

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.383.51:621.313.2

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.1>

С.О. БАГАНОВ

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0001-8771-5735

І.Ф. ПОГРЕБНЯК

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0003-0935-1168

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЩО ПІДКЛЮЧЕНИЙ БЕЗПОСЕРЕДНЬО ДО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

У даній роботі проведений аналіз роботи двигуна постійного струму паралельного збудження, що працює на навантаження з вентиляторною характеристикою і підключений безпосередньо до фотоелектричного модуля. Головною метою дослідження є визначення параметрів модуля, які забезпечують стабільний режим роботи двигуна при змінних зовнішніх умовах, зокрема – інтенсивності сонячного випромінювання.

На основі п'ятипараметричної моделі фотоелектричного модуля побудована стаціонарна математична модель системи модуль-двигун-навантаження, яка описує робочу точку двигуна, і враховує вплив зовнішніх умов: температури навколишнього середовища та інтенсивності сонячного випромінювання.

На основі побудованої моделі показано, що умовою стабілізації роботи двигуна є наявність запасу потужності фотоелектричного модуля відносно номінальної потужності двигуна, причому цей запас повинен бути отриманий підвищенням струму модуля. Відповідно пріоритетним є збільшення кількості з'єднаних паралельно сонячних елементів у модулі. Підвищення потужності модуля шляхом збільшення кількості послідовно з'єднаних сонячних елементів не забезпечує стабілізації роботи двигуна і призводить до варіації робочої точки при зміні зовнішніх умов. Показана можливість стрибкоподібної зміни робочої точки.

Визначено безрозмірні критерії, що описують роботу двигуна. Показано, що на вибір параметрів фотоелектричного модуля основний вплив здійснює відношення моменту опору навантаження при номінальній швидкості двигуна до номінального пускового моменту.

Запропоновано критерії визначення параметрів фотоелектричного модуля у залежності від характеристик як навантаження так і двигуна, а також інтервалу зовнішніх умов, де очікується стабільна робота системи.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, двигун постійного струму, вентиляторна характеристика, паралельне збудження, п'ятипараметрична модель.

Е.А. БАГАНОВ

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0001-8771-5735

И.Ф. ПОГРЕБНЯК

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0003-0935-1168

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА, НЕПОСРЕДСТВЕННО ПОДКЛЮЧЕННОГО К ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ МОДУЛЮ

В данной работе проведен анализ работы двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, который работает на нагрузку с вентиляторной характеристикой и непосредственно подключен к фотоэлектрическому модулю. Главной целью исследования является определение параметров модуля, которые обеспечивают стабильный режим работы двигателя при переменных внешних условиях, в частности – интенсивности солнечного излучения.

На основе пятипараметрической модели фотоэлектрического модуля построена стационарная математическая модель системы модуль-двигатель-нагрузка, которая описывает рабочую точку двигателя, и учитывает влияние внешних условий: температуры окружающей среды и интенсивности

солнечного излучения.

На основе построенной модели показано, что условием стабилизации работы двигателя является наличие запаса мощности фотоэлектрического модуля относительно номинальной мощности двигателя, причем этот запас должен быть получен увеличением тока модуля. Соответственно приоритетным является увеличение количества параллельно соединенных солнечных элементов в модуле. Повышение мощности модуля путем увеличения количества последовательно соединенных солнечных элементов не обеспечивает стабилизации работы двигателя и приводит к вариации рабочей точки при изменении внешних условий. Показана возможность скачкообразного изменения рабочей точки.

Определены безразмерные критерии, описывающие работу двигателя. Показано, что на выбор параметров фотоэлектрического модуля основное влияние осуществляет отношение момента сопротивления нагрузки при номинальной скорости двигателя к номинальному пусковому моменту.

Предложены критерии определения параметров фотоэлектрического модуля в зависимости от характеристик как нагрузки, так и двигателя, а также интервала внешних условий, где ожидается стабильная работа системы.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, двигатель постоянного тока, вентиляторная характеристика, параллельное возбуждение, пятипараметрическая модель.

Ye.A. BAGANOV

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0001-8771-5735

I.F. POGREBNIYAK

Kherson National Technical University

ORCID:0000-0003-0935-1168

DETERMINATION OF STABLE OPERATION CONDITIONS OF A DIRECTLY-COUPLED PHOTOVOLTAIC DC MOTOR SYSTEM

In this paper the operation of a parallel excitation DC motor, which operates on a load with a fan characteristic and is directly-coupled to a photovoltaic module is analyzed. The main goal of the study is to determine the parameters of the module, which ensure a stable operation of the motor under variable external conditions, in particular, the intensity of solar radiation.

On the basis of a five-parameter model of a photovoltaic module, a stationary mathematical model of the module-motor-load system is built. This model describes the operating point of the motor, and takes into account the influence of external conditions: ambient temperature and intensity of solar radiation.

Based on the constructed model, it is shown that the condition for stabilizing the operation of the motor is the presence of a power reserve of the photovoltaic module relative to the rated motor power, and this reserve should be obtained by increasing the module current. Accordingly, the priority is to increase the number of solar cells connected in parallel in the module. Increasing the power of the module by increasing the number of solar cells connected in series does not provide stabilization of the motor operation and leads to a variation in the operating point when external conditions change. The possibility of an abrupt change in the operating point is shown.

Dimensionless criteria describing the operation of the engine have been determined. It is shown that the parameters of the photovoltaic module is strongly dependent on the ratio of the load torque at the rated motor speed to the rated starting torque.

Criteria for determining the parameters of a photovoltaic module are proposed depending on the characteristics both of the load and of the motor, as well as the interval of external conditions, where stable operation of the system is expected.

Keywords: photovoltaic module, DC motor, fan characteristic, parallel excitation, five-parameter model.

Постановка проблеми

Сонячна енергія є одним з найбільш перспективних джерел для реалізації автономних електроенергетичних систем [1]. Разом із тим питання надійності електропостачання призводить до значного зростання вартості фотоелектричних систем, що вимагає мінімізації компонентів системи і, незважаючи на значне здешевлення самих фотоелектричних модулів (ФЕМ), вартість таких систем залишається високою. Одним з варіантів їх здешевлення є пряме підключення фотоелектричних модулів до навантаження [2].

Широке застосування сонячна енергія здобула у фотоелектричних насосних системах [3 – 6], при цьому відзначається, що додаткове обладнання має сильний вплив на початкові витрати системи та її

складність і досить часто застосовуються системи з прямим підключенням ФЕМ до двигуна постійного струму (ДПС), що є приводом насоса [4].

Однак зміна інтенсивності сонячного випромінювання призводить до зміни робочої точки системи ФЕМ – ДПС – навантаження. Для зменшення цього впливу збільшують номінальну потужність ФЕМ [6]. Останнє можна досягти як збільшенням струму короткого замикання так і збільшенням напруги холостого ходу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Переважає більшість сучасних робіт, у яких розглядається використання прямого з'єднання ФЕМ – ДПС, зазвичай присвячена енергетичній ефективності використання ФЕМ та її оптимізації. Стабільність роботи системи зазвичай виводиться на другий план [3 – 5]. Однак у системах, що не мають проміжних накопичувачів, наприклад, системах вентиляції, першочерговим є стабільність роботи системи, що потребує інших підходів до їх організації. У [6] розглянуто вплив типу з'єднання елементів на роботу системи, однак тільки експериментально, що не дає змоги розповсюдити отримані результати. На даному етапі практично відсутні рекомендації щодо вибору параметрів ФЕМ для забезпечення стабільної роботи системи при зміні зовнішніх умов. Більше уваги зараз приділяється системам з проміжними накопичувачами електричної енергії [3, 5, 7].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є визначення параметрів ФЕМ, що забезпечують стабільний режим роботи ДПС у визначеному інтервалі зовнішніх умов.

Результати досліджень

Для моделювання роботи системи ФЕМ-ДПС було зроблено ряд припущень. По-перше, зміни у навколишньому середовищі є повільними, порівняно зі швидкістю зміни стану системи, тому в будь-який момент часу система знаходиться у стаціонарному режимі роботи і перехідні процеси відсутні. По-друге, для спрощення математичного опису насичення магнітопроводу та втрати холостого ходу в ДПС не розглядаються. Також прийнято, що навантаження має вентиляторну характеристику, проковзування у системі відсутнє, тип збудження ДПС – паралельний.

Математичний опис ФЕМ був прийнятий за п'ятипараметричною моделлю [8]. З огляду на зроблені припущення була отримана модельна схема прямого з'єднання ФЕМ з ДПС паралельного збудження, яка наведена на рис. 1.

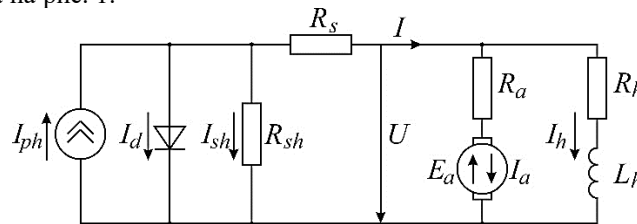


Рис. 1. Модельна схема прямого з'єднання ФЕМ з ДПС паралельного збудження

Частина схеми, що відповідає ФЕМ на рис. 1, описується рівнянням [8]

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}, \quad (1)$$

де $I_d = I_0 \left(e^{\frac{U + IR_s}{AN_s V_i}} - 1 \right)$ – діодний струм через p-n перехід;

$I_{sh} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}}$ – шунтуючий струм через p-n перехід;

I_{ph} , I_0 – фотострум носіїв заряду та зворотний струм насичення діода відповідно;

R_{sh} – шунтуючий опір;

$V_i = kT_c/q_e$ – термічний потенціал;

$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;

T_c – абсолютна температура ФЕМ;

U – напруга ФЕМ;

A – параметр ідеальності;

N_s – кількість послідовно з'єднаних сонячних елементів (СЕ) у ФЕМ.

Залежність параметрів ФЕМ від умов у навколишньому середовищі може бути описана через опорні параметри A_{ref} , $I_{0,ref}$, $I_{ph,ref}$, $R_{s,ref}$ та $R_{sh,ref}$, що має ФЕМ за температури $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ і інтенсивності сонячного випромінювання $G_{ref} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ (стандартні умови паспортизації ФЕМ – STC) наступним чином [9]:

$$\frac{A}{A_{ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}}; \quad (2)$$

$$R_s = R_{s,ref} = \text{const}; \quad (3)$$

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{G_{ref}}{G}; \quad (4)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph,ref} + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{ref}) \right); \quad (5)$$

де $\alpha_{I_{sc}}$ – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

G – дійсна інтенсивність сонячного випромінювання.

Залежність зворотного струму насичення від температури має вигляд [10]:

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = e^{\frac{1}{k} \left(\frac{E_g}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T_c} \right)} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3, \quad (6)$$

де E_g – ширина забороненої зони кремнію, залежність якої від температури дається виразом [11]:

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - 0,0002677 \cdot (T_c - T_{ref}) \quad (7)$$

Ширина забороненої зони $E_{g,ref}$, яка визначається при 25°C, дорівнює 1,121 еВ для тонкоплівкових, моно- і полікристалічних ФЕМ, а для трьохперехідних аморфних ФЕМ 1,6 еВ [9].

Температура ФЕМ при різних температурах навколишнього середовища T_a і різних рівнях інтенсивності сонячного випромінювання, може бути визначена з теплового балансу, який призводить до співвідношення [9]:

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{NOCT}} (NOCT - T_{a,NOCT}), \quad (8)$$

де $T_{a,NOCT} = 20^\circ\text{C}$ – температура навколишнього середовища при номінальних умовах експлуатації (NOCT);

$G_{NOCT} = 800 \text{ Вт/м}^2$ – інтенсивність сонячного випромінювання при номінальних умовах експлуатації.

Частина схеми, що відповідає ДПС на рис. 1, описується наступними рівняннями:

$$U = I_h R_h; \quad (9)$$

$$I = I_a + I_h; \quad (10)$$

$$M_{ДПС} = M_{нав}; \quad (11)$$

$$E_a + I_a R_a - I_h R_h = 0, \quad (12)$$

де I_h, R_h – струм та опір кола збудження;

I_a, R_a – струм та опір кола якоря;

$M_{ДПС} = c\Phi I_a$ – механічний момент ДПС;

$M_{нав} = K\Omega^2$ – механічний момент навантаження;

$E_a = c\Phi\Omega$ – електрорушійна сила якоря;

$\Phi = fI_h$ – магнітний потік ДПС;

c – постійна ДПС;

f – коефіцієнт магнітного потоку ДПС;

Ω – кутова швидкість обертання ротора ДПС/навантаження;

K – коефіцієнт опору навантаження.

Уведемо наступні відносні величини:

$$i = I / I_n; \quad u = U / U_n; \quad \omega = \Omega / \Omega_n, \quad (13)$$

де I_n, U_n, Ω_n – номінальні значення струму, напруги та кутової швидкості ДПС.

Тоді, після перетворень з (9) – (13) можна отримати наступні співвідношення:

$$b_1 \omega + b_2 \left(\frac{\omega}{u} \right)^2 = 1; \quad (1 - b_1 + b_3) \frac{i}{u} = 1 + b_3 - b_1 \omega; \quad (14)$$

$$b_1 = \frac{E_{an}}{U_n}; \quad b_2 = \frac{K\Omega_n^2}{M_{nn}}; \quad b_3 = \frac{R_a}{R_h}, \quad (15)$$

де E_{an}, M_{nn} – ЕРС та пусковий момент у номінальному режимі.

Зі співвідношень (14) можна отримати аналітичні залежності роботи ДПС:

$$i(u) = \frac{\left(b_1^2 u^2 + 2b_2 b_3 + 2b_2 - \sqrt{b_1^4 u^4 + 4b_1^2 b_2 u^2}\right) u}{2b_2(1+b_3-b_1)}; \quad (16)$$

$$\omega(u) = \frac{\left(\sqrt{b_1^2 u^2 + 4b_2} - b_1 u\right) u}{2b_2}. \quad (17)$$

Чисельне розв'язання рівнянь (1) та (16) дає змогу визначити струм і напругу в стаціонарній робочій точці, а рівняння (17) – кутову швидкість.

Внаслідок необхідності проведення чисельних розрахунків, базовими для розрахунку приймалися параметри:

– ФЕМ 1Soltech 1STH-215-P: номінальна потужність 215 Вт, напруга холостого ходу $U_{xx} = 36,3$ В, струм короткого замикання $I_{кз} = 7,84$ А, $NOCT = 46^\circ\text{C}$, $N_s = 60$, номінальна напруга 29 В, номінальний струм 7,35 А, $\alpha_{isc} = 0,008$ А/К [12];

– ДПС П11М: $U_n = 50$ В, $P_n = 250$ Вт, $n_n = 1500$ об/хв, $I_n = 6,85$ А, $R_a = 1,97$ Ом [13];

– механічна характеристика навантаження проходить через номінальну точку ДПС.

Характеристики вказаного вище ФЕМ приймалися тільки для визначення параметрів заступної схеми з можливістю безперервної зміни потужності ФЕМ шляхом недискретизованого масштабування кількості послідовно і паралельно з'єднаних сонячних елементів у модулі.

Як було вказано вище, пряме безакмуляторне використання ФЕМ для живлення ДПС потребує запасу номінальної потужності модуля для забезпечення роботи системи при нижчих за номінальну інтенсивностях сонячного випромінювання.

На рис. 2 наведена залежність параметрів робочої точки ДПС від відношення встановленої потужності ФЕМ до номінальної потужності ДПС ($P_M = P_{ФЕМ} / P_n$). Зміна потужності проводилася шляхом зміни складу ФЕМ, причому варіювалися як кількість послідовних з'єднань СЕ, так і паралельних. Умови роботи ФЕМ відповідають $NOCT$.

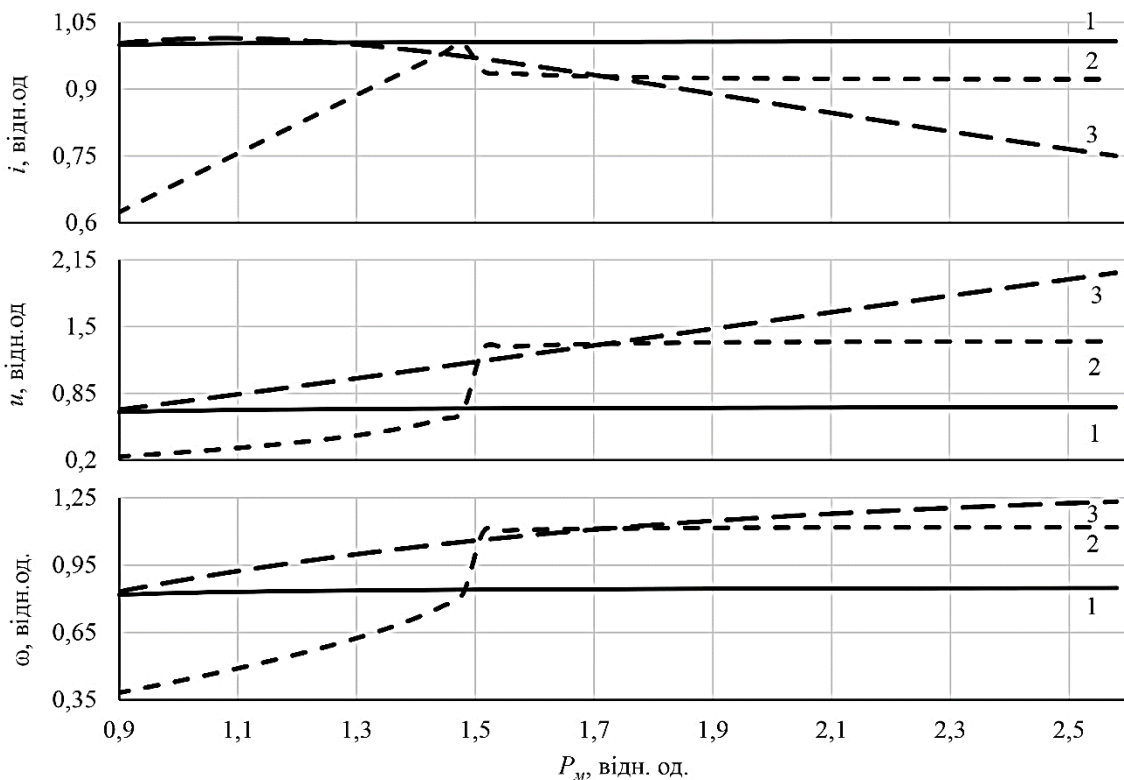


Рис. 2. Залежність параметрів робочої точки ДПС від відношення встановленої потужності ФЕМ до номінальної потужності ДПС

Крива 1 на рис.1 відповідає зміні кількості тільки паралельних з'єднань СЕ, крива 2 – тільки послідовних з'єднань СЕ, крива 3 – збільшення вдвічі послідовних з'єднань і варіація паралельних з'єднань СЕ в межах від 0,5 до 1,5. Хід кривих на рис. 2 добре пояснюється порівнянням відповідних вольт-амперних характеристик (ВАХ) ФЕМ та ДПС, що наведені на рис. 3.

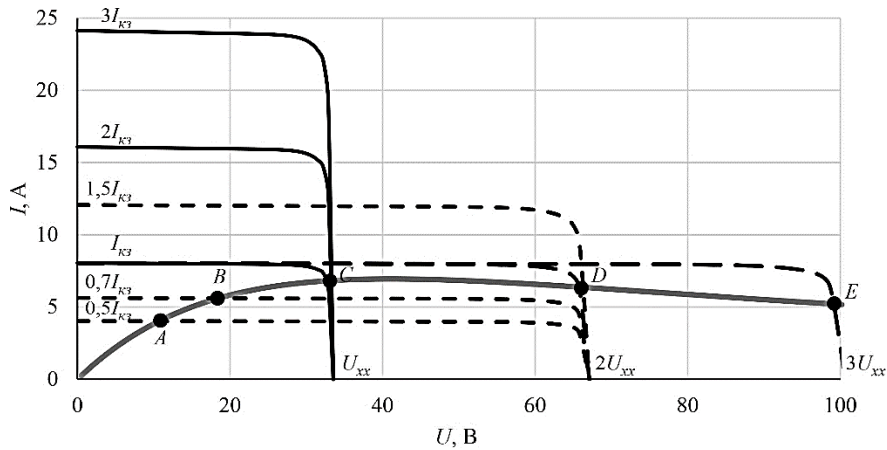


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики ДПС (крива 0ABCDE) та ФЕМ різного складу

При збільшенні потужності шляхом збільшення паралельно з'єднаних СЕ, що відповідає підвищенню можливого вихідного струму, робочою точкою є точка С, яка не змінюється при підвищенні потужності. Це пояснює практично незмінний режим роботи ДПС при збільшенні запасу за струмом (криві 1) на рис. 2. При збільшенні потужності шляхом збільшення послідовно з'єднаних СЕ, що відповідає підвищенню можливої вихідної напруги, робоча точка змінюється в послідовності С-D-E, що пояснює значну варіацію режиму роботи ДПС при збільшенні запасу за напругою (криві 3) на рис. 2. При збільшенні потужності шляхом збільшення як послідовно, так і паралельно з'єднаних СЕ, що відповідає підвищенню можливих вихідних напруги (у 2 рази) і струму (від 0,5 до 1,5 рази), робоча точка змінюється в послідовності А-В-С-D. Співпадіння при певному складі ФЕМ горизонтальних ділянок ВАХ ДПС та ВАХ ФЕМ обумовлюють стрибкоподібну зміну режиму роботи ДПС, так як навіть незначна зміна вихідного струму ФЕМ призводить до значних стрибкоподібних варіацій напруги робочої точки ДПС (стрибкоподібні ділянки на кривих 2, рис. 2). Причому ця стрибкоподібна ділянка розділяє стабільну та змінну зони роботи ДПС.

Дослідимо вплив запасу потужності, що реалізований у різний спосіб, на стабільність роботи ДПС при варіюванні зовнішніх параметрів, зокрема, інтенсивності сонячного випромінювання у діапазоні від 400 Вт/м² до 1000 Вт/м². Прийемо подвійний запас потужності. Результати розрахунків наведені на рис. 4 для трьох комплектацій ФЕМ: збільшення вдвічі паралельно з'єднаних СЕ (крива 1), збільшення вдвічі послідовно з'єднаних СЕ (крива 3) та збільшення як послідовно так і паралельно з'єднаних СЕ у $\sqrt{2}$ разів (крива 2). Температура повітря була прийнята 30°C. Корекція параметрів ФЕМ у залежності від навколишніх умов проводилася за (2) – (8).

Як видно з рис. 4, розширення діапазону стабільної роботи ДПС при зміні інтенсивності сонячного випромінювання залежить виключно від запасу потужності ФЕМ за струмом. Це пояснюється тим, що при зменшенні інтенсивності сонячного випромінювання співпадіння горизонтальних ділянок ВАХ ДПС та ВАХ ФЕМ відбувається при тим менших значеннях G , чим вищий струм короткого замикання ФЕМ.

Проаналізуємо вплив параметрів ДПС b_1, b_2, b_3 . Параметри b_1 і b_3 є внутрішніми характеристиками ДПС, у той час як b_2 , є характеристикою навантаження.

Параметр b_1 , з урахуванням $I_{hn} \ll I_{an}$:

$$b_1 = \frac{E_{an}}{U_n} = \frac{U_n - I_{an}R_a}{U_n} = 1 - \frac{I_{an}^2 R_a}{I_{an} U_n} \approx 1 - \frac{I_{an}^2 R_a}{I_n U_n} \approx \text{ККД}_{\text{ДПС}},$$

тобто приблизно дорівнює номінальному ККД ДПС. Номінальний ККД машин постійного струму при потужності до 0,1 кВт становить 30 – 40%, потужністю 10 кВт – біля 80% , а у машин понад 1000 кВт – до 96%. Відповідно, зміни параметру b_1 у широких межах відбутися не може, особливо для схожих за потужністю задач.

Параметр b_3 практично не впливає на ВАХ ДПС аж до значень $b_3 = 0,1$. У переважній кількості практичних реалізацій ДПС $R_a \ll R_n$ і $b_3 \ll 0,1$, тому варіація цього параметра розглядатися не буде.

Вигляд ВАХ ДПС при різних значеннях параметра b_2 , наведено на рис. 5. Як видно з рис. 5, ВАХ ДПС мають вигляд пологої кривої з максимумом. Тому в якості критерію вибору запасу потужності ФЕМ за збільшенням струму можна визначити наступним чином: струм короткого замикання ДПС повинен бути не менше максимального струму ДПС в усьому інтервалі інтенсивності сонячного випромінювання, в якому очікується стабільна робота ДПС.

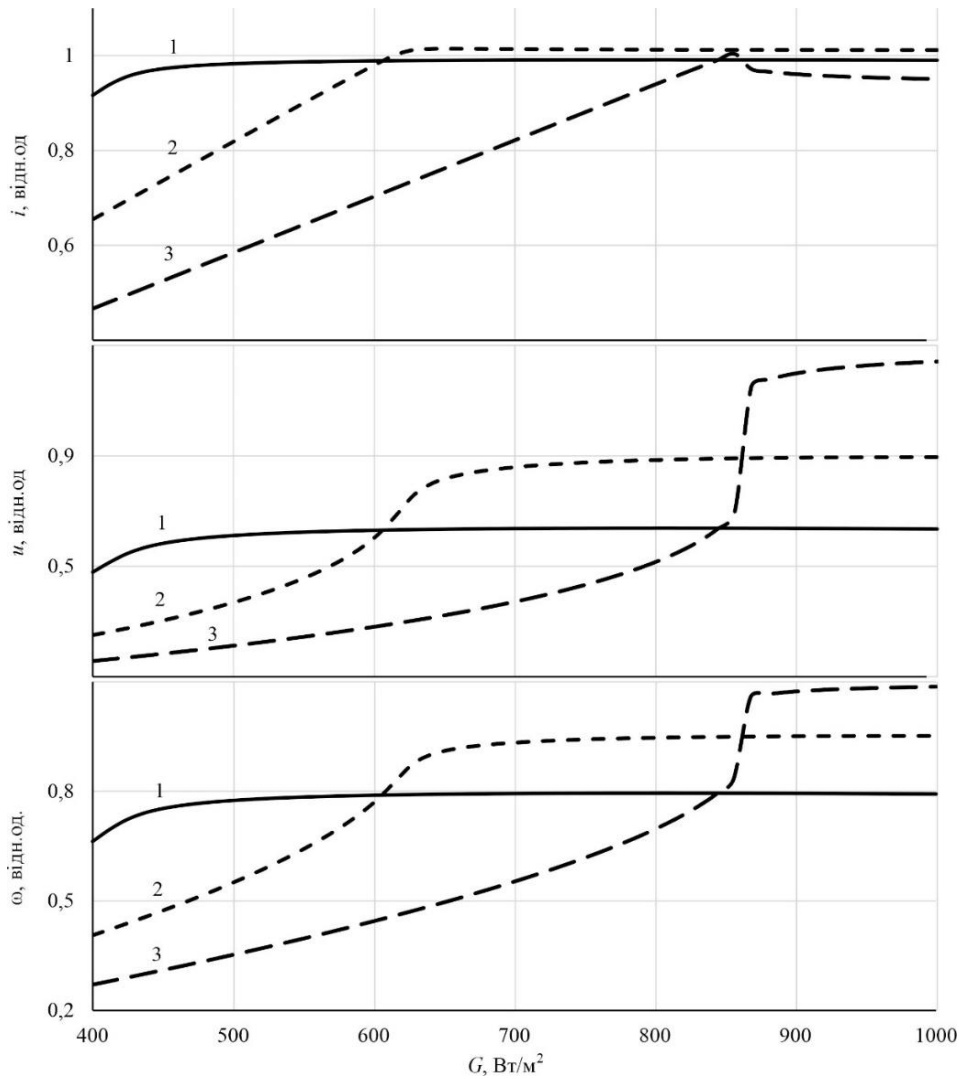


Рис. 4. Залежність параметрів робочої точки ДПС від інтенсивності сонячного випромінювання при подвійному запасі потужності ФЕМ

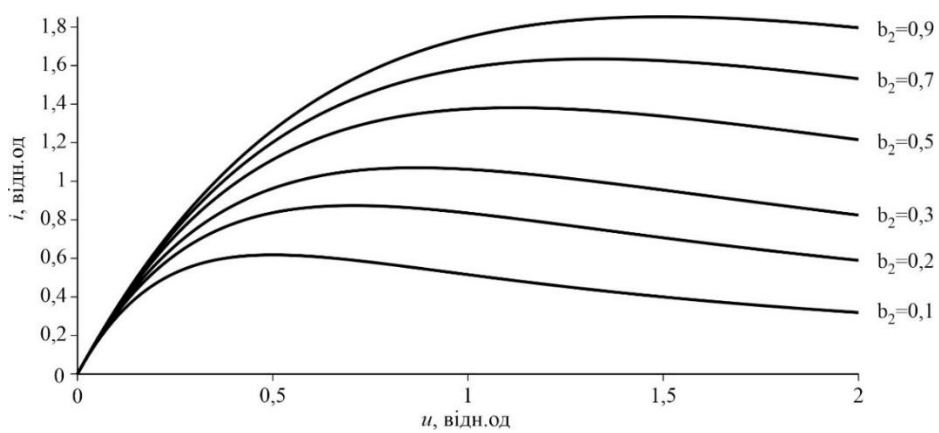


Рис. 5. Вольт-амперні характеристики ДПС у залежності від значення параметра b_2

З рівняння (16), приймаючи $b_3=0$, можна отримати значення максимального струму ВАХ ДПС:

$$i_{max} = \frac{I_{max}}{I_n} = \frac{2}{3\sqrt{3}b_1(1-b_1)} \sqrt{b_2} \approx 0,385 \frac{\sqrt{b_2}}{b_1(1-b_1)}$$

Отримана залежність наведена на рис. 6.

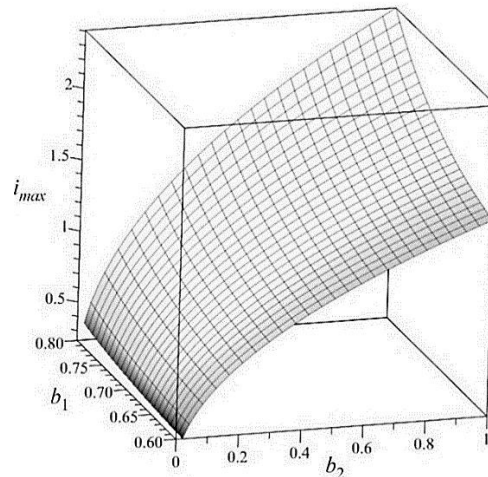
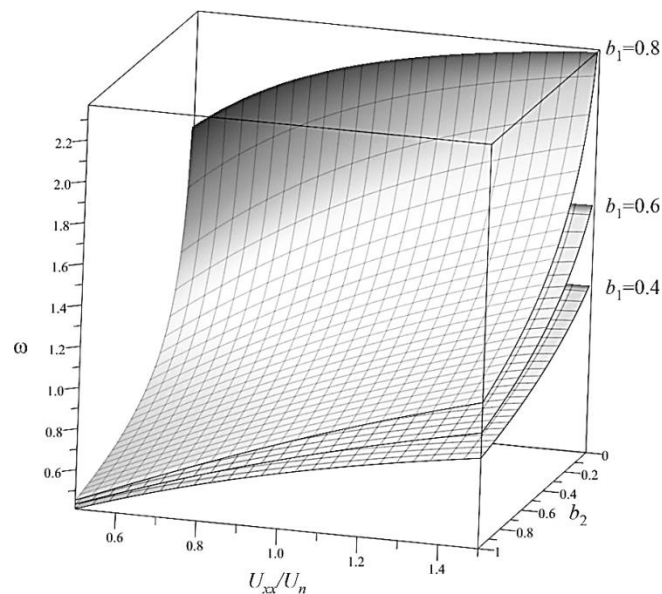


Рис. 6. Залежність максимального відносного струму ВАХ ДПС

При забезпеченні достатнього запасу потужності ФЕМ за збільшенням струму, необхідний додатковий запас потужності ФЕМ за збільшенням напруги може бути визначений з очікуваної швидкості ДПС. З (17) можна оцінити швидкість ДПС, використавши в якості напруги живлення найменшу напругу U_{xx} ФЕМ у всьому інтервалі зовнішніх умов, де очікується стабільна робота ДПС (рис. 7). При цьому обов'язковим обмеженням зверху на величину U_{xx} є обмеження можливого струму двигуна значенням максимально припустимого струму.

Рис. 7. Залежність швидкості ДПС від напруги холостого ходу ФЕМ та значення параметрів b_1 і b_2

Висновки

1. Показано, що для забезпечення стабільної роботи ДПС з вентиляторним навантаженням при зміні інтенсивності сонячного випромінювання пріоритетним є забезпечення надлишкової потужності ФЕМ збільшенням його струму, а не напруги, тобто додатковими СЕ, що приєднуються паралельно.
2. Показано, що на вибір параметрів фотоелектричного модуля основний вплив здійснює відношення моменту опору навантаження при номінальній швидкості ДПС до номінального пускового моменту.
3. Запропоновано критерії визначення параметрів ФЕМ у залежності від характеристик навантаження і двигуна, а також інтервалу зовнішніх умов, де очікується стабільна робота ДПС.

Список використаної літератури

1. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects/ T.M. Razykov [et al.] // Solar Energy. – 85. – 2011. – P. 1580 – 1608.

2. A model for direct-coupled PV systems with batteries depending on solar radiation, temperature and number of serial connected PV cells / Ayeng'o S.P. [et al.]// *Solar Energy*. – 2019. – 183. – P. 120–131.
3. Shepovalova O. V. Review of photovoltaic water pumping system research / O. V. Shepovalova, A. T. Belenov, S. V. Chirkov // *Energy Reports*. – 6. – 2020. – P. 306 – 324.
4. Performance of a directly-coupled PV water pumping system / A. Mokeddem [et al.]// *Energy Conversion and Management*. – 52. – 2011. P. 3089 – 3095.
5. Photovoltaic pumping system - Comparative study analysis between direct and indirect coupling mode/ A. Harrag [et al.] // *Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. AIP Conf. Proc.*- V. 1814. – 2017. – P. 020002-1–020002-11
6. Experiment and simulation study on the optimization of the PV direct-coupled solar water heating system/ Y. Wang [et al.] // *Energy*. – 100. – 2016. – P. 154 – 166.
7. Das M. A comparative performance analysis of direct, with battery, supercapacitor, and battery-supercapacitor enabled photovoltaic water pumping systems using centrifugal pump/ M. Das, R. Mandal // *Solar Energy*. – 171. – 2018. – P. 302 – 309
8. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review/ A. M. Humada [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – 56. – P. 494 – 509.
9. De Soto W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance / De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A. // *Sol. Energy*. – 2006. – V.80. – P. 78–88.
10. Messenger R.A. *Photovoltaic Systems Engineering, second ed.*/ R.A. Messenger, J. Ventre. – CRC Press LLC, Boca Raton, FL. – 2004. – 435 p.
11. Van Zeghbroeck B. *Principles of Semiconductor Devices*/ B. Van Zeghbroeck [Электронний ресурс] – Режим доступу: <https://ru.scribd.com/doc/7113653/Principles-of-Semiconductor-Devices-Zeghbroeck> (last access: 20.11.2020).
12. SolarHub. PV Module 1STH-215-P Details [Electronic Source] – URL: <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/5623-1STH-215-P-1Soltech> (last access: 24.11.2020).
13. Электродвигатели постоянного тока серии П [Электронний ресурс] – Режим доступу: <http://se33.ru/menu-direct-current-motor/26-direct-current-motor/108-p.html> (last access:24.11.2020).

References

1. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects/ T.M. Razykov [et al.] // *Solar Energy*, 2011, V.85., pp. 1580 – 1608. **doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002**
2. A model for direct-coupled PV systems with batteries depending on solar radiation, temperature and number of serial connected PV cells / Ayeng'o S.P. [et al.]// *Solar Energy*, 2019, V.183, pp.120–131. **doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.010**
3. Shepovalova O. V. Review of photovoltaic water pumping system research / O. V. Shepovalova, A. T. Belenov, S. V. Chirkov // *Energy Reports*, 2020, V.6, pp. 306–324. **doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.053**
4. Performance of a directly-coupled PV water pumping system / A. Mokeddem [et al.] // *Energy Conversion and Management*, 2011, V.52, pp. 3089–3095. **doi:10.1016/j.enconman.2011.04.024**
5. Photovoltaic pumping system - Comparative study analysis between direct and indirect coupling mode/ A. Harrag [et al.] // *Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. AIP Conf. Proc.*, 2017, V.1814, pp. 020002-1–020002-11. **doi: 10.1063/1.4976221**
6. Experiment and simulation study on the optimization of the PV direct-coupled solar water heating system/ Y. Wang [et al.] // *Energy*, 2016, V.100, pp. 154 – 166. **dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.022**
7. Das M. A comparative performance analysis of direct, with battery, supercapacitor, and battery-supercapacitor enabled photovoltaic water pumping systems using centrifugal pump/ M. Das, R. Mandal // *Solar Energy*, 2018, V.171, pp. 302–309 **doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.069**
8. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review/ A. M. Humada [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, V.56, pp. 494 – 509. **doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051**
9. De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 2006, V.80, pp. 78 – 88. **doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010.**
10. Messenger R.A. *Photovoltaic Systems Engineering, second ed.*/ R.A. Messenger, J. Ventre. – CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 2004, 435 p.
11. Van Zeghbroeck B. *Principles of Semiconductor Devices*/ B. Van Zeghbroeck Retrieved from <https://ru.scribd.com/doc/7113653/Principles-of-Semiconductor-Devices-Zeghbroeck> (last access: 20.11.2020) (eng).
12. SolarHub. PV Module 1STH-215-P Details Retrieved from <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/5623-1STH-215-P-1Soltech> (last access: 24.11.2020) (eng).
13. Электродвигатели постоянного тока серии П Retrieved from: <http://se33.ru/menu-direct-current-motor/26-direct-current-motor/108-p.html> (last access: 24.11.2020) (rus).