

УДК 621.313.2

Л. І. МАЗУРЕНКО, О. В. БІБІК, В. Г. КЛИМЕНКО, М. О. ШИХНЕНКО

**ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА У СКЛАДІ ВЕРСТАТ-ГОЙДАЛКИ**

Розроблено імітаційну модель приводу верстат-гойдалки на основі вентильно-реактивного двигуна (ВРД) з врахуванням періодичного навантаження. Момент навантаження на кривошипі верстат-гойдалки в залежності від кута його повороту розрахований графо-аналітичним методом. За результатами досліджень електромеханічних процесів ВРД визначено раціональні способи регулювання частоти обертання ротора, які забезпечують стабілізацію частоти обертання кривошипа та енергоефективність приводу верстат-гойдалки.

**Ключові слова:** вентильно-реактивний двигун, верстат-гойдалка, імітаційна модель, регулювання та стабілізація частоти обертання двигуна, енергоефективність.

Разработана имитационная модель привода станка-качалки на основе вентильно-реактивного двигателя (ВРД) с учетом периодической нагрузки. Момент нагрузки на кривошипе станка-качалки в зависимости от угла его поворота рассчитан графо-аналитическим методом. По результатам исследований электромеханических процессов ВРД определены рациональные способы регулирования частоты вращения ротора, которые обеспечивают стабилизацию частоты вращения кривошипа и энергоэффективность привода станка-качалки.

**Ключевые слова:** вентильно-реактивный двигатель, станок-качалка, имитационная модель, регулирование и стабилизация частоты вращения двигателя, энергоэффективность.

A simulation model of the machine-rocking chair based on the switched reluctance motor is developed taking into account the periodic load. The load torque at the crank of the machine-rocking chair, depending on the angle of its rotation, is calculated graphical-analytical method. According to the research of electromechanical processes of the SRM defined the rational methods of the rotor speed control, which provide a range of stabilization of the crank speed, and the efficiency of the machine-rocking chair drive energy. The possibility of applying the SRM as a drive for the machine-rocking chair on the basis of technological requirements is estimated.

**Keywords:** switched reluctance motor, the machine-rocking chair, simulation model adjustment and stabilization of the engine speed, energy efficiency.

**Вступ.** В сучасних штангових нафтовидобувних насосних установках використовують в основному нерегульовані асинхронні трифазні електродвигуни потужністю від 1,7 до 55 кВт. Електродвигуни верстат-гойдалок працюють в умовах періодичного навантаження та зі значними величинами максимального і пускового моментів. Довготривалий період їх роботи в режимі холодного ходу та недовантаження призводять до зниження енергоефективності приводу і неоптимальному використанню енергоресурсів [1,2,4]. Тому регулювання частоти обертання двигунів і відповідно частоти обертання кривошипа для даних об'єктів є важливим і необхідним.

Перспективними для таких об'єктів є асинхронні електродвигуни (АД) з перетворювачами частоти [5], альтернативою яким створюють регульовані синхронні вентильні двигуни (СД) з електромагнітним збудженням або збудженням від постійних магнітів (СДПМ), а також вентильно-реактивні двигуни (ВРД) [2]. Останні в порівнянні з АД більш прості і надійні, мають вищий (на 2...5 %) коефіцієнт корисної дії (ККД) та меншу (в 1,5...2 рази) трудомісткість при виготовленні [3]. Вартість ВРД істотно нижча, ніж СДПМ [6]. Тому авторами [7] запропоновано для приводу свердловинних штангових насосів використовувати вентильно-реактивний привод, частота обертання якого змінюється системою керування в залежності від показів датчиків контролю за дебітом свердловини, що дозволить підвищити ККД двигуна і енергоефективність роботи верстат-гойдалки та електромеханічної системи у цілому.

Обґрунтування можливості використання ВРД у складі верстат-гойдалки можна зробити на основі

аналізу характеристик їх робочих режимів методами математичного моделювання. Слід відзначити невелику кількість наукових праць в даному напрямку [2].

**Метою статті** є розроблення імітаційної моделі вентильно-реактивного приводу з навантаженням характерним для верстат-гойдалки, дослідження режимів його роботи та оцінка можливості використання у складі верстат-гойдалки.

**Імітаційна модель приводу верстат-гойдалки з ВРД** розроблена у середовищі MATLAB – Simulink з використанням бібліотеки SymPowerSystems [8]. Модель (рис.1) представлена блоками джерела живлення (Three-Phase Source), трифазного випрямляча напруги (Universal Bridge), індукторної машини (SRM), несиметричного напівпровідникового перетворювача (Converter), датчиків положення ротора (Position Sensor), регулятора частоти обертання (Speed Control), регулятора фазного струму (Current Control), моменту навантаження верстат-гойдалки (Torque) та блоком для вимірювання струму, напруги і потужності, яка споживається (Multimeter).

Керування приводом з ВРД здійснюється системою керування, яка реалізує три канали регулювання: за струмом, напругою та кутами вмикання ( $\theta_{вм}$ ) та вимкнення ( $\theta_{вим}$ ) (підключення обмотки ВРД до джерела напруги та її відключення).

Датчик положення ротора визначає кут розташування ротора  $\theta$  по відношенню до початкового його значення. Блок контролю частоти розраховує та задає частоту обертання двигуна  $\omega_r$ , що визначає частоту обертання кривошипа  $n_{кр}$ . При цьому частота коливань верстат-гойдалки повинна бути у діапазоні від 5 до 15 гойдань за хвилину.

© Л. І. Мазуренко, О.В. Бібік, В.Г. Клименко, М. О. Шихненко, 2017

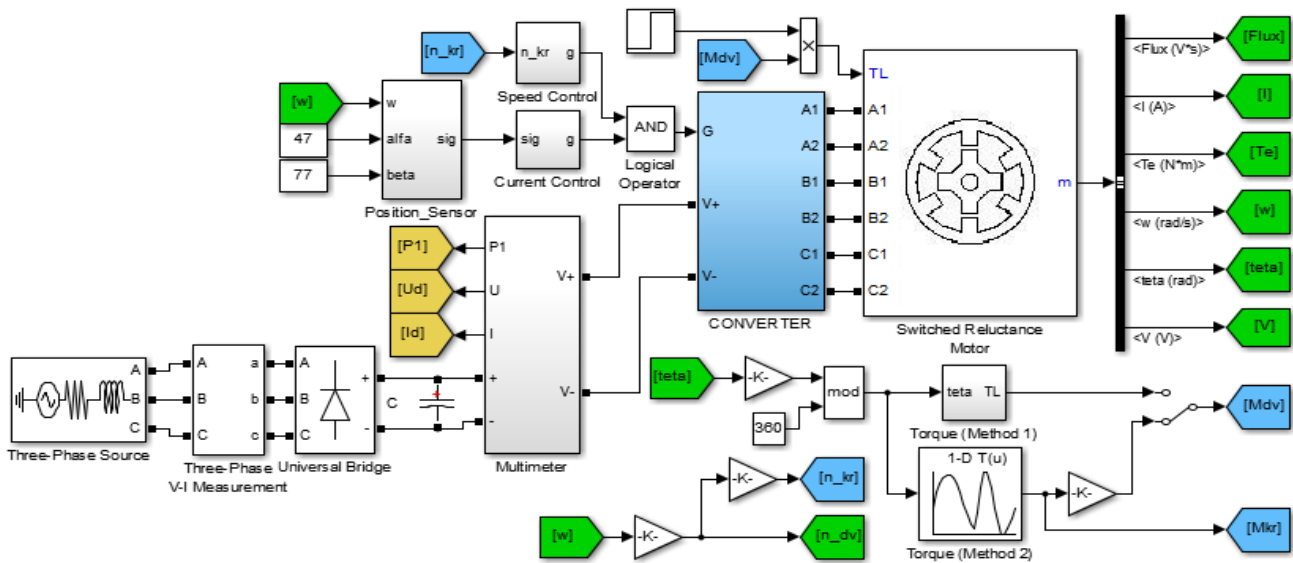


Рис. 1 – Імітаційна модель приводу верстат-гойдалки з ВРД

Блок моменту навантаження реалізує періодичну залежність моменту на кривошипі зрівноваженої верстат-гойдалки від кута його повороту, яку розраховано графо-аналітичним методом [4]. Залежності моменту навантаження верстат-гойдалки від кута повороту кривошипа  $\theta_{кр}$  (для номінального середнього значення цього моменту  $M_{крн}=18,4$  кН·м та його зменшених значень ( $M_{кр1}=0,8 M_{крн}$ ;  $M_{кр2}=0,7 M_{крн}$ ;  $M_{кр3}=0,45 M_{крн}$ ) показано на рис. 2.

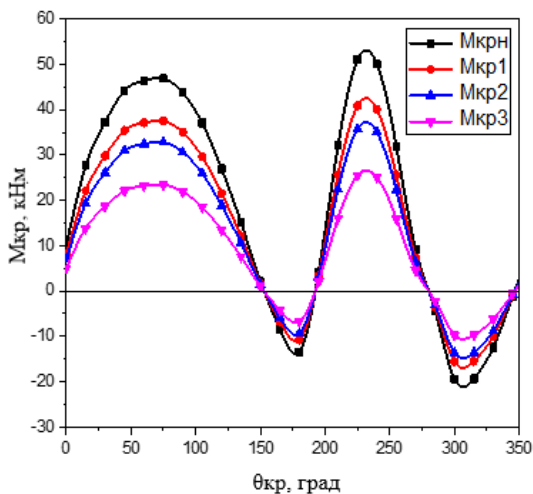


Рис. 2 – Залежності моментів навантаження верстат-гойдалки від кута повороту кривошипа

**Дослідження режимів роботи ВРД** конфігурації 6/4 потужністю 60 кВт за напруги живлення  $U = 380$  В проведено для верстат-гойдалки в якій  $M_{кр} = M_{крн} = 18,4$  кН·м, момент інерції приводу  $3000$  кгм/с<sup>2</sup>, передаточне число редуктора  $k_{ред}=200$ . Досліджено вплив кутів вмикання і вимкнення на частоту обертання двигуна і кривошипа та ККД. Результати досліджень за постійного кута комутації ( $\theta_{к}=\theta_{вим}-\theta_{вм}=30^\circ$ ) представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив кутів комутації ВРД на його частоту обертання та ККД

$\theta_{вм}$ , град	$\theta_{вим}$ , град	$\omega_{р}$ , рад/с	$n_{кр}$ , об/хв	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %
42	72	344	16,5	36,7	34	92,7
45	75	343	16,4	36,2	33,9	93,6
46	76	320	15,5	34,2	31,6	93,3
47	77	302	14,4	31,9	29,6	93,1
48	78	279	13,5	29,5	27,3	92,4
50	80	222	10,6	23,7	21,4	90,4
52	82	156	7,5	17,3	14,9	86,0

За результатами досліджень визначено кути комутації  $\theta_{вм} = 47^\circ$  і  $\theta_{вим} = 77^\circ$ , які забезпечують роботу двигуна з високим значенням ККД (93,1 %), і при цьому його частота обертання не перевищує допустиму верхню межу частоти кривошипа верстат-гойдалки – 15 об/хв. Для цих кутів комутації розраховано залежності частоти обертання (рис. 3) та ККД двигуна (рис. 4) від моменту навантаження.

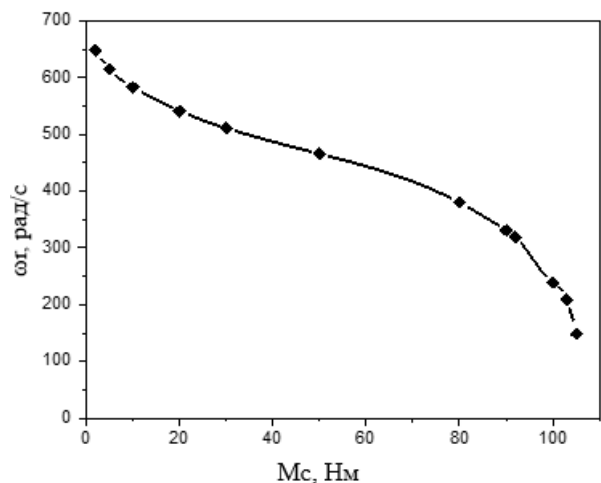


Рис. 3 – Залежність частоти обертання ВРД від моменту навантаження

Дані, що наведені у табл. 1, свідчать про можливість регулювання частоти обертання двигуна в діапазоні 150...300 рад/с. Регулювання частоти обертання ВРД в цьому діапазоні дозволяє отримати ККД двигуна 86...93 %.

Досліджено вплив моменту навантаження верстат-гойдалки на частоту обертання кривошипа ( $U = 400$  В,  $\theta_{\text{вм}} = 47^\circ$  і  $\theta_{\text{вим}} = 77^\circ$ ) та її стабілізацію при зміні напруги живлення (табл. 2).

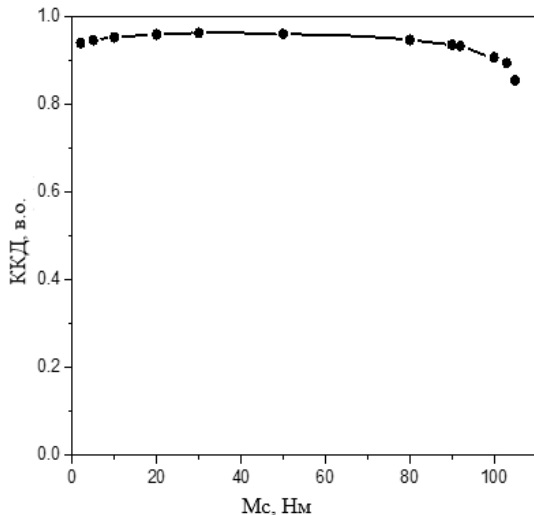


Рис. 4 – Залежність ККД ВРД від моменту навантаження

Таблиця 2 – Вплив моменту навантаження верстат-гойдалки на частоту обертання кривошипа та її стабілізація при  $U = \text{var}$

$M_{\text{кр}}$	$U = \text{const}$		$U = \text{var}$		Зниження напруги, %
	$U$ , В	$n_{\text{кр}}$ , об/хв	$U$ , В	$n_{\text{кр}}$ , об/хв	
$M_{\text{крн}}$	400	15,46	360	14	10
$M_{\text{кр1}}$	400	19,25	320	15,65	20
$M_{\text{кр2}}$	400	20,7	300	15,6	25
$M_{\text{кр3}}$	400	22,5	270	15,5	32,5

Результати розрахунків показали, що стабілізація частоти коливаний кривошипа на рівні 15 об/хв при зміні навантаження в діапазоні  $(1...0,45) M_{\text{крн}}$  досягається регулюванням напруги живлення у діапазоні 360...270 В.

#### Висновки.

Розроблено імітаційну модель приводу верстат-гойдалки з вентильно-реактивним двигуном, яка представлена блоками джерела живлення, трифазного випрямляча, індукторної машини, несиметричного напівпровідникового перетворювача, датчиків положення ротора, регулятора частоти обертання, регулятора фазного струму, блоком для вимірювання струму, напруги і потужності, яка споживається, та блоком завдання моменту навантаження, характерного для зрівноваженої верстат-гойдалки.

За результатами досліджень робочих режимів ВРД з періодичним навантаженням, характерним для

верстат-гойдалки, встановлено, що регулювання кутів комутації призводить до зміни потужності на валу, при цьому ККД електроприводу верстат-гойдалки варіюється в діапазоні 86...93 %.

Показана можливість стабілізації частоти обертання кривошипа на рівні 15 об/хв за зміни навантаження верстат-гойдалки  $(1...0,45) M_{\text{крн}}$  шляхом регулювання напруги живлення у діапазоні 360...270 В.

Підходи до регулювання частоти обертання ВРД шляхом зміни напруги живлення та кутів комутації забезпечують технологічні вимоги до верстат-гойдалок, що дозволяє рекомендувати вентильно-реактивний привод для використання у їх складі.

#### Список літератури

1. Бойко В. С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ / В. С. Бойко. – К.: Реал Прінт, 2004. – 695 с.
2. Егоров А. В. Альтернативное применение и моделирование вентильного электропривода в штанговых скважинных насосных установках / А. В. Егоров, А. С. Улюмджиев // Труды РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – 2012. – № 267, вип. 2. – С. 32-46.
3. Кузнецов В. А. Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с.
4. Лозинський О. Ю. Дослідження електроприводу штангової глибинонасосної установки / О. Ю. Лозинський, Б. С. Калужний, А. В. Малаяр // Технічна електродинаміка. – Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 4. – С. 69-72.
5. Малаяр А. В. Система автоматичного керування роботою штангової глибинопомпової установки з врахуванням дебіту пласта / А. В. Малаяр, Б. С. Калужний, А. С. Андрейшин // Наук. пр. Донецького націон. техн. ун-ту. Сер.: Електротехніка і енергетика. – 2011. – № 186, вип. 11. – С. 267-270.
6. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – М.: Академия, 2007. – 368 с.
7. Бібік О. В. Пат. 98824, Україна. Верстат-гойдалка з регульованим приводом / О. В. Бібік, С. В. Зайченко, В. Г. Клименко [та ін]. – 2015.
8. Черных И. В. Моделирование электромеханических устройств в Matlab, Simulink и Simulink / И. В. Черных – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

#### References (transliterated)

1. Bojko V. S. *Rozrobka ta ekspluatatsiya naftovy'x rodovy'shh* [Development and operation of oil fields]. Kiev, Real Print Publ., 2004, 695 p.
2. Egorov A. V., Ulyumdzhiyev A. S. *Alternativnoe primenenie i modelirovanie ventilnogo elektroprivoda v shtangovyih skvazhinnyih nasosnyih ustanovkakh* [Alternative application and simulation of a valve electric drive in rod borehole pumping units]. *Trudy RGU nefiti i gaza im. I. M. Gubkina* [Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas]. Moscow, 2012, no. 267, issue 2, pp. 32-46.
3. Kuznetsov V. A. *Ventilno-induktornyie dvigateli* [Switched reluctance motors]. Moscow, Izdatelstvo MEI Publ., 2003, 70 p.
4. Lozynskiy O. Yu. *Doslidzhennia elektroprivodu shtanhovoi hlybynonasosnoi ustanovky* [Research of electric drives of the gland pumping unit]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk: "Problemy suchasnoi elektrotekhniki" Chast 4* [Technical electrodynamicics. – "Topical issues of modern electrical output" Part 4]. Kiev, 2008, pp. 69-72.
5. Malyar A. V. *Systema avtomatichnoho keruvannia robotoiu shtanhovoi hlybynopomпової ustanovky z vrakhuvanniam debitu plasta* [The Automated Operation Control by Deep-Well Rod Pumping Unit with Account of Formation Flow Rate]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ser.: "Elektrotekhnika i enerhetyka"* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical engineering and power engineering"]. Donetsk, DonNTU Publ., 2011, pp. 267-270.

6. Moskalenko V. V. *Elektricheskiy privod* [Electric drive]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 368 p.
7. Bibik O. V. *Ukraina. Verstat-hoidalka z rehulovanim pryvodom* [Machine swing with adjustable driven]. Patent UA, no. 98824, 2015.
8. Chernyih I. V. *Modelirovanie elektromekhanicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electromechanical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., Saint Petersburg, Piter Publ., 2008, 288 p.

Надійшла (received) 27.04.2017

«Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions»

**Оцінка можливості використання вентиляно-реактивного двигуна у складі верстат-гойдалки / Л. І. Мазуренко, О. В. Бібік, В. Г. Клименко, М. О. Шихненко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 97–100. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

**Оценка возможности использования вентиляно-реактивных двигателей в составе станка-качалки / Л. И. Мазуренко, Е. В. Бибики, В. Г. Клименко, М. О. Шихненко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 97–100. – Библиогр.: 8 назв. - ISSN 2409-9295.

**Evaluation of the use of switched reluctance motors in the machine-rocking chair unit / L. I. Mazurenko, O. V. Bibik, V. H. Klymenko, M. O. Shihnenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electrical machines and electromechanical energy conversion". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 97–100. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2409-9295.

«Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors»

**Мазуренко Леонід Іванович**, доктор технічних наук, професор, завідувач відділом електромеханічних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України; тел.: (044) 366-24-91; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Мазуренко Леонид Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом электромеханических систем Института электродинамики Национальной академии наук Украины; тел.: (044) 366-24-91; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Mazurenko Leonid Ivanovych**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of Electromechanical Systems of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (044) 366-24-91; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Бібік Олена Василівна**, кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України; тел.: (044) 366-24-14; e-mail: [bibik@ied.org.ua](mailto:bibik@ied.org.ua).

**Бибики Елена Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела электромеханических систем Института электродинамики Национальной академии наук Украины; тел.: (044) 366-24-14; e-mail: [bibik@ied.org.ua](mailto:bibik@ied.org.ua).

**Bibik Elena Vasyilivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Senior Research Officer of Department of Electromechanical Systems of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (044) 366-24-14; e-mail: [bibik@ied.org.ua](mailto:bibik@ied.org.ua).

**Клименко Вікторія Григорівна**, науковий дослідник лабораторії роторної динаміки Корейського інституту науки і технологій; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Клименко Виктория Григорьевна**, научный исследователь лаборатории роторной динамики Корейского института науки и технологий; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Klymenko Viktoriia Hryhorivna**, scientific researcher of Laboratory of Rotor Dynamics of the Korea Institute of Science and Technology; tel.: (044) 366-25-72; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Шихненко Максим Олегович**, інженер відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Шихненко Максим Олегович**, инженер отдела электромеханических систем Института электродинамики Национальной академии наук Украины; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).

**Shihnenko Maksim Olegovich**, engineer of Department of Electromechanical Systems of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (044) 366-25-72; e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua).