

Л.І. МАЗУРЕНКО, М.О. ШИХНЕНКО, О.В. ДЖУРА, О.А. БЛИК

ПРОЦЕСИ ЗБУДЖЕННЯ ВІД АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Проведено дослідження процесів збудження вентильно-індукторного генератора (ВИГ) від акумуляторної батареї за зміни параметрів. З'ясовано вплив ємності конденсатора, опору обмоток фази та кутів комутації на зовнішні характеристики ВИГ. За результатами досліджень запропоновано заходи щодо зменшення ємності акумуляторної батареї та зниження тривалості процесу збудження із збереженням надійності цього процесу.

Ключові слова: електромеханічне перетворення енергії, вентильно-індукторний генератор, вентильний перетворювач, акумуляторна батарея, математична модель, перехідний процес.

Проведено исследование процессов возбуждения вентильно-индукторного генератора (ВИГ) от аккумуляторной батареи при изменении параметров. Выяснено влияние емкости конденсатора, сопротивления обмоток фазы и углов коммутации на внешние характеристики ВИГ. По результатам исследований предложены меры по уменьшению емкости аккумуляторной батареи и снижению продолжительности процесса возбуждения с сохранением надежности этого процесса.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, вентильно-индукторный генератор, вентильный преобразователь, аккумуляторная батарея, математическая модель, переходный процесс.

Investigation of excitation processes of the switched-reluctance generator (SRG) from the battery with parameters change was performed. Influence of the capacitor capacitance, the phase windings resistance and the switching angles on the SRG external characteristics has been defined. According to the research results, measures were proposed to reduce the battery capacity and to lower the excitation process duration while maintaining the reliability of this process.

Keywords: electromechanical energy conversion, switched reluctance generator, semiconductor converter, battery, mathematical model, transient process.

Вступ. Вентильно-індукторний генератор (ВИГ) представляє собою поєднання електричної машини з напівпровідниковим перетворювачем, який комутує обмотки машини у відповідності з переміщенням ротора (рис. 1). Індукторна машина (ІМ) не є самостійним електромеханічним перетворювачем енергії. З'єднання її з навантаженням (в режимі генератора) забезпечує вентильний перетворювач (ВП). Електромеханічне перетворення енергії ВИГ здійснюється за сигналами системи керування (СК). Енергію для підтримання самозбудження ВИГ отримує в результаті обмінних процесів між обмотками ІМ та конденсатором в колі постійного струму за допомогою ВП.

Метою статті є дослідження процесів збудження вентильно-індукторного генератора від акумуляторної

батареї та впливу параметрів на його робочі характеристики.

Дослідження процесів збудження ВИГ від акумуляторної батареї. На разі відомо мало робіт присвячених дослідженню процесів ВИГ [1, 2].

Особливий інтерес представляють дослідження особливостей протікання перехідних процесів збудження генератора. Перехідні процеси, навіть за нормальних умов роботи, супроводжуються змінами струмів та/або напруг в обмотках, напівпровідникових елементах ВП та навантаженні. Ці процеси можуть стати причиною виходу з ладу напівпровідникових елементів ВП. Крім того, задля забезпечення відповідності електроенергії стандартам якості, зміни напруги на навантаженні не повинні перевищувати встановлених граничних значень.

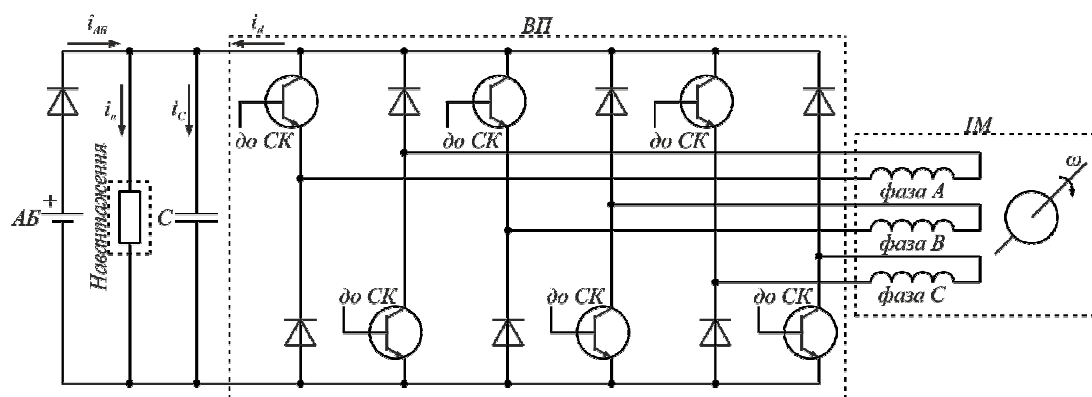


Рис. 1 – Схема вентильно-індукторного генератора

Для запуску ВИГ необхідний початковий запас електричної енергії, який забезпечить зростання його

ЕРС до значення достатнього для покриття втрат (в машині та ВП) та заряду конденсатора в колі

постійного струму до рівня напруги достатнього для його збудження. Для створення надійного початкового збудження генераторів використовують короткочасне підключення джерела напруги невеликої потужності (наприклад, акумуляторної батареї (АБ) напругою 12...24 В) до кола постійного струму ВП.

Збудження ВІГ від АБ здійснюється наступним чином: генератор розганяється приводним двигуном до номінальної частоти обертання, потім до нього через вентиляний перетворювач підключається АБ і він отримує енергію для початкового збудження. Одночасно з підключенням джерела напруги заряджається і конденсатор кола постійного струму. Акумуляторна батарея забезпечує збудження генератора лише в короткий проміжок часу, поки не зарядиться конденсатор.

Після збудження акумуляторна батарея або залишається підключеною до кола постійного струму, або відключається, якщо номінальне значення напруги генератора не дозволяє реалізувати їх паралельну роботу. В останньому випадку, як тільки рівень напруги генератора перевищить напругу АБ, остання відключається за допомогою діода. Машина виходить на режим стабільної роботи.

Дослідження перехідних процесів ВІГ з АБ проведено за допомогою математичної моделі (1), запропонованої в [4, 6], для генератора з наступними номінальними даними: $P_{\text{ном}}=1$ кВт, $U_{\text{ном}}=460$ В, $n_{\text{ном}}=3000$ об/хв. Геометрична конфігурація ІМ для розрахунків визначалась по [3], модель комутатора виконана за схемою несиметричного напівмосту (рис. 1) [5]. Дослідження проведено за постійної частоти обертання, машина повністю розмагнічена, стабілізація напруги виконується шляхом зміни середнього значення фазного струму (впливаючи на максимальне значення струму, що проходить через транзистори) при фіксованих кутах комутації, параметри СК незмінні.

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{\phi}}{dt} = U_{\phi} - i_{\phi} \cdot R_{\phi}; \\ i_{\phi} = \frac{\psi_{\phi}}{L_{\phi}}; \\ M_{\phi} = i_{\phi} \cdot \frac{d\psi_{\phi}}{dt} \cdot \frac{1}{\omega} = i_{\phi} \cdot \frac{d\psi_{\phi}}{d\theta_{\phi}}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_z); \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega. \end{cases} \quad (1)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга;
 R_{ϕ} – опір фази статора;
 i_{ϕ} – струм фази статора;
 ψ_{ϕ} – потокозчеплення фази статора;
 L_{ϕ} – індуктивність фази статора;
 M_{ϕ} – електромагнітний момент, що утворено однією фазою;

M_r – сумарний електромагнітний момент генератора;

M – момент обертання первинного двигуна;

J – момент інерції агрегату;

ω – частота обертання ротора;

θ – кут повороту ротора.

Дослідження перехідного процесу збудження ВІГ від АБ проводиться за холостого ходу. Процес збудження (рис. 2) протікає плавно (характер зміни напруги на навантаженні і середнього значення фазного струму відповідає перехідній функції аперіодичної ланки другого порядку).

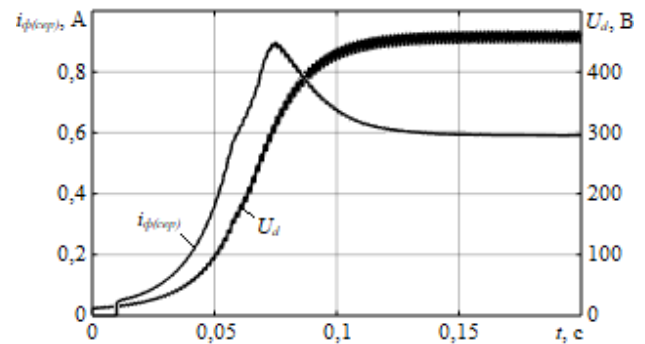


Рис. 2 – Осцилограма перехідного процесу збудження ВІГ від АБ ($U_{\text{АБ}}=12$ В, $R_{\text{АБ}}=0,03$ Ом)

Система керування забезпечує незмінний рівень обмеження максимального значення фазного струму (струм через транзистори). Стрибок фазного струму через діоди (рис. 3) в інтервалі 0,06...0,12 с, який при цьому спостерігається, знаходиться в межах допустимого. Подібні зміни струму безпечні для напівпровідникових елементів ВП, оскільки амплітуди стрибків фазного струму при збудженні генератора без навантаження значно нижчі за амплітуди фазного струму навантаженого генератора.

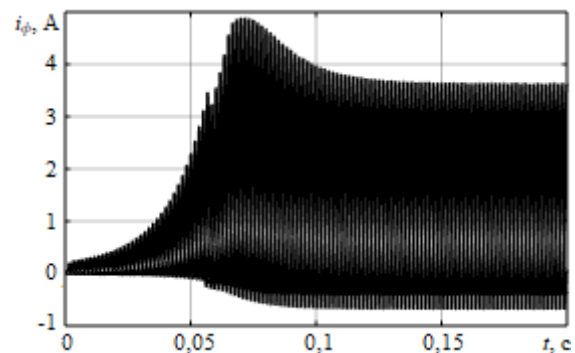


Рис. 3 – Осцилограма миттєвого значення фазного струму при збудженні ВІГ від АБ ($U_{\text{АБ}}=12$ В, $R_{\text{АБ}}=0,03$ Ом)

Процес збудження сповільнений на ранній стадії поки напруга росте до певного рівня (50...100 В), при досягненні якого процес набуває прискорення. На час перехідного процесу впливає величина напруги акумуляторної батареї $U_{\text{АБ}}$, її зміна від 5 В до 100 В зменшує час збудження ВІГ в два рази (рис. 4).

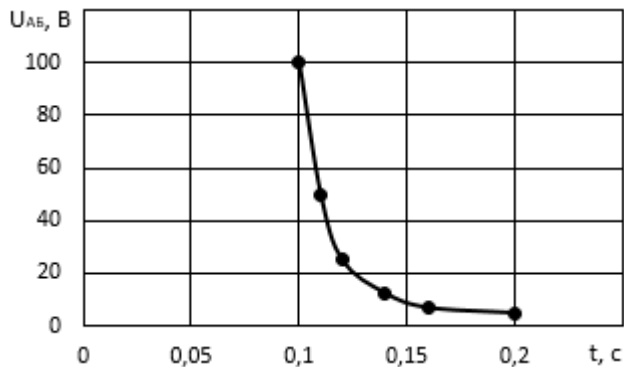


Рис. 4 – Залежність тривалості процесу збудження t від величини напруги акумуляторної батареї U_{AB}

Для визначення безпечних режимів роботи системи збудження та областей надійного збудження проведено дослідження процесів збудження ВІГ АБ при зміні її внутрішнього опору, ємності конденсатора, опору обмоток фази та кутів комутації.

Перевантаження по струму недоцільне для акумуляторної батареї. Внутрішній опір АБ майже не впливає на час перехідного процесу та на характер зміни вихідної напруги ВІГ. При його зміні в діапазоні $0,02 \dots 1 \text{ Ом}$ ($U_{AB}=12 \text{ В}$) стрибок струму акумуляторної батареї (рис. 5) в момент підключення знижується від 570 до 12 А (характер залежності I_{AB} від R_{AB} відповідає гіперболічній степеневій функції). Як видно з рис. 3, фазні струми при цьому низькі (на $4 \dots 2$ порядки нижчі за струми АБ), навантаження відсутнє (збудження генератора відбувається на холостому ході), тобто майже весь струм АБ споживається конденсатором. Збільшення внутрішнього опору АБ знижує перехідні струми заряду конденсатора.

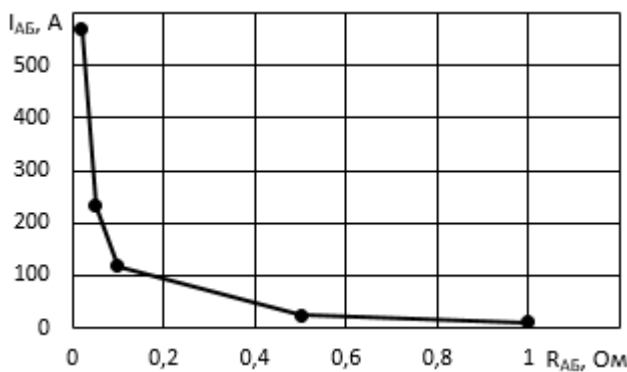


Рис. 5 – Залежність струму акумуляторної батареї I_{AB} від її опору R_{AB}

Оскільки енергія акумуляторної батареї споживається лише для заряду конденсатора, то для початкового збудження доцільно використовувати АБ малої потужності.

Конденсатор в колі постійного струму створює умови для забезпечення машини реактивною потужністю необхідною для підтримання збудження при відсутності зовнішніх джерел енергії. Зменшення ємності знижує тривалість перехідного процесу збуд-

ження. При зміні ємності від $0,1$ до $10 C_{ном}$ ($C_{ном}=100 \text{ мкФ}$) час збудження зростає від $0,02$ до $1,7 \text{ с}$ (залежність лінійна).

Варто зазначити, що зміна ємності конденсатора також позначається на жорсткості зовнішніх характеристик (рис. 6): при значеннях ємності $0,1 \dots 0,5 C_{ном}$ вони висхідні, а при ємностях більше $C_{ном}$ – дещо пологі).

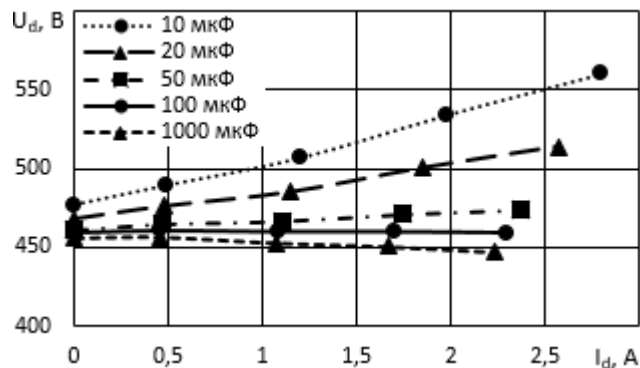


Рис. 6 – Вплив ємності конденсатора на зовнішні характеристики ВІГ

Причиною підвищення вихідної напруги (змінюється в діапазоні $477 \dots 456 \text{ В}$ для холостого ходу) являється розширення області електромеханічного перетворення енергії при зменшенні ємності конденсатора. Одночасно з цим зменшення ємності призводить до зростання пульсацій вихідної напруги.

Зміна зовнішніх характеристик в цьому випадку не являється суттєвим недоліком, так як успішно усувається за допомогою СК шляхом зміни регульовальної характеристики. Також за необхідності прискорення процесу збудження можливо реалізувати схему зі ступінчасто комутуваними конденсаторами.

При дослідженні впливу опору обмотки фази ВІГ на процес збудження встановлено, що його зміна майже не впливає на тривалість перехідного процесу. Збільшення опору фази в діапазоні $(0,1 \dots 10) r_{ф(ном)}$ призводить до зменшення ЕРС генератора, і, як наслідок, до зниження напруги холостого ходу до рівня близько 95% від номінального значення (залежність лінійна).

Збільшення опору обмотки призводить до зростання втрат в міді, що стає причиною зміни вигляду зовнішніх характеристик ВІГ (вони стають більш пологими), максимальна потужність генератора при цьому знижується.

Дослідження впливу кутів комутації на процес збудження проводились при збереженні ширини зони комутації ($\theta_k=30^\circ$). При зсуві зони комутації відносно кута вмикання від 76 до 90 градусів час перехідного процесу збудження зменшується від $0,36$ до $0,16 \text{ с}$. Для кутів менших номінальних ($\theta_{вм}=85^\circ$, $\theta_{вм}=115^\circ$) зовнішні характеристики (рис. 7) висхідні, потужність генератора при кутах $76 \dots 79^\circ$ значно знижується. Для кутів більших номінальних зовнішні характеристики спадні, потужність генератора знижується. В обох

випадках значення напруг холостого ходу майже незмінні ($\pm 1,5\%$).

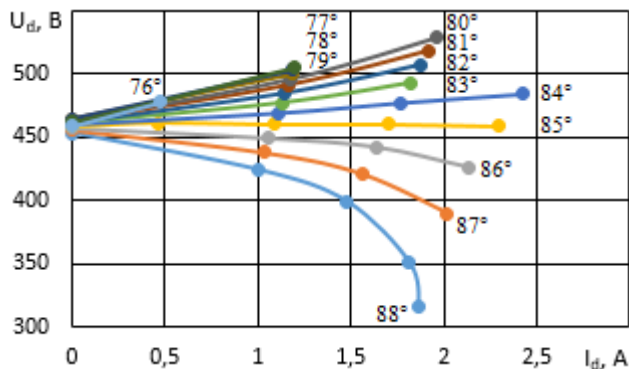


Рис. 7 – Вплив кутів комутації на зовнішні характеристики ВІГ

Також варто зазначити що значне зменшення кутів комутації призводить до збільшення магнітного потоку через що генерована ЕРС зростає. Одночасно з цим зростають втрати генератора, що спричинює ріст порогового значення напруг для початкового збудження (для кутів діапазону $78^\circ \dots 75^\circ$ напруга АБ достатня для збудження машини зростає від 13 до 19 В).

Висновки. За низьких значень ЕРС залишкового потоку, для забезпечення надійного збудження ВІГ, варто реалізувати систему збудження з підключенням акумуляторної батареї малої потужності.

Зменшення ємності АБ та відповідно її габаритів одночасно зі збереженням надійності збудження ВІГ можливо досягти використовуючи АБ зі збільшеним внутрішнім опором. В цьому випадку струми батареї будуть меншими, що значно полегшить її роботу та подовжить термін придатності.

Зниження часу перехідного процесу збудження можливо досягти при використанні конденсатора меншої ємності, однак при цьому зростають пульсації вихідної напруги та струму ВІГ. Кути комутації та фазний опір генератора практично не впливають на тривалість процесу збудження ВІГ.

Варто відзначити, що зміна будь-яких параметрів ВІГ в тій чи іншій мірі впливає на його зовнішні характеристики. Однак їх вплив може бути компенсований за допомогою системи керування.

Список літератури

1. Miller T. J. E., Electronic Control of Switched Reluctance Machines / T. J. E. Miller. – UK, Oxford : Newnes Publ., 2001. – 272 p.
2. Asadi P. Development and Application of an Advanced Switched Reluctance Generator Drive :Dr. eng. sci. diss. / Peyman Asadi. – Tehran, 2006. – 133 p.
3. Фисенко В. Г., Попов А. Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие / В. Г. Фисенко, А. Н. Попов. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 56 с.
4. Мазуренко Л. І., Бібік О. В. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С-скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації / Л. І. Мазуренко, О. В. Бібік, Білик О. А., М. О. Шихненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 64-69.
5. Мазуренко Л. І., Бібік О. В. Оцінка можливості використання вентильно-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». – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 97-100.
6. Shykhnenko M. O., Mazurenko L. I. Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods, 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – X. : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 338-342.

References (transliterated)

1. Miller T. J. E., Electronic Control of Switched Reluctance Machines / T. J. E. Miller. – UK, Oxford : Newnes Publ., 2001, 272 p.
2. Asadi P. Development and Application of an Advanced Switched Reluctance Generator Drive :Dr. eng. sci. diss. Tehran, 2006. 133 p.
3. Fisenko V., Popov A., *Proektirovanie ventilnykh induktornykh dvigatelej: metodicheskoe posobie* [Designing of switched reluctance motors: methodical manual]. Moscow, Izdatelstvo MEI Publ., 2005, 56 p.
4. Mazurenko L. I., Bibik O. V., Bilyk O. A., Shihnenko M. O. Modelyuvannya rezhimiv ta regulyuvannya chastoty obertannya ventilno-induktornogo dviguna z peretvoryuvachem iz S-skidanniam i kolivanim povernenniam energiyi pri zmini kutiv komutatsiyi [Simulation mode and speed control of switched reluctance motor using a converter with the C-dump and the oscillation return of energy at changing switching angles]. *Visnik NTU «HPI». Seriya: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennia energiyi*. 2016, no. 11 (1183), pp. 64-69.
5. Mazurenko L. I., Bibik O. V., Bilyk O. A., Shihnenko M. O. Ocinka mozhlyvosti vikoristannya ventilno-reaktivnogo dviguna u skladi verstat-gojdalki [Evaluation of the use of switched reluctance motors in the machine-rocking chair unit]. *Visnik NTU «HPI». Seriya: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennia energiyi*. 2017, no. 1 (1223), pp. 97-100.
6. Shykhnenko M. O., Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Bilyk O. A. Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods. [2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, pp. 338-342.

Nadiiuvna (received) 26.03.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Процеси збудження від акумуляторної батареї та вплив параметрів на робочі характеристики вентильно-індукторного генератора / Л. І. Мазуренко, М. О. Шихненко, О. В. Джура, О. А. Білик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 116–120. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Процессы возбуждения от аккумуляторной батареи и влияние параметров на рабочие характеристики вентильно-индукторного генератора / Л. И. Мазуренко, М. О. Шихненко, А. В. Джура, А. А. Билык // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 116–120. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

The excitation processes from the battery and the influence of parameters on the switched reluctance generator performances / L. I. Mazurenko, M. O. Shykhnenko, O. V. Dzhyra, O. A. Bilyk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electrical machines and electromechanical energy conversion». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2019. – No. 4 (1329). – P. 116–120. – Bibliogr.: 6. – 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.

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.

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.

Шихненко Максим Олегович – молодший науковий співробітник відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: smo1993@ied.org.ua.

Шихненко Максим Олегович – младший научный сотрудник отдела электромеханических систем Института электродинамики Национальной академии наук Украины; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: smo1993@ied.org.ua.

Shykhnenko Maksym Olehovych – Research Assistant 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: smo1993@ied.org.ua.

Джюра Олександр Васильович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: mlins@ied.org.ua.

Джюра Александр Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела электромеханических систем Института электродинамики Национальной академии наук Украины; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: mlins@ied.org.ua.

Dzhura Oleksandr Vasylovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Officer 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.

Білик Олександр Анатолійович – провідний інженер відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: mlins@ied.org.ua.

Бильк Александр Анатольевич – ведущий инженер отдела электромеханических систем Института электродинамики Национальной академии наук Украины; тел.: (044) 366-25-72; e-mail: mlins@ied.org.ua.

Bilyk Oleksandr Anatoliiovych – Leading 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