

СУПРУН О. Д., к.т.н., доцент,
СЕМЕНЕНКО О. І., к.т.н., доцент,
СЕМЕНЕНКО Ю. О., к.т.н., старший викладач,
РУДНИК М. Б., магістр
(Український державний університет залізничного транспорту)

Електротехнічний комплекс з вітродизельною установкою гарантованого живлення для тягових підстанцій залізниць

У статті запропоновано структурно-схемні рішення електротехнічного комплексу з гібридним джерелом енергії для живлення споживачів власних потреб тягових підстанцій залізниць і пристроїв сигналізації, централізації та автоблокування. Доцільно використати у вітроенергетичних установках багатополюсні синхронні генератори з постійними магнітами, які дають змогу створювати системи прямої передачі моменту від вітроколеса на вал генератора. Застосування таких генераторів при досить простих схемах перетворювачів значно підвищує ефективність системи генерування.

Розроблено оптимальний алгоритм керування електротехнічним комплексом гарантованого живлення відповідальних нетягових споживачів на базі вітродизельної установки з використанням статичних перетворювачів і проміжного накопичувача електричної енергії. Розроблено математичний опис та імітаційну модель вітродизельного електротехнічного комплексу для дослідження статичних режимів.

Ключові слова: відновлювана енергетика, вітроенергетична установка, вітродизельні електротехнічні комплекси, система гарантованого живлення, відповідальні нетягові споживачі.

Вступ

Розвиток відновлюваної енергетики є важливим для України як для вирішення проблеми енергетичної безпеки, так і для підвищення ефективності та екологічності промислової, транспортної, сільськогосподарської та інших галузей. Так, для залізниці одним із способів вирішення важливої задачі енергоефективного гарантованого живлення відповідальних нетягових споживачів, до яких відносять пристрої СЦБ та засоби керування тягових підстанцій [1–2], є впровадження електротехнічних комплексів (ЕТК) на базі вітроенергетичних установок (ВЕУ). Це дасть змогу підвищити техніко-економічну ефективність та знизити паливну складову собівартості виробництва електричної енергії для вказаної категорії споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На початковому етапі впровадження ЕТК з ВЕУ для гарантованого електропостачання відповідальних нетягових споживачів тягових підстанцій залізниць найбільш перспективними завдяки своїй простій конструкції і високій надійності є горизонтально-осьові ВЕУ одиничною потужністю до 100 кВт [3–4]. При цьому застосування ВЕУ як автономного джерела електроенергії ускладнено через нестабільність

вітрового потоку. Пошук технічних рішень, які дозволять компенсувати цей недолік, – головне завдання при розробленні комплексів, побудованих на базі ВЕУ. Як показує світова практика [6–8], одним із сучасних варіантів рішення є створення гібридних вітродизельних електротехнічних комплексів (ВДЕТК) з використанням проміжних (буферних) накопичувачів енергії. З урахуванням цього, розроблення ВДЕТК для застосування у системах гарантованого живлення відповідальних нетягових споживачів, до яких відносять пристрої СЦБ та засоби керування тягових підстанцій, є актуальним завданням.

Щодо дизель-електричних станцій (ДЕС), то відомо, що ефективний режим їх роботи забезпечується тільки при завантаженні від 70 до 100 %, зі зменшенням коефіцієнта завантаження відбувається різке зниження ефективності їх роботи [8]. Робота ДЕС зі змінною частотою обертання вала генератора з подальшим перетворенням електричної енергії трифазним інвертором дає змогу підвищити ефективність роботи ДЕС у режимах неповного завантаження. З вищеперелічених проблем впливає завдання визначення оптимальної структури нетягового електропостачання на базі ВДЕТК.

Визначення мети та задачі

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності системи гарантованого живлення пристроїв СЦБ та споживачів власних потреб тягових підстанцій шляхом застосування ВДЕТК. Основними задачами роботи є: обґрунтування оптимальної структури і параметрів ВДЕТК та визначення його алгоритму управління в системі гарантованого живлення нетягових споживачів.

Основна частина

Реалізація структурно-схемних рішень систем гарантованого живлення нетягових споживачів на базі ВДЕТК може здійснюватися за різними варіантами [6]. При цьому доцільно, щоб основним джерелом електричної енергії для споживачів були ВЕУ, а додатковими, в тому числі резервними, – зовнішня мережа і ДЕС. У ВЕУ використовуються такі типи генераторів електричної енергії: асинхронний генератор з короткозамкненим (АГКЗР) або з фазним

ротором (АГФР); асинхронізований синхронний генератор (АСГ); синхронний генератор (СГ); синхронний генератор з постійними магнітами (СГПМ). Топологія ЕТК може варіюватися залежно від енергетичних характеристик генераторів, необхідності в процесі експлуатації нарощування або скорочення генерувальних потужностей. Схемотехнічні варіанти застосування різних типів генераторів у складі ВЕУ [4–6] показано на рис. 1.

Використання АГКЗР схеми I вимагає постійної частоти обертання вітроколеса з похибкою не більше 1–2%. Для роботи АГКЗР потрібна реактивна потужність, що обумовлює необхідність підключення даних ВЕУ до мережі і використання компенсаторів реактивної потужності (КРП). Знаходять своє застосування генератори із змінною кількістю полюсів [4, 6], однак вищевказані варіанти ускладнюють і здорожують конструкцію. Основні їх переваги – відсутність ковзних контактів і висока надійність самих генераторів.

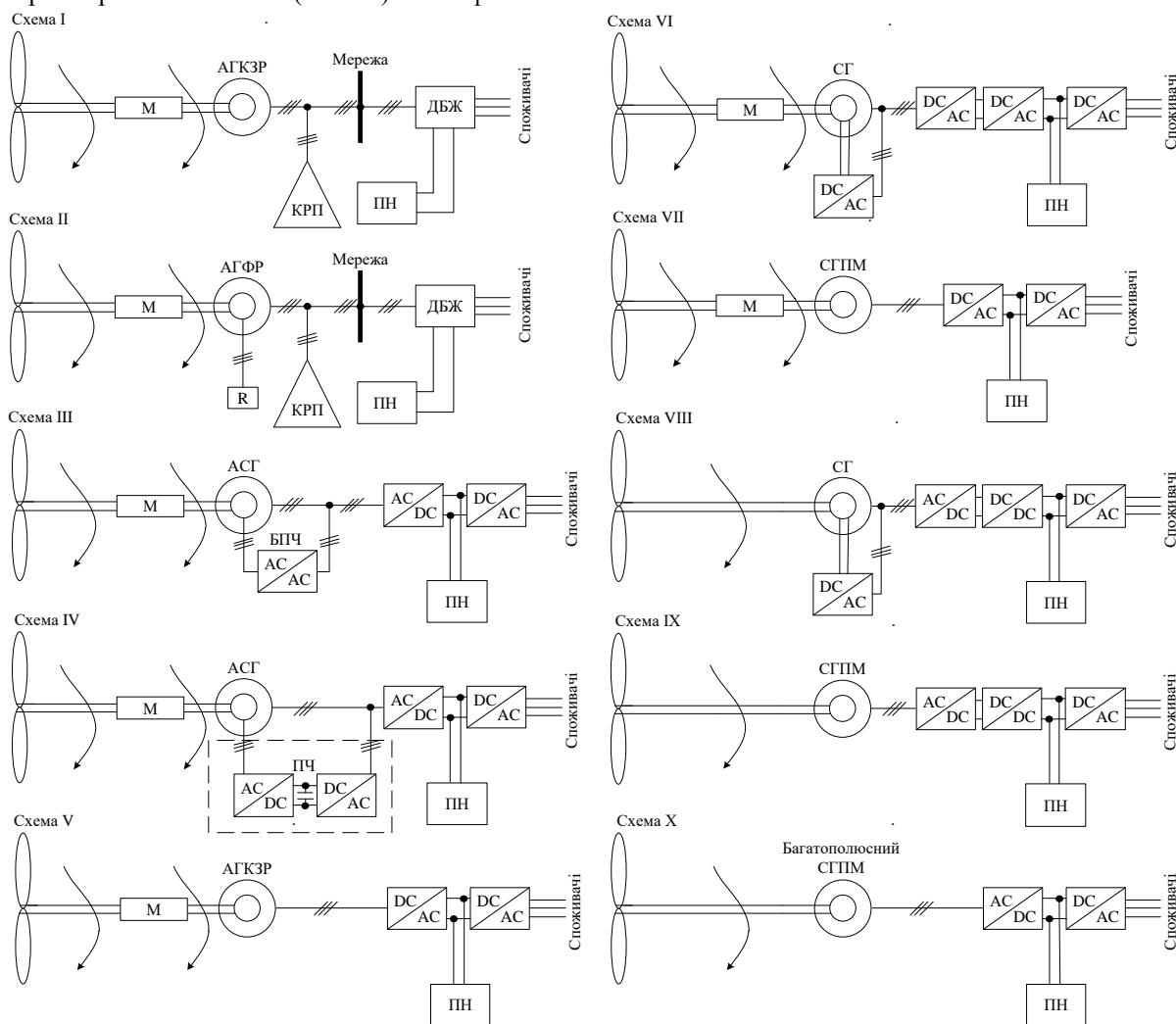


Рис. 1. Схемотехнічні рішення ВЕУ

Для розширення діапазону частот обертання вітроколеса існує схема II з використанням АГФР, де регулювання діапазону обертання вітроколеса в межах 2–5 % досягається введенням у коло обмотки ротора додаткових опорів. Ця схема найменше поширена, оскільки має всі перелічені вище недоліки використання АГКЗР, а також наявність ковзних контактів, які знижують надійність електричної машини, при цьому незначно підвищуючи ефективність роботи ВЕУ [4, 6].

З огляду на той факт, що для роботи ВЕУ за схемами I і II необхідна мережа, електропостачання споживачів можливе лише при використанні джерел безперебійного живлення (ДБЖ). Можливість роботи ВЕУ зі змінною швидкістю обертання вітроколеса дає можливість оптимізувати робочу точку і забезпечити генерацію більшої потужності при тих самих швидкостях вітру. Підвищення питомого вироблення енергії ВЕУ зі змінною швидкістю обертання вітроколеса може досягати 20–30 %. Додатковою перевагою можливості зміни частоти обертання вітроколеса є поглинання поштовхів крутного моменту при поривах вітру, за рахунок чого знижуються явища зношення, що підвищує термін служби вузлів установки, а також зменшується вплив перехідних процесів на мережу. Як генератори у ВЕУ зі змінною частотою обертання вітроколеса для живлення нетягових споживачів залежно від необхідного і економічно обґрунтованого діапазону зміни частоти обертання можуть застосовуватися асинхронізовані синхронні генератори (АСГ) схеми III і IV, які забезпечують зміну частоти в діапазоні до $\pm 50\%$ від синхронної. При використанні АСГ перетворювач частоти (ПЧ) встановлюється в колі ротора, що забезпечує сталість частоти і рівня напруги на виході ВЕУ незалежно від швидкості вітру і частоти обертання вітроколеса.

Відповідно використання ПЧ з безпосереднім зв'язком (схема III) забезпечує зміну частоти обертання в діапазоні $\pm 25\%$, для розширення можливої межі зміни частот до $\pm(50-70)\%$ застосовуються ПЧ з колом постійного струму. Для регулювання збудження генератора використовується векторне управління. У надсинхронній області роботи потужність, що виробляється ВЕУ, дорівнює сумі потужностей від статора і ротора. Відповідно, для генерування тієї самої потужності ВЕУ з АСГ потрібен генератор меншої номінальної потужності, завдяки чому розміри машини подвійного живлення можуть бути оптимізовані.

До недоліків АСГ можна віднести наявність ковзних контактів у колі обмоток ротора, як в АГФР, а також з огляду на те, що із зростанням радіуса вітроколеса його швидкість обертання знижується, виникає необхідність установки мультиплікатора,

коефіцієнт передачі якого може досягати 20–40 %. Мультиплікатор у свою чергу знижує ККД установки і здорожує її, адже вартість мультиплікатора може досягати 20 % від вартості всієї установки. Для роботи ВЕУ зі змінною частотою обертання вітроколеса в усьому діапазоні зміни частот обертання перетворювач встановлюється в колі статора генератора на повну потужність агрегата (схеми V–X). У таких системах використовуються асинхронні генератори з ПЧ, на вході яких встановлені керовані випрямлячі, (схема V), синхронні генератори (схема VI) і синхронні генератори з постійними магнітами (схема VII) з некерованими випрямлячами і DC/DC конвекторами, які забезпечують роботу ВЕУ з максимальною потужністю при заданій поточній швидкості вітру. Однак наявність у цих схемах мультиплікатора значно знижує ефективність системи генерування.

Схеми з використанням багатополосних генераторів (схеми VIII–X) дають змогу створювати системи прямої передачі моменту від вітроколеса на вал генератора без проміжних перетворювачів механічної енергії обертання вітроколеса [3–4]. Однак застосування схем VIII–IX вимагає використання не тільки значної кількості перетворювальної техніки, а й наявності складних систем управління активними випрямлячами і DC/DC перетворювачами. При цьому від параметрів налаштування і якості роботи системи управління буде залежати ефективність роботи ВЕУ. Спрощеним варіантом схеми IX є схема X, в якій на вході перетворювача встановлено некерований випрямляч. Перевагою цієї схеми є знижена вартість перетворювача електричної енергії, відсутність мультиплікатора, простота конструкції. До недоліків можна віднести зниження ефективності ВЕУ за рахунок роботи генератора в неоптимальному режимі. Враховуючи вищезазначене, застосування ВЕУ з генераторами на постійних магнітах, що працюють зі змінною частотою обертання вала генератора і подальшим перетворенням електроенергії до потрібної постійної частоти в інверторі, є найбільш виправданою в складі ЕТК з гібридною ВЕУ (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння різних схем ВЕУ

Параметри порівняння	Порядковий номер схеми									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Змінна частоти обертання вітроколеса	-	+	±	±	+	+	+	+	+	+
Наявність мультиплікатора	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
Наявність ковзних контактів	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-
Компенсація реактивної потужності	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Наявність керованих напівпровідникових перетворювачів	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
Кількість напівпровідникових перетворювачів	1-3	1-3	3	4	2	4	3	4	3	2

Схемне рішення системи гарантованого живлення, виконаної з використанням ЕТК, що містить ВЕУ і ДЕС, показано на рис. 2. У запропонованій схемі ЕТК основним джерелом електроенергії служить гібридна ВЕУ, яка складається з вітроагрегата і акумуляторної батареї (АКБ).

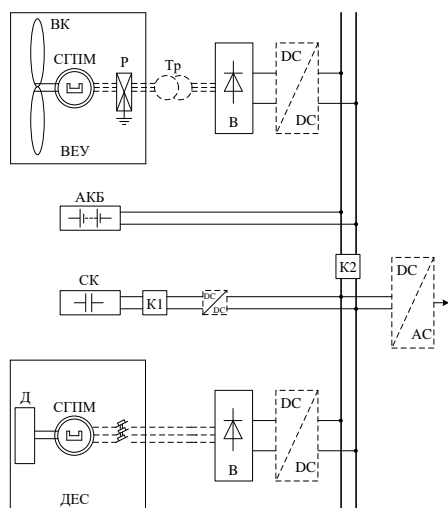


Рис. 2. Узагальнена схема ВДЕТК

Для максимальної економії палива запропоновано алгоритм управління автономним ВДЕТК у вигляді блок-схеми на рис. 3, згідно з яким пріоритетним джерелом електричної енергії є ВЕУ, доповнена АКБ, яка служить для вирівнювання графіка вироблення і використання електричної енергії. При розряді АКБ нижче 20 % від номінальної ємності $C_{АКБ}^н$ відбувається запуск ДЕС. У момент перемикання між ВЕУ і ДЕС до шин постійного струму завжди підключений блок суперконденсаторів (СК) [9], які виконують роль резервного джерела постійного струму, що забезпечує зниження стрибків струму на АКБ і зменшення навантаження на ДЕС. Заряд АКБ

здійснюється тільки за рахунок енергії, що виробляється ВЕУ. Перемикання з ДЕС на ВЕУ відбувається у двох випадках: перший, коли АКБ повністю заряджена незалежно від поточної генерації ВЕУ; другий, коли АКБ заряджена на 70 % від номінальної ємності, а генерація потужності ВЕУ перевищує середню споживану потужність навантаження.

Для системи ВДЕТК як об'єкта управління характерні наявність великої кількості складних прямих і зворотних зв'язків між численними її елементами і цільова спрямованість процесу функціонування. Розроблення алгоритму управління ВДЕТК проводилося з урахуванням таких обмежень:

1. Встановлена номінальна потужність робочих дизель-генераторів ДЕС $P_{Н_ДЕС}$ має забезпечувати максимальне електричне навантаження $P_{Н_max}$:

$$P_{Н_ДЕС} \geq P_{Н_max} \quad (1)$$

2. Запас енергії $W_{АКБ}$ має забезпечувати покриття максимального електричного навантаження на час перемикання основних енергоджерел ДЕС і ВЕУ $t_{пер}$:

$$W_{АКБ} \geq P_{Н_max} \cdot t_{пер} \quad (2)$$

Мінімальна величина часу перемикання визначається часом пуску і виведення на номінальний режим дизельного двигуна і становить залежно від його типу від 0,01 до 1,3 хв. Рациональна величина $t_{пер}$ залежить від характеру зміни розподілу швидкостей вітру. Виконання умов 1 і 2 необхідно для забезпечення гарантованого електропостачання нетягових споживачів. Оскільки запас енергії забезпечує в першу чергу АКБ, необхідно враховувати обмеження, подані нижче.

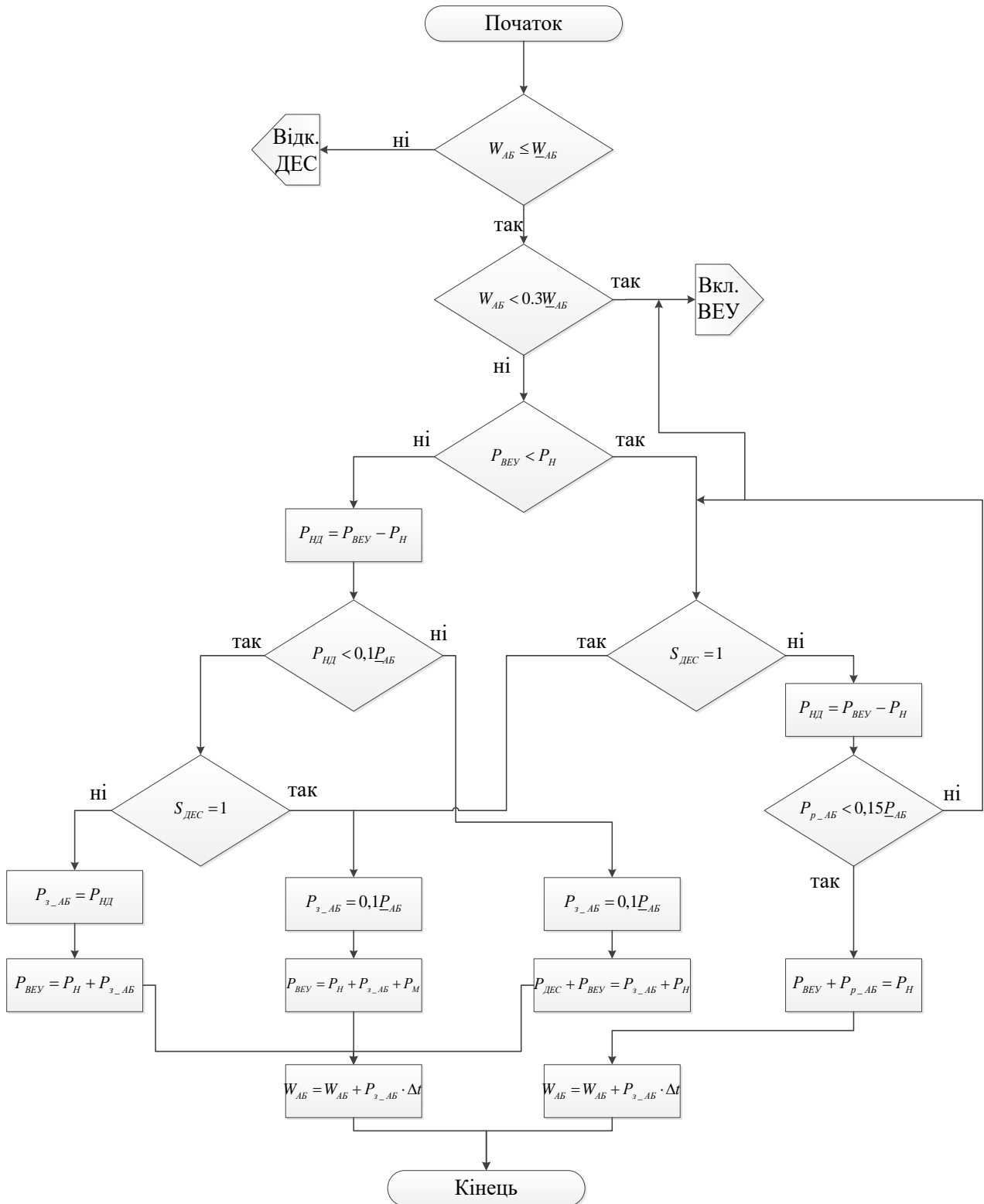


Рис. 3. Алгоритм управління автономним ВДЕТК

3. Максимальна глибина розряду АКБ не має $W_{AB} \geq 0.3 \cdot U_{AB} \cdot C_{AB_ном}$, перевищувати 70 % від їх номінальної ємності: (3)

де W_{AB} – залишкова енергія АКБ, кВт·год;

U_{AB} – номінальна напруга АКБ, кВ;

$C_{AB_ном}$ – номінальна ємність АКБ, А·год.

4. Зарядний струм (зарядна потужність) АКБ не має перевищувати 10 % їх номінальної ємності:

$$I_{з_AB} \leq 0.1 \cdot C_{AB_ном}; \quad P_{з_AB} \leq 0.1 \cdot U_{AB} \cdot C_{AB_ном}, \quad (4)$$

де $I_{з_AB}$, $P_{з_AB}$ – зарядний струм і зарядна потужність АКБ.

5. Розрядний струм (розрядна потужність) АКБ не має перевищувати 25 % їх номінальної ємності:

$$I_{р_AB} \leq 0.1 \cdot C_{AB_ном}; \quad P_{р_AB} \leq 0.25 \cdot U_{AB} \cdot C_{AB_ном}, \quad (5)$$

де $I_{р_AB}$, $P_{р_AB}$ – розрядний струм і розрядна потужність АКБ відповідно.

Виконання умов 3–5 необхідно для продовження експлуатаційного ресурсу акумуляторів. Виконання обмежень 1–5 є обов'язковим. Однак для досягнення максимальної енергетичної ефективності ВДЕТК алгоритм управління режимами комплексу має реалізовувати такі додаткові функції.

6. Максимально корисне використання енергії, що виробляється ВЕУ.

7. Забезпечення завантаження дизельного двигуна в тривалих режимах на рівні 80–90 % від його номінальної потужності.

8. Не допускати частих комутацій дизеля і його режимів роботи на малих навантаженнях.

Виконання умови 6 забезпечить максимальне заміщення енергії, що виробляється ДЕС, енергією ВЕУ, а отже, і максимальну економію дорогого дизельного палива. Виконання умови 6 досягається раціональним вибором встановлених потужностей ВЕУ і АВ з урахуванням наявного вітрового режиму і характеру навантаження. Виконання умов 7–8 забезпечує збільшення експлуатаційного ресурсу двигуна, а відповідно, і надійності живлення споживачів. При побудові алгоритму управління прийняті такі позначення: W_{AB} і \underline{W}_{AB} – поточна і номінальна (повна) енергія АКБ, Вт·год; $P_{ВЕУ}$, $P_{ДЕС}$ – поточні значення потужності, що генеруються ВЕУ і ДЕС, кВт; P_H – поточні значення потужності навантаження, кВт; P_{AB} , $P_{з_AB}$, $P_{р_AB}$ – номінальна, зарядна і розрядна потужності АКБ, кВт; $P_{нд}$ – надлишкова потужність, що генерується ВЕУ на поточному інтервалі часу, кВт; Δt – інтервал часу, що відповідає поточному робочому режиму ВДЕТК, год;

$S_{ДЕС}$ – логічна змінна, що характеризує стан дизельного двигуна: $S_{ДЕС} = 1$ – дизель у роботі;

$S_{ДЕС} = 0$ – дизель зупинений.

Для дослідження режимів роботи ВЕУ при безпосередньому приєднанні її виходів через випрямляч до клем АКБ розроблено математичну і імітаційну модель. На рис. 4 всі частини ВДЕТК гарантованого живлення зображені блоками зі змінними входами і виходами. Визначальним параметром вітру є його швидкість. У моделі, відповідно до поставленого завдання розрахунку річного виробітку електроенергії ВЕУ, спеціально передбачається постійна швидкість вітру. Використовуємо статистичну залежність, представлену річним розподілом кількості годин, при яких спостерігалася різна швидкість вітру в будь-яких напрямках у діапазоні $V (\pm 0,5 \text{ м/с})$, зазвичай $V < 25 \text{ м/с}$. У разі відсутності повних статистичних даних використовують розподіл Вейбулла з урахуванням середньорічної швидкості вітру і форми кривої розподілу.

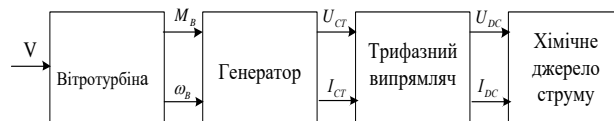


Рис. 4. Схема моделі ВЕУ системи гарантованого живлення власних потреб тягової підстанції

Вітроколесо перетворює енергію вітру в механічну енергію обертання, згідно з виразом:

$$P_v = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 \xi \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

де P_v – потужність, яку розвиває вітродвигун, кВт; R – радіус вітроколеса, м; ρ – щільність повітря, кг/м³; V – швидкість вітру, м/с; ξ – коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ).

Між КВЕВ ξ і величиною відносного обертального моменту \bar{M} , що створюється вітроколесом, є зв'язок, який визначається виразом:

$$\xi = \frac{M_{вд} \cdot \omega}{\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2}} = \frac{M_{вд}}{\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}} \cdot \frac{\omega R}{V} = \bar{M} \cdot Z. \quad (7)$$

Для зручності виконання розрахунків абстрактна аеродинамічна характеристика вітроколеса за моментом була апроксимована поліномом 6-го степеня:

$$\bar{M} = a_6 Z^6 + a_5 Z^5 + a_4 Z^4 + a_3 Z^3 + a_2 Z^2 + a_1 Z + a_0. \quad (8)$$

Перехід від відносного аеродинамічного моменту вітроколеса до крутного моменту, що розвивається вітрогенератором, здійснюється за формулою:

$$M_B = \frac{1}{2} \bar{M} \pi R^3 \rho V^2. \quad (9)$$

де M_B – обертальний момент, що розвиває вітрогенератор, Н·м.

За поєднаними потужнісними і механічними характеристиками вітротурбіни і генератора будується робоча і механічна характеристики ВЕУ $P = f(n)$ ($P = f(\omega)$) та $M = f(n)$ ($M = f(\omega)$) відповідно.

Блок-схема моделі «Генератора» містить як вхідний параметр крутний момент вітроколеса (вітрогенератора) M_B і частоту обертання вітроколеса ω_r . Напряга $U_{ст}$, струм $I_{ст}$ і втрати $P_{п}$ є вихідними параметрами. Втрати в генераторі $P_{п}$ поділяються на втрати на внутрішньому опорі статора $P_{ст}$, втрати на тертя $P_{тр}$ і втрати в сталі $P_{сталь}$:

$$\begin{aligned} P_{п} &= P_{ст} + P_{тр} + P_{сталь} \\ P_{ст} &= 3R_{ст} \cdot I_{ст}^2 \\ P_{тр} &= \left(2 \frac{f}{f_{ном}} + \left(\frac{f}{f_{ном}} \right)^2 \right) \frac{P_{тр.ном}}{3}, \\ P_{сталь} &= B^2 (c_1 f + c_2 f^2) \end{aligned} \quad (10)$$

де f – поточна частота генерованої змінної напруги, Гц; $f_{ном}$ – номінальна частота змінної напруги генератора, Гц; $P_{тр.ном}$ – втрати на тертя в генераторі в номінальному режимі роботи (при розрахунковій швидкості вітру), Вт; B – магнітна індукція постійних магнітів, Тл; c_1 – константа, м⁴А / В·с; c_2 – константа, м⁴А / В·с.

Рівняння, що описує вхідну і вихідну потужність з урахуванням втрат, набуде остаточного вигляду

$$M_r \cdot \omega_r = 3U_{ст} \cdot I_{ст} + 3R_{ст} \cdot I_{ст}^2 + P_{тр} + P_{сталь}, \quad (11)$$

де $M_r = M_B \cdot \rho$; $\omega_r = \omega_B \cdot \rho$.

Вирази для знаходження вихідних змінних генератора, струму і напруги визначаються відповідно:

$$I_{ст} = \sqrt{\frac{E^2 - \sqrt{E^4 - \frac{4}{9} \omega_r^2 L_{ст}^2 (M_r \omega_r - P_{тр} - P_{сталь})}}{2 \omega_r^2 L_{ст}^2}}; \quad (12)$$

$$U_{ст} = \frac{M_r \omega_r - 3R_{ст} \frac{E^2 - \sqrt{E^4 - \frac{4}{9} \omega_r^2 L_{ст}^2 (M_r \omega_r - P_{тр} - P_{сталь})}}{2 \omega_r^2 L_{ст}^2}}{3 \cdot \sqrt{E^2 - \sqrt{E^4 - \frac{4}{9} \omega_r^2 L_{ст}^2 (M_r \omega_r - P_{тр} - P_{сталь})}}}{2 \omega_r^2 L_{ст}^2}} \quad (13)$$

Рівняння розподілу потужності між входом і виходом моделі «трифазного випрямляча»:

$$3U_{ст} I_{ст} = U_{dc} I_{dc} + P_{втрат}, \quad (14)$$

де U_{dc} – постійна напруга на виході з випрямляча, В; I_{dc} – постійний струм на виході з випрямляча, А; $P_{втрат}$ – втрати, Вт.

Втрати $P_{втрат}$ у випрямлячі поділяються на втрати на внутрішньому опорі $P_{вн.опір}$ і при перемиканні діода $P_{перекл}$ і розраховуються відповідно:

$$P_{вн.опір} = U_{пор} I_{пр.ср} + r_{дин} I_{пр.д}^2; \quad (15)$$

$$P_{перекл} = E_{вос.обр} \frac{I_{пр}}{I_{пр.i}} f_r, \quad (16)$$

де $U_{пор}$ – порогова напруга випрямного діода, В; $I_{пр.ср}$ – середній прямиий струм діода, А; $r_{дин}$ – динамічний опір випрямного діода, Ом; $I_{пр.д}$ – діючий прямиий струм випрямного діода, А; $E_{вос.обр}$ – енергія втрат при зворотному відновленні діода, Вт·с; $I_{пр}$ – постійний прямиий струм діода, А; $I_{пр.i}$ – імпульсний

прямий струм діода, А; f_r – частота напруги генератора ВЕУ, Гц.

Струм на виході випрямляча пов'язаний із вхідним струмом з генератора ВЕУ виразом:

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ct} \quad (17)$$

Напруга на виході з випрямляча буде визначатися:

$$U_{dc} = \frac{3U_{ct} I_{ct} - 2 \left(U_{пор} \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ct} + r_{дин} \frac{3}{2} I_{ct}^2 \right) - 6 \left(E_{вос.обр} \frac{I_{пр}}{I_{пр.i}} f_r \right)}{\sqrt{\frac{3}{2}} I_{ct}} \quad (18)$$

Для вирішення поставлених завдань у середовищі MatLab Simulink було виконано імітаційне комп'ютерне моделювання ВДТЕК.

Вплив зміни базової напруги АКБ на енергетичні показники ВДТЕК вивчалися з використанням моделі статичної системи (рис. 5). Імітаційна модель дає можливість: виявити вплив варіювання величини напруги акумулятора на вихідну корисну потужність генератора, а також залежність електромагнітного

моменту генератора від напруги на виході випрямляча; отримати характеристику зміни частоти обертання вітроколеса (генератора) при різних швидкостях вітру. На рис. 6, а, б показано осцилограми, отримані при виборі як базової напруги АКБ 48 В і 120 В, відповідно.

Аналіз результатів дослідження рис. 6,а показує, що перехідний процес не перевищує 1 с, а максимальний електромагнітний момент генератора дорівнює швидкості вітру 12 м/с. Початок заряду АКБ відбувається при швидкості 3 м/с. Використання АКБ з базовою напругою 48 В знижує номінальну корисну потужність, що генерується ВЕУ, при цьому величина втрат електроенергії на активному опорі статора генератора та випрямлячі складають близько 50 %. Максимальну корисну потужність генератор ВЕУ розвиває при напрузі АКБ, що дорівнює 120 В, при цьому величина втрат складає 6 %. Однак у цьому випадку заряд АКБ починається тільки при 6 м/с (рис. 6,б). Внаслідок моделювання були отримані дані про залежність потужності ВЕУ в сталому режимі роботи вітроагрегата від швидкості вітру для різних номінальних напруг АКБ. Таким чином, визначення найбільш ефективного базового рівня напруги АКБ можливе шляхом порівняння кількості енергії, що генерується ВДТЕК за обраний період часу.

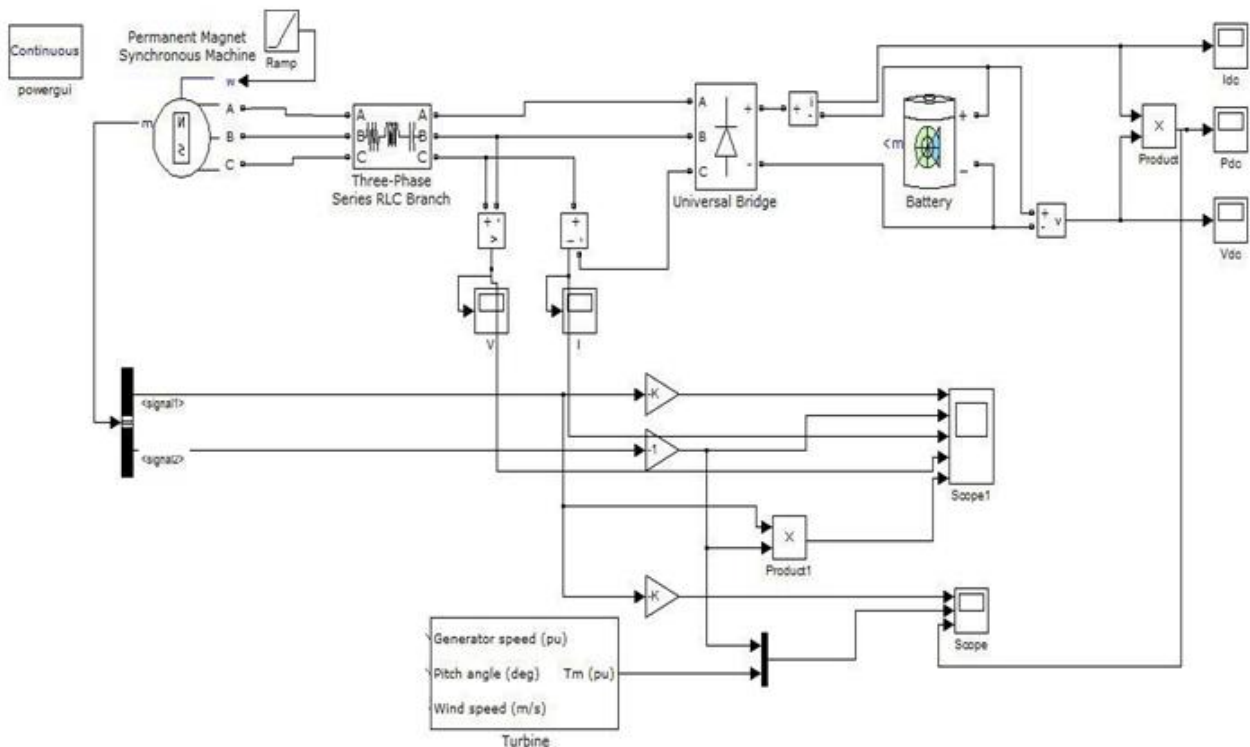


Рис. 5. Імітаційна комп'ютерна модель статичних режимів ВДТЕК

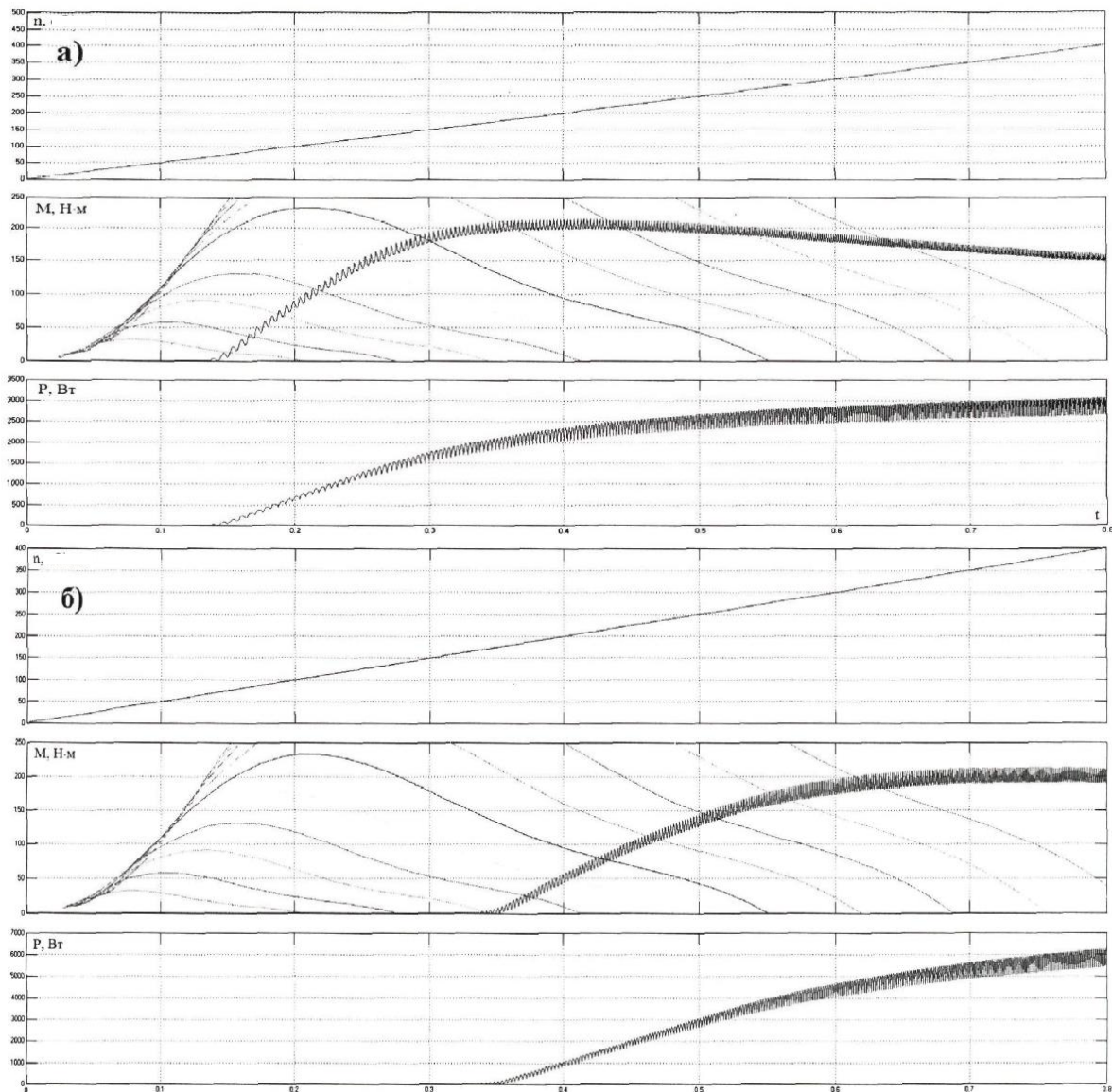


Рис. 6. Результати моделювання частоти та моментів обертання вітротурбіни, електромагнітного моменту генератора та генерованої потужності при U_{AKB} : а) – 48 В; б) – 120 В

Висновки

Запропоновано структурно-схемне рішення системи гарантованого електропостачання нетягових споживачів залізниць з використанням ВДЕТК. Показано, що використання у ВЕУ багатополосних синхронних генераторів з постійними магнітами дає змогу значно підвищувати ефективність системи генерування електричної енергії. Розроблено оптимальний алгоритм керування електротехнічним комплексом гарантованого живлення відповідальних нетягових споживачів залізниць на базі ВДЕУ. Впровадження у ВДЕТК блока акумулювання енергії постійного струму дозволить знизити паливну

складову в собівартості електроенергії, що підвищить їх техніко-економічну ефективність.

Обґрунтовано рекомендації щодо вибору співвідношення потужності ВЕУ, ДЕС і ємності хімічних джерел струму. Розроблено математичний опис та імітаційну модель ВДЕТК для дослідження статичних режимів. Поряд з очевидними перевагами, схемам з ДЕС притаманний ряд серйозних технічних недоліків, а використання вітро дизельних інерційних установок (ВДІЕУ) в системах гарантованого електропостачання нетягових споживачів дає можливість успішно вирішити більшу частину цих проблем.

Список використаних джерел

1. Супрун, О. Д. До питання впровадження джерел безперебійного живлення на тягових підстанціях при швидкісному русі [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, О. В. Ушкалов // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 129–141.
2. Супрун, О. Д. Підвищення енергетичної ефективності в системах нетягового електропостачання [Текст] / О. Д. Супрун, О. І. Семененко, Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – Вип. 175. – С. 32–46.
3. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектродгенераторы [Текст]: учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Хар. авиац. ин-т», Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
4. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэлектродгенераторы [Текст]: учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Хар. авиац. ин-т», Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
5. Anderson, P. M. Power System Control and Stability. Second Edition [Text] / P. M. Anderson, A. A. Fouad // IEEE Press. – 2003. – 688 p.
6. Master thesis. Variable Speed Wind Turbines equipped with a Synchronous Generator. Christian Freitag. 2011. – 80 p.
7. Burton, Tony. Wind Energy - Handbook [Text] / Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi // John Wiley & Sons, LTd. 2000. – 643 p.
8. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive [Text] / S. Buriakovskiy, M. Babaiev, B. Liubarskiy, Ar. Maslii, N. Karpenko, D. Pomazan, An. Maslii, I. Denis / 2018. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1/2 (91). – P. 68–75.
9. Vivekchand S.R.C. Graphene-based electrochemical supercapacitors [Text] / S.R.C. Vivekchand, C.S. Rout, K.S. Subrahmanyam and other // Chemical Sciences. – 2008. – Vol. 120. – No. 1. – P. 9-13.

Супрун А. Д., Семененко А. И., Семененко Ю. А., Руднык М. Б. Электротехнический комплекс с ветродизельной установкой гарантированного питания для тяговых подстанций железных дорог.

Аннотация. В статье предложены структурно-схемные решения электротехнического комплекса с гибридным источником энергии для питания потребителей собственных нужд тяговых подстанций железных дорог и устройств сигнализации, централизации и блокировки. Целесообразно использовать в ветроэнергетических установках многополюсные синхронные генераторы с

постоянными магнитами, которые позволяют создавать системы прямой передачи момента от ветроколеса на вал генератора. Применение таких генераторов при простых схемах преобразователей значительно повышает эффективность системы генерирования. Разработан оптимальный алгоритм управления электротехническим комплексом гарантированного питания ответственных нетяговых потребителей на базе ветродизельной установки с использованием статических преобразователей и промежуточного накопителя электрической энергии. Разработаны математическое описание и имитационная модель ветродизельного электротехнического комплекса для исследования статических режимов.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетическая установка, ветродизельные электротехнические комплексы, система гарантированного питания, ответственные нетяговые потребители.

Suprun O.D., Semenenko O.I., Semenenko Y.O., Rudnyk M.B. Electrotechnical complex with wind-diesel installation of guaranteed power supply for traction substations of railways.

Abstract. The article proposes structural and schematic solutions for an electrical engineering complex with a hybrid energy source to power consumers of their own needs of traction substations of railways and signaling, interlocking and interlocking devices. The selected structure of the complex, the main source of energy of which is wind power plants, and additional, including backup ones, is a diesel-electric station and an intermediate storage of direct current electrical energy. As a result of the analysis of various options, it was proposed to use multi-pole synchronous generators with permanent magnets in wind power plants that allow the creation of direct torque transfer systems from the wind wheel to the generator shaft. In addition, the use of such generators when using rather simple converter circuits significantly increases the efficiency of the generating system. It is rational to make an intermediate electric energy storage device on the basis of a rechargeable battery, to which a block of supercapacitors can be switched on, ensuring a reduction in battery current surges and reducing the load on the diesel-electric station in transient conditions. An optimal control algorithm has been developed for an electrotechnical complex of guaranteed power supply to responsible non-choking consumers based on a wind-diesel plant using static converters and an intermediate electrical energy storage device. A mathematical description and simulation model of a wind-diesel electrical complex for the study of static modes has been developed.

Keywords: renewable energy, wind power installation, wind-diesel electrical systems, guaranteed power supply system, responsible non-traction consumers.

Надійшла 25.02.2019 р.

Супрун Олександр Данилович, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, к.т.н., доцент, Харків, Україна. E-mail: adsup@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>

Семененко Олександр Іванович, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, к.т.н., доцент, Харків, Україна. E-mail: semenoi@i.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>

Семененко Юрій Олександрович, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, к.т.н., Харків, Україна. E-mail: slider2012@i.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>

Рудник Мирослав Богданович, магістр кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: myroslavrudnik@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5562-1547>

Suprun Oleksandr Danylovych, Associate Professor, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Ph.D. (Tech.), assistant professor, Kharkiv, Ukraine. E-mail: adsup@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>

Semenenko Oleksandr Ivanovych, Associate Professor, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Ph.D. (Tech.), assistant professor, Kharkiv, Ukraine. E-mail: semenoi@i.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>

Semenenko Yurii Oleksandrovych, Senior Lecturer, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Ph.D. (Tech.), Kharkiv, Ukraine. E-mail: slider2012@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>

Rudnyk Myroslav Bogdanovych, Master, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: myroslavrudnik@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5562-1547>