З наведених у таблиці даних видно, що зменшення довжини чолових частин, досягнуте внаслідок модернізації обмотки, помітно впливає на величину втрат у машині. Модернізація забезпечує підвищення коефіцієнтів корисної дії та потужності двигунів. Машина після модер-

нізації буде менше нагріватися, а отже, підвищиться її надійність та термін служби. Порівняння схем концентричних і рівнокотушкових одношарових обмоток не дає підстав для очікування якогось збільшення трудомісткості виготовлення модернізованих обмоток.

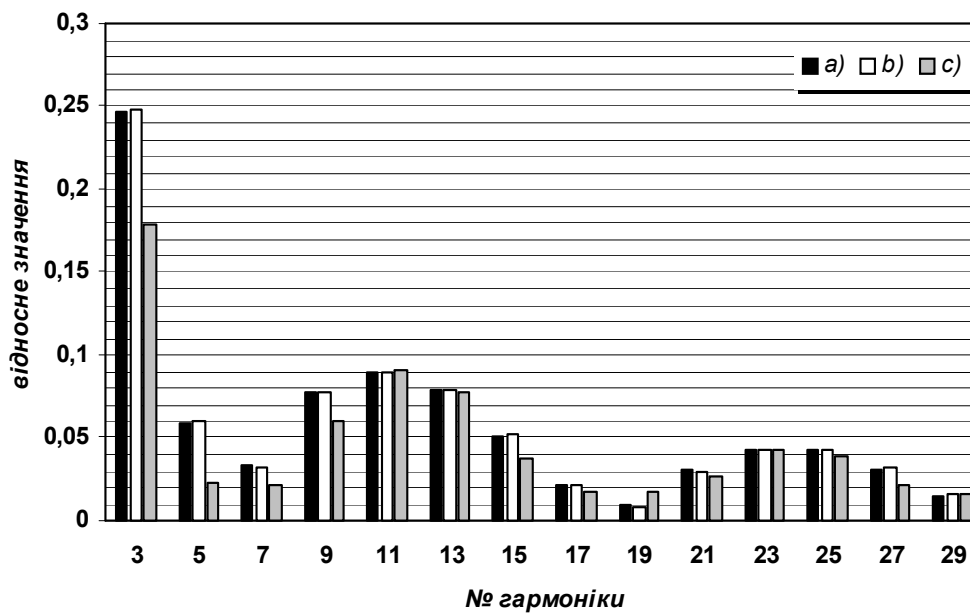


Рис. 5. Вплив схеми обмотки на величину вищих гармонік поля в машині

Вплив типу обмотки на величину вищих гармонік поля можна прослідкувати за рис.5, на якому зображено діаграми спектральних складів магнітного поля машин, схеми обмоток яких показано на рис. 2 і рис. 4. Обмотка за схемою, показаною на рис. 2, б, має практично таку саму амплітудно-частотну характеристику, що і базовий варіант обмотки (рис. 2, а). Використання обмотки, схема якої показана на рис. 4, забезпечує помітне зменшення амплітуд гармонік з номерами  $\nu = 3, 5, 7$  і  $9$ , тобто саме тих, що суттєво впливають на пускові властивості двигунів.

**Висновки.** Виконані дослідження дозволяють дійти таких висновків:

- під час проведення ремонту двигунів з всипними обмотками доцільно виконувати модернізацію обмоток статорів, яка полягає у відповідній зміні схеми обмотки та оптимізації розмірів її котушок;
- модернізація всипних обмоток статорів забезпечує економію обмотувальної міді при одночасному зменшенні втрат у машинах та підвищенні їх надійності;
- з метою зменшення трудомісткості інженерних робіт на модернізацію та підвищення достовірності їх результатів, доцільно використовувати спеціалізований пакет прикладних програм та бази даних про схемо-технічні параметри, необхідних для ремонту.

1. Антонов М.В., Акімова Н.А., Котеленец Н.Ф. *Эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб. пособие для спец. "Электромеханика" вузов.* – М.: Высш. шк., 1989. – 192 с. 2. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др. – М.: Энергия, 1980. – 488 с. 3. Олифиренко В.Н., Никонов А.И., Фильдштейн И.Я., Епифанов В.С. *О механизированной укладке катушек статоров.* – Новая технология, средства механизации и управления производством в электромашиностроении // Тр. ВНИИТЭлектромаш. – 1975. – Вып. 12. – С. 84–92. 4. Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. *Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация: Справочник.* – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с. 5. Геращенко В.Г., Тембель П.В. *Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов.* – К.: Техніка, 1972. – 536 с. 6. Антонов М.В., Герасимова Л.С. *Технология производства электрических машин.* – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с. 7. Yuriy Chuchman, Denys Maksymovych, Yuriy Malichenko *Dataware of the Induction Motors Repair "Zeszyty Problemowy – Maszyny Elektryczne", BOBRME "Komel", 2003, nr. 65/2003.* – P. 83–88.