

**ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ЗА
ЗМІННОЇ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ**

Л. І. Мазуренко, доктор технічних наук, професор

О. В. Джура, кандидат технічних наук

М. О. Шихненко, кандидат технічних наук

О. А. Білик

Інститут електродинаміки НАН України

В. Г. Городецький, кандидат фізико-математичних наук

НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»,

E-mail: 3662491@gmail.com

Анотація. Розглянуто експериментальний стенд автономної системи електроживлення, який базується на машині постійного струму, що імітує первинний двигун змінної частоти обертання, і вентильно-індукторний генератор. Представлено узагальнену і повну структурні схеми експериментального стенда. Описано принцип роботи окремих структурних елементів стенду. Розглянуто процес самозбудження генератора від залишкового потоку і наведено осцилограму цього процесу, що ілюструє характер зміни вихідної напруги постійного струму. З використанням осцилограми фазного струму генератора розглянуто рух енергії в системі електрична машина – вентильний перетворювач. Досліджено робочі характеристики вентильно-індукторного генератора. Дані експериментальних досліджень підтверджують можливість стенду використовуватись в якості автономної системи електроживлення за змінної частоти обертання.

Ключові слова: *двигун постійного струму, вентильно-індукторний генератор, генерована потужність*

Актуальність. Достатньо часто первинні двигуни електричних генераторів працюють зі змінною частотою обертання. З метою зниження вартості, спрощення реалізації та умов щодо проведення експериментальних досліджень доцільним є заміна реальних первинних двигунів системи електропостачання їх фізичними моделями, які володіють необхідними характеристиками. Так, замість вітрової

турбіни доцільним є застосування приводного двигуна, система керування якого відтворює поведінку реальної вітротурбіни (ВТ). Для відтворення реальної поведінки вітрової системи перетворення енергії, чи іншої системи, експериментальний стенд будують на базі двох електричних машин: одна електрична машина імітує (емулятор) приводний двигун, а інша працює як електричний генератор. В якості емулятора використовують різні типи електричних машин, в тому числі синхронні двигуни з постійними магнітами, реактивні двигуни з перемиканням обмоток. Однак, найчастіше використовуються двигуни постійного струму і асинхронні машини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Емулятор, що використовує двигун постійного струму з незалежним збудженням у поєднанні з асинхронним генератором подвійного живлення, підключеним до мережі, описано в роботі [1]. У роботі [2] представлено метод керування емулятором вітрової турбіни на основі двигуна постійного струму. Асинхронний двигун з інвертором в якості стимулятора вітрової турбіни описано в [3].

Емулятори мають також і інше призначення. З розвитком технологій електричних літаків виникає необхідність проектування та експериментального дослідження авіаційних генераторів зі змінною частотою, що потребує розробки емуляторів їх первинних двигунів [4]. У статті [5] описано конструкцію випробувального стенду на базі двигуна постійного струму, який емулює реальне механічне навантаження для проведення випробувань частотно-регульованого приводу.

Принципи створення емуляторів первинних двигунів електричних генераторів відрізняються в залежності від типу останніх (конструктивних особливостей). Крім синхронних і асинхронних генераторів в системах електроживлення (СЕ), перспективно використання вентильно-індукторних генераторів (ВІГ) за змінної частоти обертання первинного двигуна[6]. Водночас питання створення експериментального стенду автономної СЕ з ВІГ за змінної частоти обертання, наприклад від вітрової турбіни, у технічній літературі не розглянуто.

Мета дослідження – ілюстрація одного із можливих технічних рішень, яке використане при розробці і створенні експериментального стенду автономної СЕ на основі ВІГ за змінної частоти обертання, та результатів його дослідження.

Матеріали і методи дослідження. Технічна реалізація експериментального стенду автономної системи електроживлення на основі ВІГ здійснена з використанням положень теорії електричних машин, електропривода, основ перетворювальної техніки та вітроенергетики в частині механічних характеристик вітроустановок. При експериментальних дослідженнях отримали за допомогою осцилографа сигнали датчика положення ротора, вихідну напругу в процесі самозбудження ВІГ та його фазний струм. Результати дослідження робочих характеристик (струм, напруга, потужність) отримані з використанням амперметрів, вольтметрів і ватметрів.

Результати досліджень та їх обговорення. Узагальнена схема експериментального стенду показана на рис. 1. Стенд складається з приводного двигуна постійного струму М СМЛ-661М, який має номінальну потужність 230 Вт, напругу 110 В, струм якоря $I_{я}$ 2.9 А, ККД 72 % і частоту обертання 2400 об/хв., з'єднаний валом з ВІГ (номінальна потужність 200 Вт, напруга 300 В, частота обертання 2400 об/хв., струм фази 0,75 А). Робота ВІГ забезпечується керуванням вентилювальним перетворювачем ВП (рис.1).

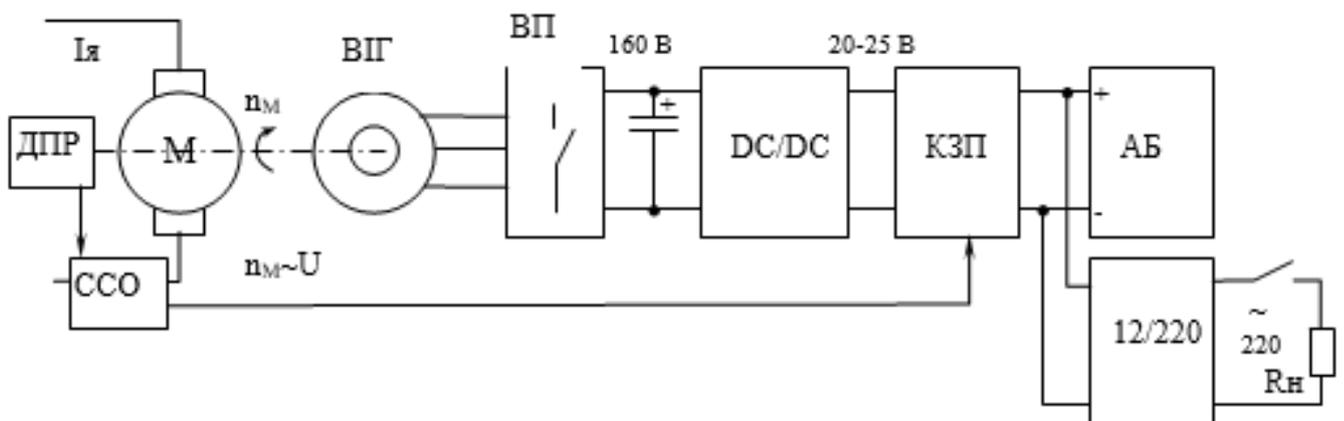


Рис. 1. Узагальнена схема експериментального стенду

Алгоритм роботи ВП задається мікроконтролерною системою керування МКСК на базі контролера АТМЕГА-328Р (рис.2). Вихід ВП навантажений на

електролітичний накопичувальний конденсатор С, до якого підключено знижувальний перетворювач постійної напруги DC/DC. Цей перетворювач необхідний для узгодження рівнів напруги генерації ВІГ та напруги заряджання акумуляторної батареї зарядним пристроєм.

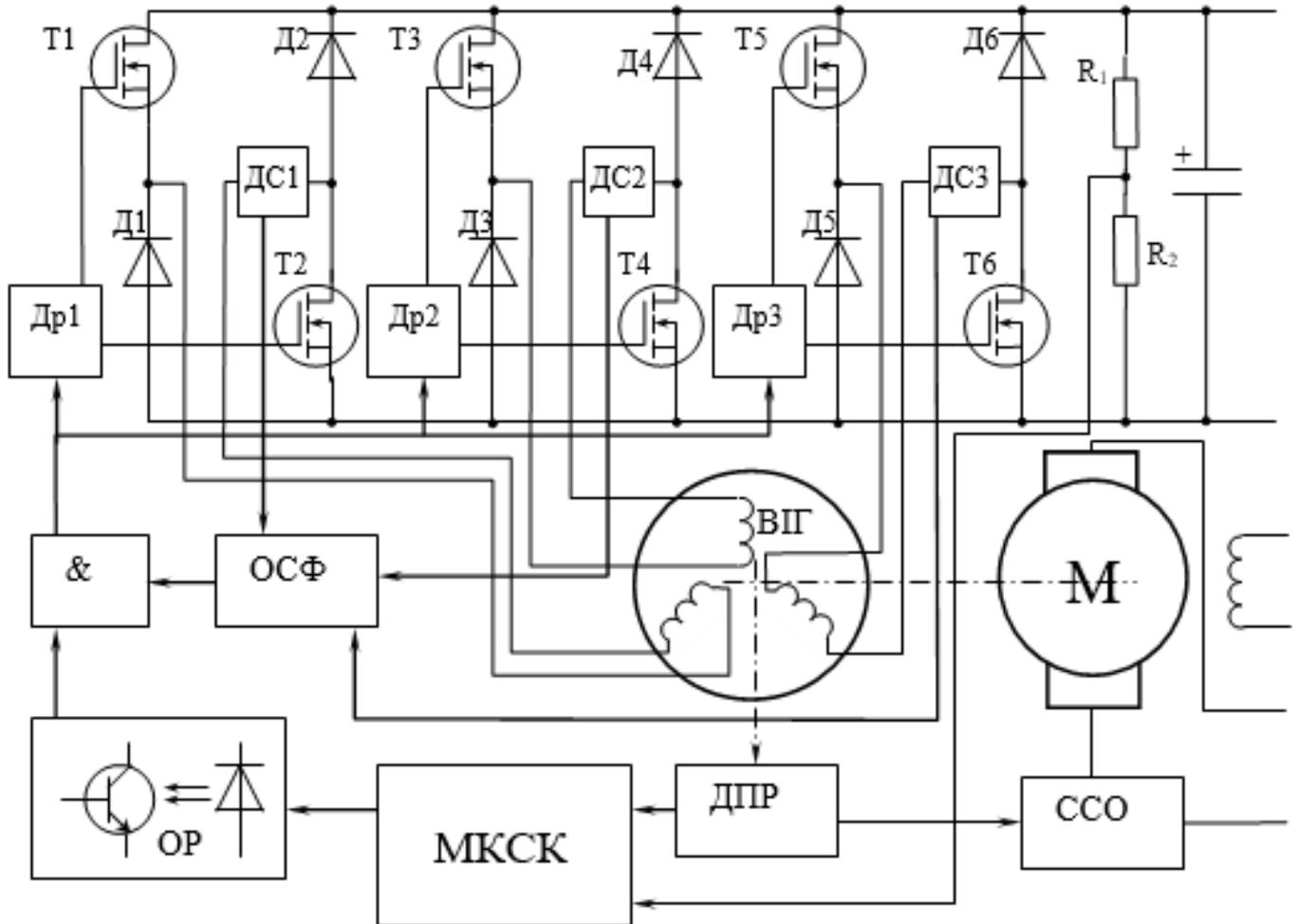


Рис. 2. Деталізована блок-схема експериментального стенду

Знижувальний перетворювач у свою чергу під'єднаний до керованого зарядного пристрою КЗП, вихідний струм якого ставиться в певну відповідність до числа обертів приводного двигуна за допомогою сигналу (напруги), пропорційного числу його обертів, який береться зі схеми стабілізації кількості обертів ССО.

Відповідність вихідного струму числу обертів приводного двигуна визначається законом, при якому від двигуна відбирається максимальна потужність. КЗП навантажений акумуляторною батареєю АБ, необхідність якої диктується необхідністю відбору максимальної потужності, яку навантаження R_n може не

забезпечити. Паралельно АБ під'єднаний перетворювач постійної напруги 12 В у змінну 220 В, яка живить навантаження R_n . Схема ССО забезпечує керування струмом якоря та стабілізацію обертів машини постійного струму, необхідність якої диктується алгоритмом роботи ВІГ, а саме: збудження ВІГ, а отже і створення генераторного моменту, починається з певного числа обертів приводного двигуна М і схема ССО не допускає коливань числа обертів. Сама схема ССО для своєї роботи використовує пилкоподібний сигнал датчика положення ротора ДПР, який розташований на торцевій частині валу ВІГ і використовує для свого функціонування ефект Хола. На торці валу розташований магніт, орієнтацію поля якого перетворює на напругу відповідний напівпровідниковий датчик, як показано на рис. 3.

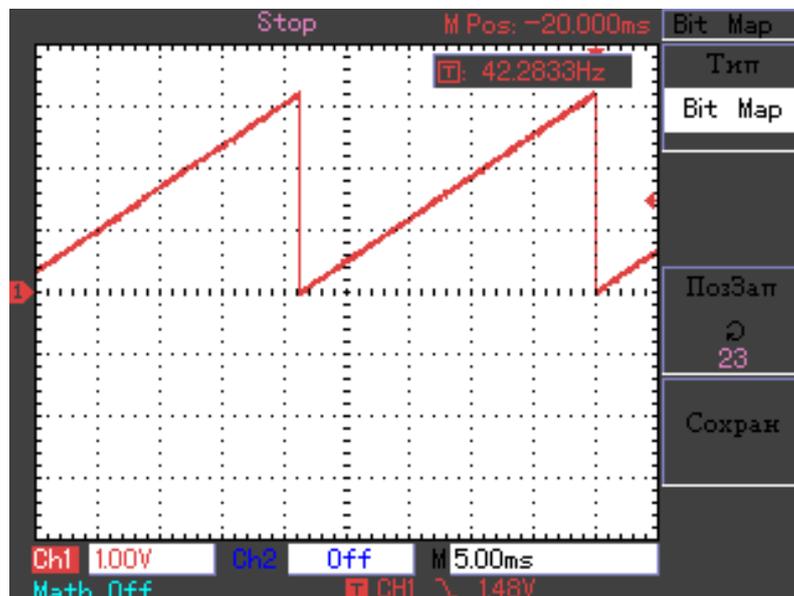


Рис. 3. Пилкоподібний сигнал датчика положення ротора

Розглянемо більш детально роботу системи. Мікроконтролерна система керування МКСК використовує для забезпечення комутації фаз ВІГ два сигнали: пилкоподібний сигнал ДПР, миттєва напруга якого відповідає миттєвому просторовому положенню ротора, та сигнал дільника вихідної напруги R_1/R_2 . МКСК, використовуючи пилкоподібний сигнал ДПР вираховує моменти включення та вимкнення кожної фази, які визначаються відповідністю положення зубця ротора до зубця статора для забезпечення генераторного режиму. Сигнали комутації фаз

через оптичну розв'язку ОР та через елемент І-НІ & передаються на драйвери керування верхнім та нижнім ключами комутації фаз. Вимірюючи напругу з дільника R_1/R_2 , МКСК забезпечує стабілізацію вихідної напруги шляхом широтно-імпульсній модуляції.

Оптична розв'язка світлодіод – оптотранзистор необхідна для забезпечення стійкості роботи портів мікроконтролера, що формують сигнали комутації фаз. Як показали дослідження, без цього елемента спостерігаються постійні збої та «зависання» вказаних портів, що призводить до непрацездатності системи в цілому. На інший вхід елемента & подається сигнал обмежувача струму фази ОСФ. При збільшенні частоти обертання приводного двигуна зростає струм фази ВІГ і, відповідно, момент. При деякому моменті генератора приводний двигун не може забезпечити відповідний крутний момент, що призводить до гальмування його ротора. З подальшою комутацією фаз ВІГ цей процес наростає лавиноподібно і призводить до майже повної зупинки ротора М і до критичного перевищення струму якоря.

Блок обмеження струму фази функціонує так(рис.4).

Сигнал датчиків струму DC1-DC3 надходить на неінвертуючий вхід підсилювача сигналу, на інвертуючий вхід якого подається напруга дільника, яка задає рівень обмеження. Підсилена різниця цих напруг подається на гістерезисний елемент, що працює за принципом тригера Шмідта, зібраний на елементах R_7-R_9 та DD2-DD5. Коли напруга УДС, а отже і струм фази, нижчі певного значення, напруга дільника R_8-R_9 – нижча від порогового значення входу елемента &-НІ, то на виході елемента DD4 формується логічна одиниця, яка дозволяє проходження сигналу від МКСК до драйверу керування ключами фази. Як тільки струм фази досягає певного значення, ця напруга стає вищою за напругу дільника, а їхня підсилена різниця, від дільника R_7-R_8 перевищує порогове значення входу елемента &-НІ, на виході елемента DD4 формується логічний нуль, який забороняє проходження сигналу від МКСК до драйверу керування ключами фази, що призводить до вимкнення фази та спаданню її струму. На виході DD5 формується логічна одиниця, яка забезпечує

напругу входу елементу DD2 дещо вищою, і зворотнє перекидання схеми у попередній "відкритий" стан відбувається вже за нижчого значення струму фази.

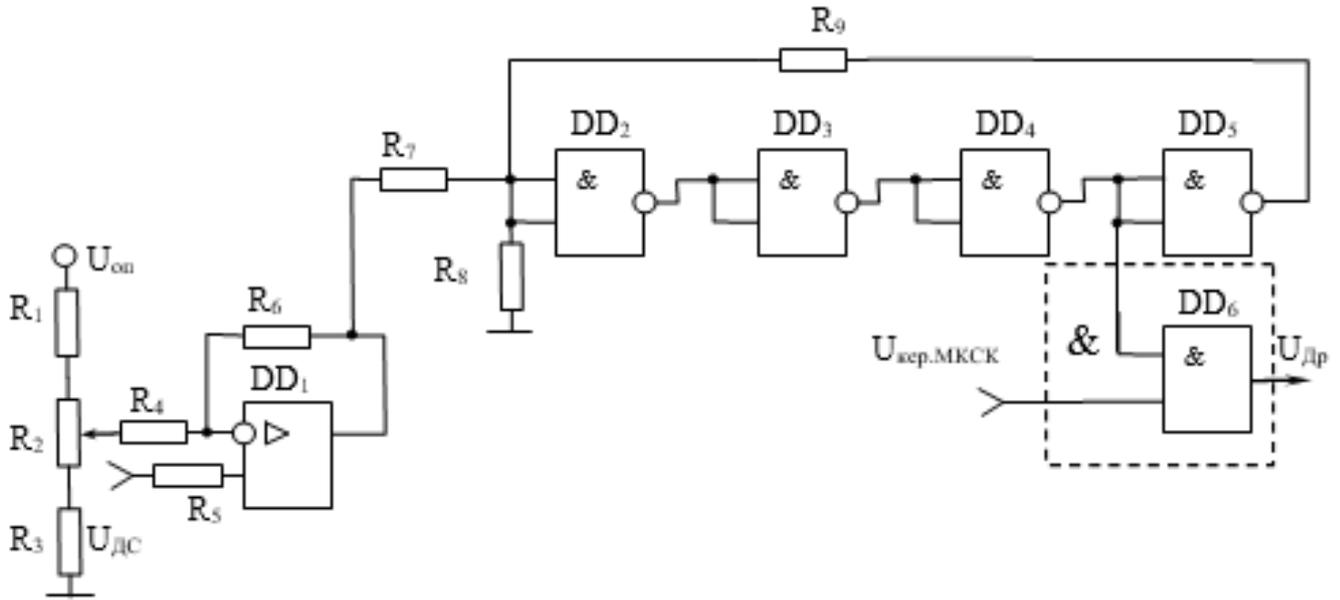


Рис. 4. Схема обмеження струму фази

Схема регулювання частоти обертання двигуна постійного струму зображена на рис. 5.

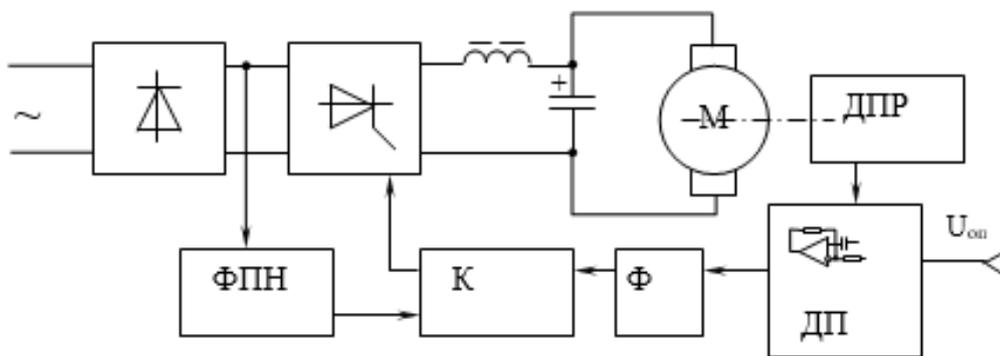


Рис. 5. Схема регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

Змінна напруга джерела живлення випрямляється мостовим випрямлячем та надходить на тиристорний регулятор, який забезпечує її регулювання. Далі ця напруга згладжується вихідним індуктивно-ємнісним фільтром і надходить на якірну обмотку машини постійного струму. Як зазначалось, датчик положення ротора ДПР формує пілкоподібний сигнал, який відповідає миттєвому просторовому положенню ротора. Цей сигнал можна використовувати для

перетворення в напругу, пропорційну швидкості обертання ротора. Диференціювання пилкоподібної напруги дає постійну напругу, рівень якої напряму залежить від швидкості наростання пилкоподібного сигналу ДПР, яка в свою чергу залежить від частоти обертання ротора. Пилкоподібна напруга ДПР подається на диференціюючий підсилювач ДП, і далі вже постійна напруга, відфільтрована через фільтр Ф від зворотного імпульсу, надходить на компаратор К, на інший вхід якого подається інша пилкоподібна напруга, тривалість періоду якої визначається тривалістю періоду випрямленої синусоїди напруги живлення. У результаті компаратор К виробляє фазно-модульований сигнал керування тиристорного регулятора. При зростанні швидкості обертання ротора зростає швидкість наростання пилкоподібного сигналу ДПР, а отже напруга на виході ДП зростає, що призводить до збільшення кута комутації тиристорного регулятора і як результат – до зменшення струму якоря та зменшення частоти обертання ротора. Таким самим чином забезпечується і зворотний процес.

Експериментальні дослідження.

У ВІГ спрацьовує принцип самозбудження. Процес самозбудження починається при залишковій намагніченості ротора ВІГ, що забезпечує появу напруги і незначного струму у кожній фазі. Ця напруга через зворотні діоди заряджає конденсатор С до певного значення. При надходженні сигналу керування напівпровідникові елементи ВП підключають фазу ВІГ, визначену МКСК, до напруги конденсатора, і в ній зростає струм. При вимкненні фази у момент, який забезпечує генераторний режим, через зворотні діоди і конденсатор С проходить дещо більший струм, ніж спожитий в перший період її роботи, що призводить до більшого заряджання конденсатора С. Зростання струму в фазах лавиноподібно розганяє цей процес до моменту досягнення напруги конденсатора С значення, програмно закладеного в мікроконтролер, який контролює її за допомогою дільника R_1/R_2 . При досягненні цього значення, мікроконтролер забезпечує широтно-імпульсну модуляцію напруги фаз, що призводить до регулювання їх струму до такого рівня, при якому зростання напруги на конденсаторі С припиняється і починається її стабілізація (рис. 6).

При увімкнених MOSFET ключах відбувається накопичення енергії в фазі, при їх вимиканні – скидання енергії через зворотні діоди D_{1-2} на конденсатор C і в навантаження. Це ілюструє рис. 7.

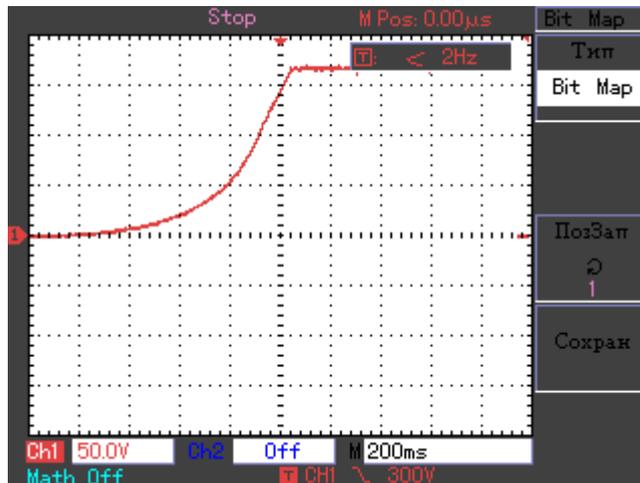


Рис. 6. Процес самозбудження ВІГ

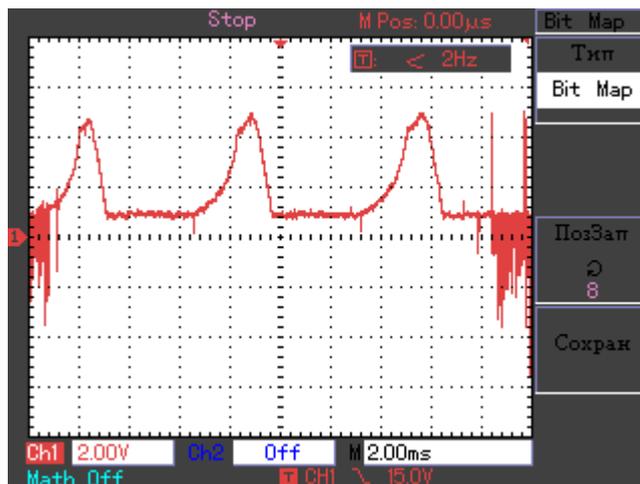


Рис. 7. Фазний струм

Перша, ділянка зміни миттєвих значень струму відповідає накопиченню енергії у фазі, далі незначне зростання та спад струму – генераторному режиму.

У таблиці представлено результати дослідження робочих характеристик експериментального стенда автономної СЕ з емулятором змінної частоти обертання на основі електричної машини постійного струму і ВІГ, де: $U_{я}$, $I_{я}$, n , P_m – відповідно напруга (В), струм якоря (А), частота обертання (об/хв) якоря,

потужність, що споживається емулятором (Вт); U_d – напруга у колі постійного струму ВПГ; I_z , P_z – відповідно струм заряду і потужність, що споживається, АБ.

1. Результати дослідження стенду

$Uя$, В	$Iя$, А	n , об/хв	U_d , В	I_z , А	P_m , Вт	P_z , Вт
50	2,75	1200	138	1,15	137,5	14,5
55	2,4	1300	160	1,4	132	17,5
60	2,0	1400	166	1,4	120	17,5
65	1,75	1500	166	1,4	113,75	17,5
70	1,75	1600	166	1,63	122,5	20,5
75	1,75	1700	166	1,8	131,5	22,7
80	1,8	1800	166	2,1	144	26,9
85	1,85	1900	166	2,5	157,25	32
90	2,0	2000	166	3,0	180	38,4
95	2,1	2100	166	3,5	199,5	45,2
100	2,25	2200	166	4,0	225	52
105	2,4	2300	166	4,7	252	61,1
110	2,5	2400	166	5,2	275	67,6
115	2,6	2500	166	5,9	299	77,2

За зміни частоти обертання емулятора у межах 1300÷2500 об/хв напруга на затискачах ВП генератора підтримується на рівні 166 В.

Залежність потужності, яка споживається емулятором від частоти обертання (рис. 8), якщо припустити що приводом ВПГ є вітрова турбіна, проходить через максимальні значення механічних характеристик вітротурбіни при зміні швидкості вітру [7].

Якщо здійснити регулювання струму збудження, то можна врахувати і поворот лопастей.

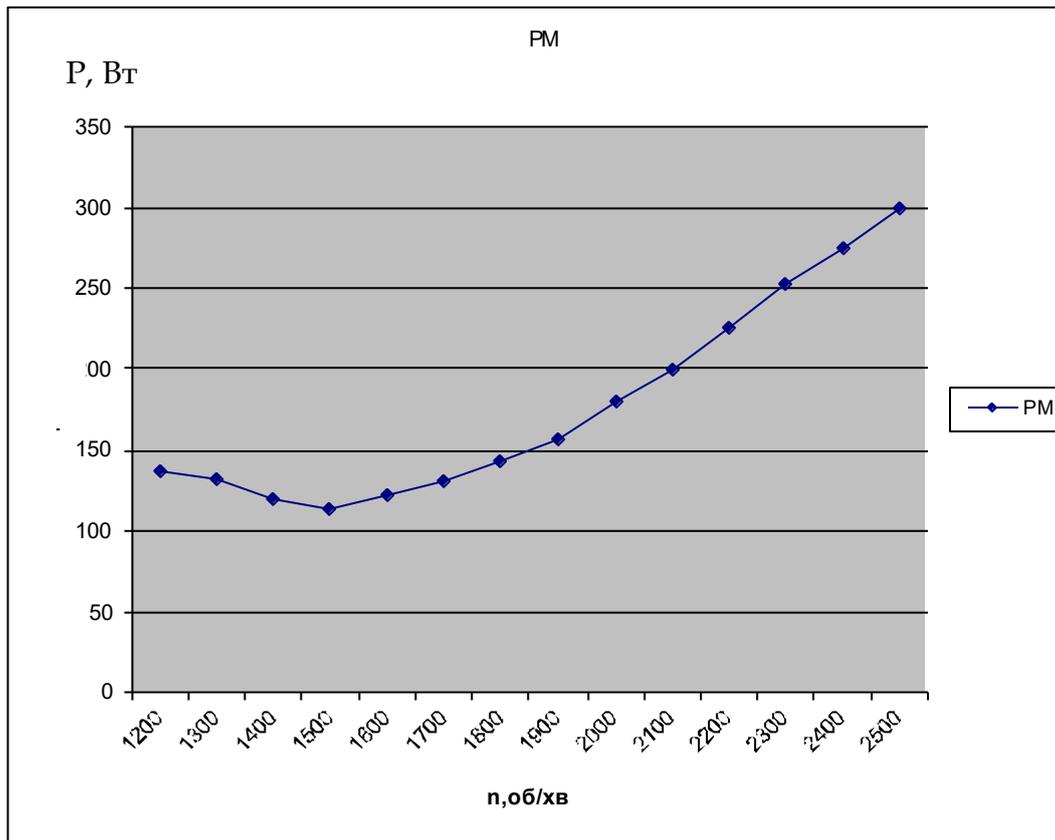


Рис. 8. Залежність потужності споживання від частоти обертання приводного двигуна

Потужність, що споживається для заряду АБ за частоти обертання 2500 об/хв становить близько 80 Вт. Тобто, за вхідної потужності, емулятора 300 Вт, ККД стенду 0,25...0,27, що пояснюється втратами в його складових і тим, що ВІГ працює не на повну потужність. На його вал подається потужність 230 Вт замість 330 Вт, необхідних для роботи на повну потужність, що пов'язано із заниженою потужністю приводного двигуна. Однак, це знижує цінності отриманих результатів.

Висновки і перспективи. Розроблено та створено експериментальний стенд автономної СЕ з ВІГ (номінальні потужність 200 Вт, напруга 300 В, струм фази 0,75 А, частота обертання 2400 об/хв), з емулятором на основі машини постійного струму, що має номінальні потужність 230 Вт, напругу 110 В, струм якоря 2,9 А, ККД 72%, частоту обертання 2400 об/хв.

Дослідження експериментального стенду продемонстрували:

- в генераторному режимі здійснюється самозбудження вентильно-індукторної машини від залишкового потоку;

– за зміни частоти обертання ВІГ його вихідна напруга підтримується сталою;
– експериментальні дослідження ілюструють доцільність використання запропонованого рішення при створенні і дослідженні експериментальних стендів на основі ВІГ за змінної частоти обертання приводного двигуна, в том числі, коли приводом слугує вітроустановка.

Фінансується за держбюджетною темою "Розвиток теоретичних засад створення та розроблення засобів підвищення енергоефективності та надійності комбінованих систем електроживлення з різними типами генераторів при роботі в автономному режимі і на мережу" ("ЕНЕРГОСИСТ-3"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України (Протокол № 6) від 02. 07. 2020 р. Державний реєстраційний номер роботи 0121U100509.

Список використаних джерел

1. Boukais, B., Mesbah, K., Rahoui, A., Saim, A., Houari, A., & Benkhoris, M. F. (2024). Development of a 3 kW Wind Energy Conversion System Emulator Using a Grid-Connected Doudly-Fed Induction Generator. *Actuators*, 13(12),487. <https://doi.org/10.3390/act13120487> .
2. Sun, Y., Zhang, J. and Zhou, Y. (2019). Development of a wind turbine simulator. *The Journal of Engineering*, 2019: 8751-8754. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9098> .
3. B. Neammanee, S. Sirisumranukul, S. Chatratana (2007). Development of a Wind Turbine Simulator for Generator Testing. *International Energy Journal*. Vol.8, Issue 1, pp. 21-28.
4. Wang, Y., Wang, H., Liu, W., Wang, Q., & Zhao, X. (2022). Desing Method for Variable Frequency Brushless Synchronous Generators. *Energies*, 15(8), 2786. <https://doi.org/10.3390/en15082786>.
5. Volosins, Kirils & Kroics, Kaspars. (2020). Development of test bench for variable frequency drive loading and testing. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 1554-1561. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF384.
6. Шихненко М.О., Мазуренко Л.І. Перехідні процеси та якість електроенергії автономного вентиляно-індукторного генератора. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. Харків, 2019. Вип. 1(45). С. 57-63. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.57-63>
7. Neammanee, B., Sirisumrannukul, S., & Chatrat, S. (2010). Control Strategies for Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines. *Wind Power*. InTech. pp. 209-232. doi: 10.5772/8357

References

1. Boukais, B., Mesbah, K., Rahoui, A., Saim, A., Houari, A., & Benkhoris, M. F. (2024). Development of a 3 kW Wind Energy Conversion System Emulator Using a Grid-

Connected Doudly-Fed Induction Generator. Actuators, 13(12),487. <https://doi.org/10.3390/act13120487> .

2. Sun, Y., Zhang, J. and Zhou, Y. (2019). Development of a wind turbine simulator. The Journal of Engineering, 2019: 8751-8754. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9098> .

3. B. Neammanee, S. Sirisumranukul, S. Chatratana (2007). Development of a Wind Turbine Simulator for Generator Testing. International Energy Journal. Vol.8, Issue 1, pp. 21-28.

4. Wang, Y., Wang, H., Liu, W., Wang, Q., & Zhao, X. (2022). Desing Method for Variable Frequency Brushless Synchronous Generators. Energies, 15(8), 2786. <https://doi.org/10.3390/en15082786>.

5. Volosins, Kirils & Kroics, Kaspars. (2020). Development of test bench for variable frequency drive loading and testing. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 1554-1561. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF384.

6. Shykhnenko, M.O., Mazurenko, L.I., Dzhyra, O.V., Bilyk, O.A. (2019). Perekhidni protsesy ta yakist elektroenerhii avtonomnoho ventylno-induktornoho heneratora [Transient processes and power quality of an autonomous switched reluctance generator]. Electromechanical and energy saving systems. Kharkiv, 1(45), 57-63. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.57-63>

7. Neammanee, B., Sirisumrannukul, S., & Chatrat, S. (2010). Control Strategies for Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines. Wind Power. InTech. pp. 209-232. doi: 10.5772/8357

TECHNICAL IMPLEMENTATION AND STUDY OF AN EXPERIMENTAL STAND OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM WITH A SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR AT VARIABLE SPEED

L. Mazurenko, O. Dzhyra, M. Shykhnenko, O. Bilyk

Abstract. *An experimental stand of an autonomous power supply system based on a DC machine simulating a variable speed prime mover and a switched reluctance generator is considered. Generalized and complete structural diagrams of the experimental stand are presented. The operating principle of individual structural elements of the stand is described. The process of self-excitation of a generator from a residual flux is considered and an oscillogram of this process is presented, illustrating the nature of the change in the output DC voltage. Using the oscillogram of the phase current of the generator, the movement of energy in the electric machine – semiconductor converter system is considered. The operating characteristics of a switched reluctance generator were investigated. The experimental data confirm the possibility of using the stand as an autonomous power supply system at variable speed.*

Key words: *DC motor, switched reluctance generator, generated power*