

О. М. СІНЧУК, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет»
С. М. БОЙКО, канд., техн. наук, Кременчуцький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОВОЇ МІНІЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА БАЗІ КОМБІНОВАНОГО КОНТРОЛЕРА ПРИ ФУНКЦІОНУВАННІ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Вступ. У зв'язку з непривабливою, але реальною перспективою вичерпності традиційних видів палива та водночас продовженням росту потреби у використанні електроенергетичних ресурсів, значної загальнодержавної актуальності набуває проблема використання альтернативних відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕЕ) [1-3].

Постановка проблеми. Важливо, що очікуваний ефект від впровадження ВДЕЕ можливо досягти лише при масовому використанні та впровадженні їх в тому числі в промисловості та побуті. Тому актуальним, для впровадження ВДЕЕ є вітчизняні підприємства гірничо-металургійної галузі. В цьому аспекті, в свою чергу, привабливо бачити використання ВДЕЕ в вигляді вітрових мініелектростанцій (ВМЕ), котрі можуть бути розміщеними в підземних рудничних виробках шахт, де згідно технології ведення робіт постійно присутній штучно створюваний потік повітря з його сталими параметрами [4-7].

Між тим, для досягнення достатньої ефективності функціонування ВМЕ необхідне створення відповідної конструкції комплексу та алгоритму керування його електромеханічною частиною, що в свою чергу можливо лише при адекватній оцінці реальних можливостей даного виду ВМЕ для конкретних умов експлуатації. В свою чергу останнє можна отримати в потрібному обсязі лише моделюванням вищенаведених процесів [7].

Ціль дослідження. Оцінка та встановлення реальнодосяжних параметрів ВМЕ шляхом моделювання режимів їх функціонування в умовах залізорудних шахт.

Матеріал та результати досліджень. Першим кроком при виконанні даного етапу досліджень виберемо структуру ВМЕ. Для цього розглянемо ідеологію побудови системи керування вертикально-осьовою ВМЕ, яка працює автономно на шахтну електричну мережу. За даних умов шахт необхідно підтримувати оптимальну швидкість обертання вітрового колеса і максимум потужності, що відбирається від ВМЕ на базі асинхронного генератора (АГ), шляхом керування емісним струмом та баластним навантаженням ВМЕ. Якщо не будуть сталими ці основні параметри ВМЕ, то буде змінюватись амплітуда вихідної напруги установки, що за даних умов забезпечить зміни струму навантаження, а це в свою чергу впливатиме на зміну моменту навантаження вітрового колеса аж до забезпечення оптимальної швидкості обертання вітрового колеса. Така система дасть змогу автоматично підтримувати куту частоту обертання вітроколеса, шляхом регулювання моменту навантаження ВМЕ. Важливою складовою розв'язання поставленої задачі є особливість конструктивного виконання ВМЕ, що проектується для експлуатації в умовах підземних виробок залізорудних шахт (ЗРШ).

Встановлено, що енергоефективним варіантом структури енергетичного комплексу таких ВМЕ є система з асинхронним генератором [5]. Однією з найбільш важливих проблем, що виникають при використанні АГ з конденсаторним збудженням в автономних системах електропостачання, є стабілізація напруги при змінній частоті обертів ротора та змінному навантаженні. Частота обертання генераторів може бути регульованою за умови сталості частоти генерованих коливань або залишатися постійною. У загальному випадку можлива робота генератора зі змінною частотою обертання ВК і змінною частотою ротора АГ.

Важливою умовою підвищення техніко-економічних показників ВМЕ є відповідність характеристик вітроагрегату вітровому режиму. На даний час існує багато систем керування ВМЕ, які, дозволяють працювати ВМЕ із нерегульованою швидкістю, забезпечуючи при цьому відбір максимальної потужності від вітроколеса, шляхом регулювання моменту навантаження генератора, однак при проектуванні системи керування ВМЕ, для експлуатації в умовах ЗРШ, необхідно також враховувати особливості технологічного процесу та середовища експлуатації [5].

Необхідність розробки системи керування полягає, головним чином, у тому, щоб забезпечити споживачів стабільною напругою з постійною частотою незалежно від зміни параметрів у будь-якій ланці системи.

На рис. 1 представлена структурна схема автоматизованої системи керування ВМЕ на базі асинхронного генератора до складу якої входять: ВК – вітрове колесо; АГ – асинхронний генератор з короткозамкненим ротором; БЗК – батарея збуджуючих конденсаторів; ЕМГ – електромагнітне гальмо; ДН – датчик напруги; ДЧ – датчик частоти обертів ВК; ДЧМ – датчик частоти напруги мережі; АЗП – автоматичний зарядний пристрій; АКБ – акумуляторна батарея; ПК – пристрій контролю стану АКБ; І – інвертор; БДК – батарея додаткових конденсаторів; БН – баластне навантаження; БС1, БС2 – блок симісторів; МКБ – мікропроцесорний блок; К1-К3 – керовані комутатори; Н – навантаження.

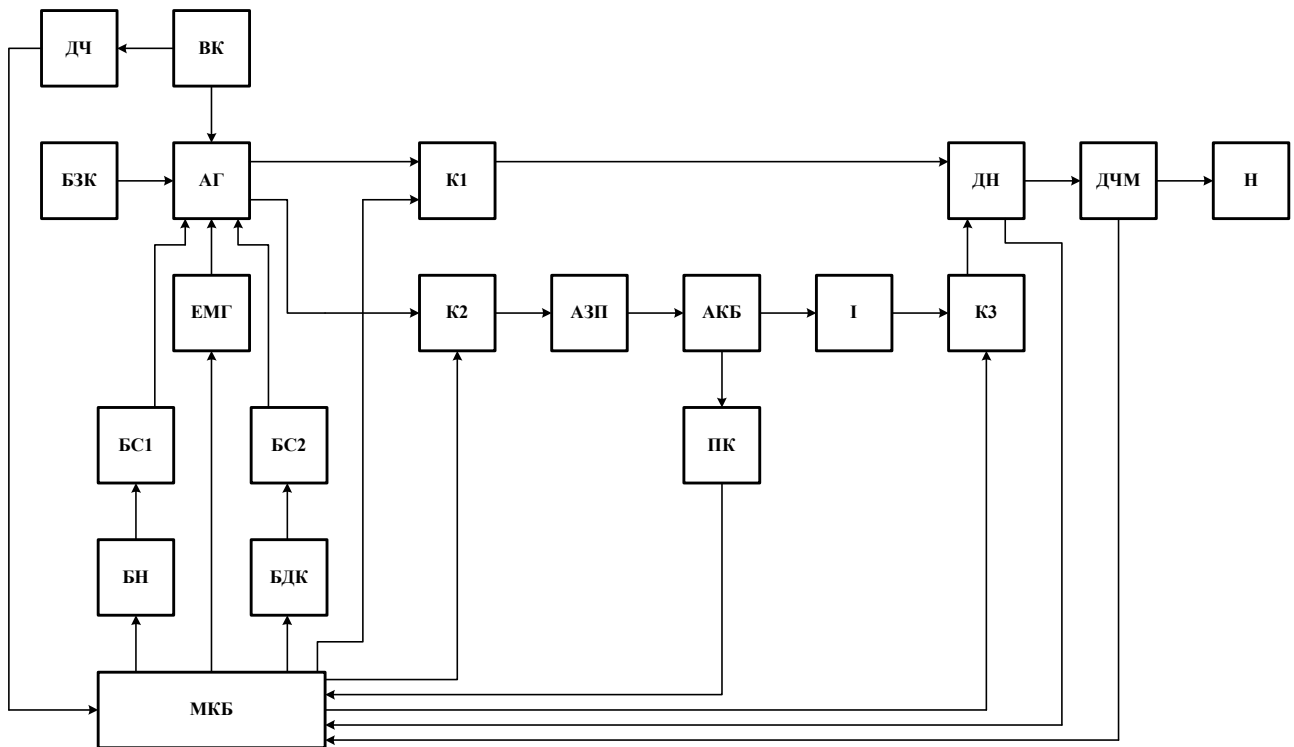


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи керування ВМЕ на базі асинхронного генератора

При нормальній роботі ВМЕ, відбувається електропостачання споживачів і заряд акумуляторних батарей. При аварійній ситуації, за допомогою відключення керованого комутатора, відбувається відключення навантаження від генератора, а за допомогою комутатора відбувається підключення навантаження до акумуляторної батареї через інвертор. Заряд акумуляторної батареї через комутатор відбувається до того часу, поки пристрій контролю стану акумуляторної батареї не виявить несправності або повного заряду акумуляторної батареї або автоматичний зарядний пристрій, в результаті невідповідності параметрів струму або напруги заряду, відключить акумуляторну батарею від генератора.

Під час обертання вітрового колеса та валу генератора, мікроконтролер аналізує величину сигналів, що надходять до нього, і робить висновок про величину заданої напруги для блоків симісторів. До того часу, поки ємність додаткових конденсаторів дозволяє регулювати величину вихідної частоти та напруги, ці параметри регулюються батареєю робочих конденсаторів. Якщо ж керування ємністю не приносить бажаного результату, а частота та напруга продовжують зростати, то напруга завдання подається на другу групу симісторів, які підключають баластне навантаження, яке регулює вихідну напругу та частоту.

Спираючись на наукові результати досліджень в роботах ряду авторів вхідними величинами для системи керування було визначено: частота обертання вітрового колеса $\omega_{ВК}$, швидкість вітрового вентиляційного потоку $u_{ВК}$, похідна від змінного значення швидкості вітрового вентиляційного потоку $du_{ВК}/dt$, струм навантаження ВМЕ $I_{н}$, вихідна напруга ВМЕ $U_{вих}$.

Структура регулятора побудована за каскадним принципом, таким чином, що внутрішній контур є контур регулювання напруги, а зовнішній контур є контур підтримання кутової швидкості вітрового колеса.

Використовуючи підхід та результати досліджень в роботах [4, 5], математичну модель контуру підтримання заданої кутової швидкості вітрового колеса ВМЕ можна записати у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\omega = \begin{cases} |\omega(t) - \omega_{опт}| - k_u \cdot u_{в.п.}(t), \text{ якщо } \frac{du_{в.п.}}{dt} < 0, \\ |\omega(t) - \omega_{опт}| + k_u \cdot u_{в.п.}(t), \text{ якщо } \frac{du_{в.п.}}{dt} > 0, \end{cases} \\ U_{завод}(t) = k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt. \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\Delta\omega$ – різниця між заданим і поточним значенням кутової швидкості; $\omega_{опт}$ – значення оптимальної швидкості обертання; $\omega(t)$ – значення кутової швидкості в поточний момент часу; k_v – коефіцієнт передачі по швидкості вентиляційного повітряного потоку; $u_{ВК}(t)$ – значення швидкості вентиляційного повітряного потоку в поточний момент часу; $u_{ВК}$ – змінне за $2T$ значення швидкості вентиляційного повітряного потоку (усереднення за $2T$); $du_{ВК}/dt$ – похідна від ковшного за $2T$ значення швидкості вентиляційного повітряного потоку; $U_3(t)$ –

завдання напруги ВМЕ в поточний момент часу; k_ω – коефіцієнт передачі по кутовій швидкості обертання колеса; T – період обертання вітрового колеса.

Зовнішній контур представлений контуром регулювання напруги, вхідним сигналом для якого є $U_3(t)$. Його математичну модель запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \Delta U = U_{завд.}(t) - (U(t) - k_I I_n(t)), \\ I_{упр.сигн.}(t) = k_{роб} \cdot \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right), \text{де} \begin{cases} \Delta U > 0, \text{мо } I_{смн} \\ \Delta U < 0, \text{мо } I_{БН} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

де ΔU – різниця між заданим і поточним значенням напруги; k_I – коефіцієнт передачі по струму навантаження; I_n – поточне значення струму навантаження ВМЕ, А; $I_{смн}$ – поточне значення ємнісного струму ВМЕ, А; k_u – коефіцієнт передачі по напрузі, $k_{роб}$ – дискретна величина, при якій можлива генерація електричної енергії при мінімально допустимій швидкості обертання ВК ω_{min} , причому $k_{роб} = 1$, якщо $\omega(t) \geq \omega_{min}$ і $k_{роб} = 0$, якщо $\omega(t) < \omega_{min}$ [4].

При використанні запропонованого закону регулювання, що адаптований до умов роботи ВМЕ з асинхронним генератором до умов ЗРШ, є можливість автоматично регулювати ємнісний струм ВМЕ для підтримки оптимального значення швидкості обертання вітрового колеса та отримання якісної згенерованої електричної енергії.

Так як при керуванні ВМЕ вхідними параметрами системи керування є невизначені дані, то ВМЕ працює по некерованому графіку. Характерною особливістю системи керування ВМЕ є те, що вона в умовах ЗРШ являється нелінійним та нестационарним об'єктом керування, так як вона знаходиться під впливом динамічних вентиляційних повітряних навантажень, які мають непередбачувані зміни енергетичних параметрів повітряного потоку [3].

Недостатнє врахування всіх факторів, які впливають на різницю між відносними значеннями швидкості повітряного вентиляційного потоку в виробках ЗРШ та швидкості обертання вітрового колеса ВМЕ, є істотним недоліком, щодо використання існуючих законів керування, що в свою чергу призводить до погіршення стійкості систем автоматичного керування, відхилення напруги на виводах ВМЕ. До вказаних факторів відносяться показники мікроклімату ЗРШ, де експлуатується ВМЕ. Врахування наведених факторів, які в свою чергу можуть змінюватися за складними залежностями та за великої кількості умов протягом певного часу, передбачає можливість зробити висновок щодо застосування математичного апарату нечітких множин для побудови моделі автоматичного регулятора.

В результаті аналізу роботи ВМЕ можна зробити висновок про те, що системи автоматичного керування для вітрових енергетичних установок, на основі нечітких регуляторів, довели свою ефективність шляхом покращення якості регулювання для одержання менших похибок в стаціонарних та перехідних режимах роботи [3]. Таким чином, вдосконалення закону керування можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить покращити якість регулювання вихідних параметрів згенерованої електричної енергії ВМЕ, що працює в умовах ЗРШ.

Враховуючи вище викладене, сигнали з датчиків передаються на регулятор, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування ємнісним струмом чи баластним навантаженням, для підтримки ємнісного струму, а отже і моменту навантаження, при якому встановиться оптимальна швидкість обертання вітроколеса ВМЕ, що сприяє максимальному відбору потужності необхідної якості.

Структурну схему каналу регулювання системи керування можна схематично представити у схематичному вигляді зображеному на рис. 2 [4].

Як видно з рис 2, на вхід нечіткого регулятора подаються такі сигнали – кутова швидкість обертання вітрового колеса $\omega_{ВК}$, швидкість вітрового потоку $u_{в.п.}$, похідна від змінного значення швидкості вітрового потоку $du_{з.в.п.}/dt$, та його похідної, оптимальне значення кутової швидкості $\omega_{опт}$. Вихідним сигналом каналу нечіткого регулятора системи керування є сигнал $U_{завд.}$ відпирання, який надходить до регулятора, який через блок керування змінює значення ємнісного струму та баластного навантаження.

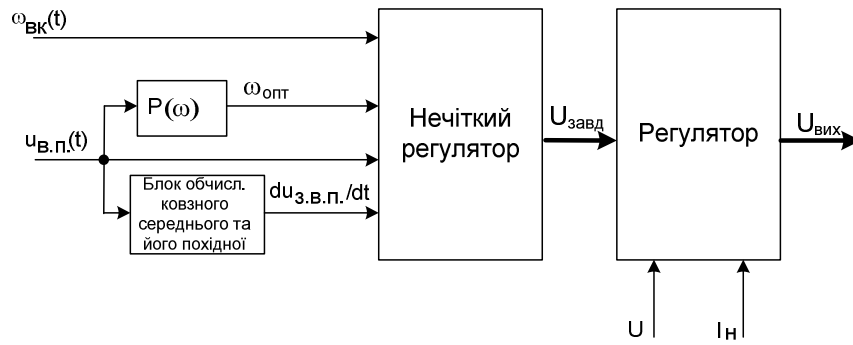


Рис. 2 Структурна схема каналу регулювання системи керування вітроенергетичною установкою

Структурну схему блоку нечіткого логічного висновку про значення величини заданої напруги керування, можна подати у вигляді (рис. 3).

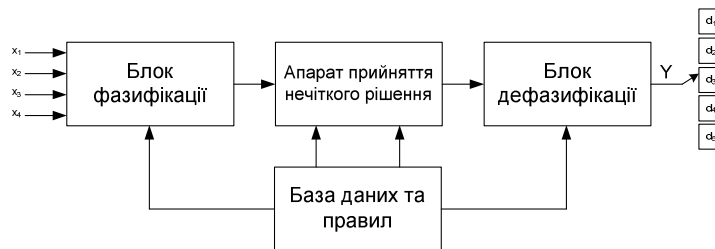


Рис. 3 Структурна схема блоку нечіткого логічного висновку системи керування ВМЕ

Автоматичне керування ємнісним струмом передбачається здійснювати в два прийоми, застосування кожного з них залежить від швидкості обертання вітрового колеса. А отже, при швидкості обертання вітрового колеса, що входить в діапазон швидкостей для генераторного режиму роботи асинхронного генератора пропонується використовувати математичну модель регулятора з використанням нечіткої логіки, при інших швидкостях, що не входять до згаданого діапазону достатньо використовувати ПІ-закон регулювання [5].

Таким чином, використавши запропонований закон [4-6] з врахуванням умов роботи ВМЕ в умовах підземних виробок ЗРШ із застосуванням асинхронного генератора, закон керування ВМЕ буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases}
 \Delta\omega = \begin{cases} |\omega(t) - \omega_{онм}| - k_u \cdot u_{в.п.}(t), & \text{якщо } \frac{du_{в.п.}}{dt} < 0, \\ |\omega(t) - \omega_{онм}| + k_u \cdot u_{в.п.}(t), & \text{якщо } \frac{du_{в.п.}}{dt} > 0, \end{cases} \\
 U_{завд.}(t) = \begin{cases} k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt; & \text{якщо } \omega_{ВК} \in [0; 0,9\omega_n] \cup [1,1\omega_n; 2\omega_n], \\ fuzzy(f_n, \omega_n, U_n, u_{в.п.}), & \text{якщо } U_{вих} \in [0,7U_n; 0,9U_n] \cup [1,1U_n; 1,3U_n], \end{cases} \\
 \Delta U = U_{завд.}(t) - (U(t) - k_I I_n(t)), \\
 I_{упр.сигн.}(t) = k_{роб} \cdot \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right), \text{ де } \begin{cases} \Delta U > 0, \text{ то } I_{емн} \\ \Delta U < 0, \text{ то } I_{БН} \end{cases} \\
 k_{роб} = 1, \text{ якщо } \omega(t) \geq \omega_{\min} \\
 k_{роб} = 0, \text{ якщо } \omega(t) < \omega_{\min}
 \end{cases} \quad (3)$$

З метою збільшення надійності функціонування системи керування ВМЕ у всьому діапазоні зміни швидкостей повітряного вентиляційного потоку пропонується застосування комбінації чіткого та нечіткого законів, у вигляді двох каналів керування регулятора з переключенням між ними у функції швидкості обертання вітрового колеса.

У зв'язку з тим, що використання класичних критеріїв стійкості у даному випадку не є можливим, тому для дослідження системи автоматичного регулювання на стійкість буде застосоване комп'ютерне моделювання

в середовищі MatLab 6.5. Застосування комп'ютерної моделі дозволить провести пошук оптимальних параметрів налаштування регулятора на роботу з ВМЕ.

Під час моделювання роботи ВМЕ із системою керування на базі нечітких правил були одержані графіки, які ілюструють особливості роботи ситеми керування (рис. 4-9).

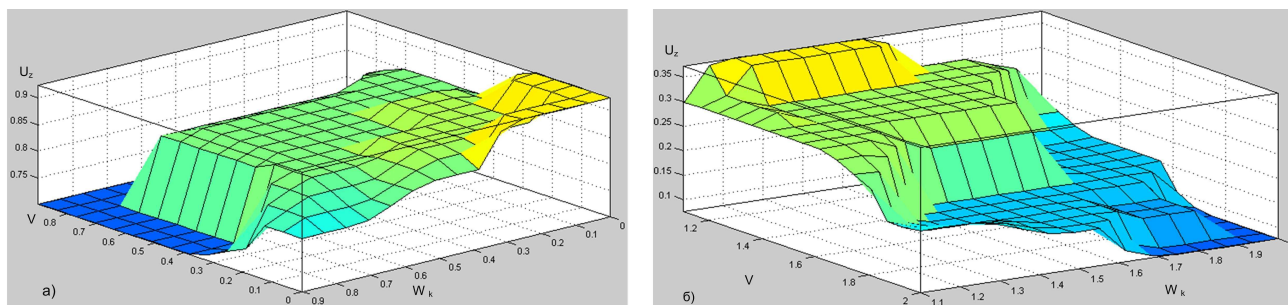


Рис. 4 Залежність напруги завдання: а) для блоку додаткових конденсаторів від вихідної частоти та напруги генератора, швидкості повітряного потоку та обертання вітрового колеса; б) для баластного навантаження від вихідної частоти та напруги генератора, швидкості повітряного потоку та обертання вітрового колеса

На рисунку 5 представлений графік зміни швидкості повітряного потоку протягом 50 с.

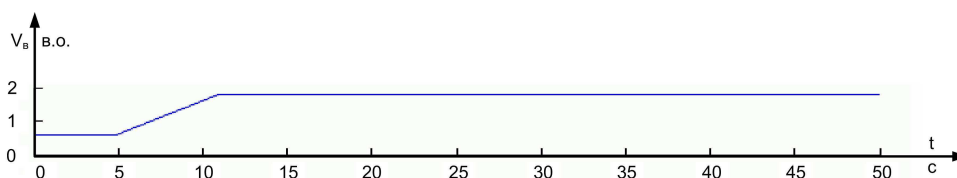


Рис. 5 Графік зміни швидкості повітряного потоку протягом 50с.

На рисунку 6 представлений графік зміни частоти обертання вітрового колеса зі зміною швидкості повітряного потоку

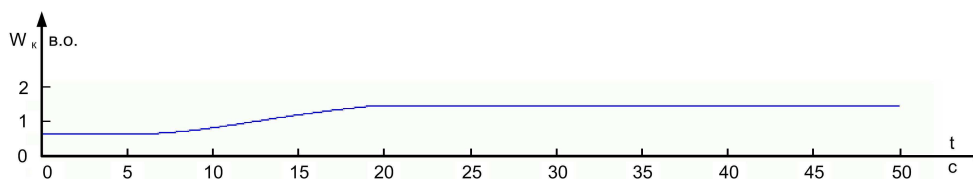


Рис. 6 Графік зміни частоти обертання вітрового колеса зі зміною швидкості повітряного потоку

Як видно із графіка, частота обертання вітрового колеса змінюється повільніше та більш плавно, ніж зростає швидкість повітряного потоку.

На рисунку 7 представлений графік зміни вихідної напруги генератора за певний проміжок часу зі зміною швидкості повітряного потоку.

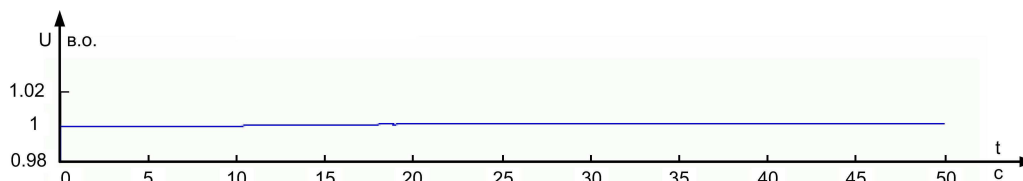


Рис. 7 Графік зміни вихідної напруги генератора за певний проміжок часу зі зміною швидкості повітряного потоку

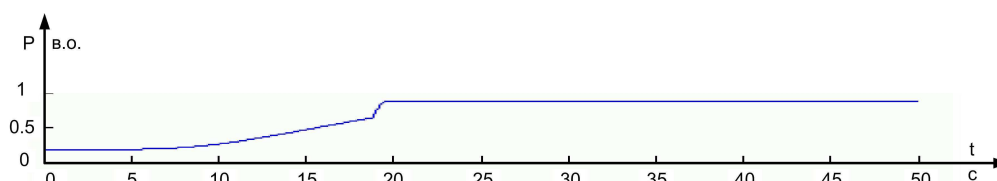


Рис. 8 Графік зміни виробленої генератором потужності

Як видно із отриманого графіка, значення згенерованої напруги залишається близькою до номіналу, незважаючи на зміну швидкості повітряного потоку.

На рисунку 8 представлений графік залежності виробленої генератором потужності від зміни швидкості повітряного потоку протягом певного проміжку часу.

Як видно із данного графіка (рис. 8), величина виробленої потужності збільшується при зростанні швидкості повітряного потоку та обертання ВК.

На рисунку 9 представлений графік зміни споживання реактивної потужності асинхронного генератора зі зміною швидкості повітряного потоку.

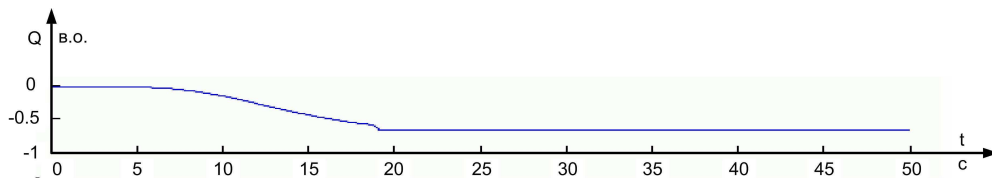


Рис. 9 Графік зміни споживання реактивної потужності асинхронного генератора

Як видно із графіку, асинхронний генератор зменшує споживання реактивної потужності із збільшенням кількості обертів вітрового колеса ВМЕ.

Такий варіант програмування дозволяє системі керування реагувати на будь-які зміни в ланках ВМЕ і відповідно до цих змін регулювати вихідні параметри асинхронного генератора.

Запропонована структура ВМЕ і система управління ним дозволяють збільшити надійність і якість електропостачання споживачів, збільшити термін служби батарей, забезпечувати своєчасні заміни елементів, що вийшли з ладу, і знизити витрати на їх експлуатацію, а також підтримувати безперебійність електропостачання споживачів ЕЕ [7].

Висновки. 1. В результаті використання вентиляційних повітряних потоків підземних виробок залізорудних шахт, з перетворенням вітрової енергії в електричну є реальна можливість генерувати і використовувати ЕЕ для власних потреб підземних підприємств, заощадивши при цьому засоби на її закупівлю.

2. Розроблену математичну модель та закон керування ємнісним струмом та баласним навантаженням ВМЕ, а також структуру системи автоматичного керування рекомендовано для використання при проектуванні ВМЕ в умовах підземних виробок ЗРШ.

3. Моделювання режимів роботи ВМЕ в умовах ЗРШ, показало що запропонована система керування ВМЕ зкорегована із врахуванням мікроклімату підземних виробок ЗРШ, оскільки запропоновано використовувати адаптовану систему автоматичного керування ВМЕ з комбінованим регулюванням.

Список літератури: 1. Шидловский А.К. Геоэкономика та геополітика України / А.К. Шидловский, Г.Г. Півняк, М.В. Рогоза, С.І. Випанасенко // навч. посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. – 282 с. 2. G. Moor and H. Beukes, "Power point trackers for wind turbines," Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004. 3. T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Optimum control of ipmsg for wind generation system," Power Conversion Conference (PCC), vol. 3, pp. 1435–1440, 2002. 4. Q. Wang and L.-C. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1242–1249, September 2004. 5. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, April 2006. 6. Сінчук О.М. Електромеханічний комплекс вітроенергетичної установки для використання в підземних виробках залізорудних шахт / О.М. Сінчук, С.М. Бойко // Восточно-европейский журнал передових технологий – Харків, 2013. – № 1/8 (67). – С. 13-21. 7. Сенько В.І. Математична модель системи керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної установки на базі fuzzy контролера / В.І. Сенько, С.М. Бойко, М.А. Щербак, А.О. Жуков // Електротехнічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук, КрНУ, 2013. – Вип. 3/2013 – 103-111 с.

Bibliography (transliterated): 1. Shidlovskij A.K., Pivnyak G.G., Rogoza M.V., Vipanashenko S.I. *Geoekonomika ta geopolitika Ukraini*. Dnipropetrovsk, 2007. Print. 2. G. Moor and H. Beukes, "Power point trackers for wind turbines," Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004. Print. 3. T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Optimum control of ipmsg for wind generation system," Power Conversion Conference (PCC), vol. 3, pp. 1435–1440, 2002. Print. 4. Q. Wang and L.-C. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1242–1249, September 2004. 5. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, April 2006. Print. 6. Sinchuk O.M., Bojko S.M. "Elektromehaničnij kompleks vitroenergetičnoji ustanovki dlya vikoristannja v pidzemnih virobkah zalizorudnih shaht." *Vostočno-evropejskij žurnal peredovih tehnologij*, № 1/8 (67) (2013): 13-21. Print. 7. Sen'ko V.I., Bojko S.M., Scherbak M.A., Zhukov A.O. "Matematichna model' sistemi keruvannja elektrotehničnim kompleksom vitroenergetičnoji ustanovki na bazi fuzzy kontrolera." *Elektrotehnični i energozberigayuchi sistemi. Tematičnij vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya j praktika» naukovovirobnichogo žurnalu*. 3/2013 (2013): 103-111. Print.

Надійшла (received) 25.08.2015