

3. **Козакевич І.А.** Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів [Текст] / **І.А. Козакевич** // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. - 2015. - С. 80-82.
4. **Olarescu N.V.** Optimum torque control algorithm for wide speed range and four quadrant operation of stator flux oriented induction machine drive without regenerative unit [Text] / **N.-V. Olarescu, M. Weinmann, S. Zeh, S. Musuroi, C. Sorandaru** / IEEE Energy conversion congress and exposition. – 2011. – P. 1773 – 1777.
5. **Власьєвський С. В.** Повышение эффективности работы электровоза переменного тока с плавным регулированием напряжения в режимах тяги и рекуперативного торможения [Текст] / **С. В. Власьєвський, В. Г. Скорик, Е. В. Бунаєва, Д. С. Фокін** // Електрифікація транспорту. - 2011. - № 1. - С. 30-34.
6. **Висин Н. Г.** Результаты исследований по повышению надежности работы системы автоматического управления в режимах тяги и рекуперативно-реостатного торможения на электропоездах ЭР2Т [Текст] / **Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, С. А. Соколов** // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2007. - Вип. 17. - С. 55-58.
7. **Козакевич І.А.** Исследование адаптивного наблюдателя полного порядка для низких угловых скоростей двигателя [Текст] / **І.А. Козакевич** // Перспективи розвитку сучасної науки: Міжнародна науково-практична конференція: матеріали конференції. - Херсон: Видавничий дім "Гельветика". - 2014. - С. 65-67.
8. **Сінчук О.М.** Аналіз способів покращення динамічних властивостей асинхронних електроприводів зі скалярним керуванням [Текст] / **О.М. Сінчук, І.А. Козакевич, Д.О. Швидкий** // Якість мінеральної сировини. Збірник наукових праць. - 2014. - С. 553.
9. **Козакевич І.А.** Дослідження адаптивних систем для бездатчикового керування асинхронними двигунами при роботі на низьких частотах обертів [Текст] / **І.А. Козакевич** // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. - 2014. - С. 29-31.
10. **Осадчук Ю.Г.** Алгоритм компенсації ефекту "мертвого часу" в трьохрівневих інверторах напруги [Текст] / **Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, І.О. Сінчук** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2010. – Вип. 1. – С. 38-41.
11. **Козакевич І.А.** Адаптивний спосіб компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги для бездатчикового векторного керування на низьких частотах обертів [Текст] / **І.А. Козакевич** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 1. – С. 19-25.

Рукопис подано до редакції 15.04.17

УДК 621.311.2+621.316.1

В.А. КОЛЬСУН, В.С. КОЗЛОВ¹, кандидати техн. наук
Криворізький національний університет

РЕЖИМИ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ТА МЕРЕЖІ ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Мета. Метою даної роботи є розробка методу автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи та включенням в продуктивну роботу початкової ділянки барабана технологічного агрегата. Подрібнення бідних залізних руд у перших стадіях відрізняється великими витратами, що в значній мірі викликано частковою або повною відсутністю інформації відносно деяких технологічних процесів, до яких можливо віднести і транспортування пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора, де недостатньо вивчений рівномірний рух пульпи.

Методи дослідження. Не розглядалося автоматичне керування розрідженням пульпи у кульовому млині, яке б сприяло створенню і підтриманню заданого співвідношення тверде/рідке у технологічному агрегаті при забезпеченні якісного перемішування матеріалів на початковій ділянці барабана, що значно підвищує ефективність роботи куль і не допускає перевитрати електричної енергії, куль і футеровки з одночасним підвищенням продуктивності по готовому продукту.

Наукова новизна. Розв'язання даної задачі складає актуальність роботи. Її метою є математичне моделювання рівномірного руху пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора з пошуком залежностей між основними параметрами та встановленням меж їх зміни при експлуатації технологічного обладнання.

Практична значимість. Отримані аналітичні залежності об'ємної витрати пульпи та швидкості її руху від висоти потоку. Між об'ємною витратою пульпи і висотою потоку спостерігається практично лінійна залежність. Недостатня вивченість процесів рівномірного руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора стримує розробку ефективних засобів контролю об'ємної витрати рідкої суміші у відкритих потоках і, як наслідок - автоматизацію технологічних процесів подрібнення вихідної руди у перших стадіях, що приводить до значних економічних збитків.

Результати. Початкова ділянка барабана кульового млина включається в продуктивну роботу при якісному осередненні вихідної руди, пісків односпірального класифікатора та води як за крупністю, так і вмістом води в суміші матеріалів. Оскільки при розвантаженні бункерів з вихідною рудою вона на конвеєрній стрічці розташовується циклічно з різною довжиною ділянок за крупністю, при завантаженні кульового млина також циклічно необхідно змінювати завдання на розрідження пульпи.

Ключові слова: односпіральный класифікатор, пісковий жолоб, рівномірний рух, моделювання, об'ємна витрата.

В статті розглянуто режими роботи паралельного генератора у слабкій мережі обмеженої потужності. В якості генератора може виступати об'єкт мережі з альтернативним джерелом енергії або електромеханічна система промислової мережі, що працює в режимі генерації. Застосування таких генераторів значно підвищує надійність електропостачання, дозволяє зменшити втрати при передачі енергії, а також надає можливість регулювати якість електроенергії в точці підключення генератора. Задача оптимального керування такими системами розподіленої генерації є однією із головних задач інтелектуальних мереж (Smart Grid та Micro Grid).

Щодо електромагнітної сумісності автономного генератора та мережі обмеженої потужності обов'язковим є виконання наступних умов: рівність ЕРС, рівність фаз та рівність частот генератора та мережі. Однак на теперішній час задача надійної синхронізації та оптимальне керування генерацією потужності автономного генератора в слабкій мережі є відкритими питаннями. Обидві названі задачі ускладнюються можливими негативними процесами, які мають місце в таких мережах (фазовий стрибок напруги мережі, забруднення напруги вищими гармоніками, поява згасаючої постійної складової, коливання частоти напруги тощо).

В роботі сформульовано дві основні задачі для автономного генератора: робота в режимі додаткового живлення навантаження та ліквідація дефіциту потужності з мінімізацією втрат потужності в мережі. Встановлено, що найдоцільнішим режимом передачі енергії генератора протягом циклу «накопичення – розряд» є робота з мінімально можливою напругою в мережі обмеженої потужності. Для забезпечення навантаження номінальним рівнем потужності при виникненні дефіциту потужності величина ЕРС генератора повинна дорівнювати ЕРС мережі.

Математичні викладки підтверджено моделювання однофазного генератора, який працює в режимі генерації синусоїдної напруги (Island mode). В ході моделювання також показано вплив вихідного фільтру такого генератора на фазу напруги в точці підключення.

Ключові слова: Smart Grid, інвертор, генератор, дефіцит потужності, синхронізація.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Однією із складових сучасних електромереж та складних електроенергетичних об'єктів є структура «випрямляч-інвертор» [1,3,6-8,13]. Зазначена електротехнічна система передбачає двосторонню передачу потужності та використовується у таких електротехнічних комплексах, як станції заряджання електротранспорту [12], генератори для джерел альтернативної енергії [7-9], активні випрямлячі поодиноких та групових електроприводів, силові активні фільтри [1,3] тощо. Особливу увагу слід звернути на використання інверторів у складі мережевих накопичувачів енергії та систем безперебійного живлення малої та великої потужності [2,13]. Як відомо, названі пристрої відіграють важливу роль у функціонуванні «розумної енергосистеми» (*англ.* Smart Grid). Оптимальне керування потужностями таких локальних генераторів є однією із основних задач інтелектуальних електромереж. Актуальність оптимального керування розподіленою генерацією потужності на промислових об'єктах підкреслюється, наприклад, тим фактом, що на залізничних підприємствах «90 % усього об'єму енерговитрат на виробництво продукції залізничної сировини складають електроенергетичні витрати» [5].

Переваги застосування інверторів з двосторонньою передачею потужності очевидні:

- робота в режимі споживача з коефіцієнтом потужності $K_p \rightarrow 1$ при коефіцієнті гармонік напруги (струму) $K_U < 5\%$;
- можливість генерації електроенергії до мережі;
- можливість роботи в режимах споживання або генерації реактивної потужності;
- можливість реалізації сумісних режимів роботи з одночасною корекцією показників якості електромережі (режим активного фільтру);
- стабільна робота в режимі споживача при значних відхиленнях напруги живлення;
- підвищення надійності електропостачання за рахунок генерації енергії до мережі в моменти виникнення дефіциту потужності.

Незважаючи на наведені переваги бракує ґрунтовних досліджень щодо електромагнітної сумісності інверторів із мережею в генераторному режимі роботи [10,11]. Особливо актуальним є питання аналізу електромагнітних процесів мережі обмеженої потужності з подальшою розробкою енергоефективних систем керування інвертором. Щодо системи керування напівпровідниковим генератором, наразі існує невирішена проблема надійної синхронізації такого генератора із слабкою мережею, до якою підключені нелінійні навантаження [15].

Отже, об'єктом досліджень обрано електромагнітну сумісність мережі обмеженої потужності та інвертора, що працює в якості генератора джерела додаткового живлення.

Метою роботи є розробка оптимальних за енергетичними критеріями способів керування генератором в режимі сумісної роботи з мережею обмеженої потужності.

Аналіз досліджень і публікацій. Існує багато топологій інверторів, що забезпечують двосторонній потік потужності [6,13]. Базовими структурами з точки зору способу генерації є

послідовний та паралельний генератори. Останній структурі надають перевагу. Стосовно реалізації самих інверторів найбільш доцільним рішеннями за критерієм «функціональність-ціна» є дворівневий інвертор напруги та струму (рис. 1). Застосування більш складних топологій може бути економічно недоцільним [13]. Наразі для однофазних та трифазних генераторів найбільш розповсюдженою є топологія дворівневого інвертора.

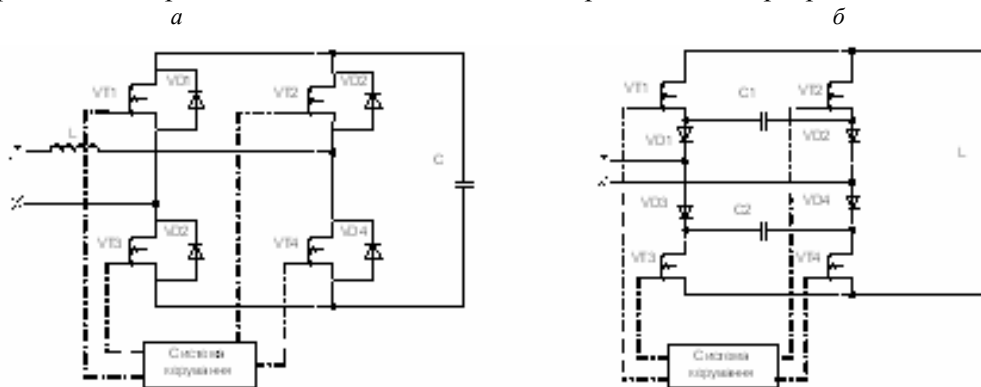


Рис. 1 Дворівневий інвертор напруги *a* та струму *б*

Стосовно взаємодії генератора та мережі, відомо, що для забезпечення електромагнітної сумісності необхідно виконати наступні умови [6]:

- рівність ЕРС генератора та мережі;
- рівність частот; рівність фаз генератора та мережі.

Невиконання однієї з умов веде до появи зрівнювальних струмів. Для більш повної оцінки таких струмів та зменшення їх рівня авторами [4] було виконано ряд теоретичних та практичних робіт, ідея яких ґрунтується на синхронізації роботи інверторів. Зазначимо, що об'єктом досліджень авторами обрано перетворювач частоти для асинхронного двигуна.

Іншими вченими було показано, що невірна синхронізація інвертора з мережею може призводити до збільшення напруги на інверторі та зменшенні напруги в мережі [6]. Однак в роботах згаданих авторів відсутні конкретні шляхи підтримки синхронізму генератора в реальному масштабі часу. Також бракує інформації про механізм розподілу генерованої до мережі потужності.

Постановка завдання. Для генератора локального накопичувача енергії можна сформулювати дві основні задачі: оптимальний за критерієм мінімуму мережевих втрат розподіл генерованої енергії протягом циклу «накопичення – генерація»

$$W_{\Delta P}(E_{gen}) \rightarrow \min \quad (1)$$

ліквідація дефіциту потужності навантаження.

Викладення матеріалу та результати. Для аналізу електромагнітних процесів в першому наближенні пропонується спростити мережу з генератором. Електромережу змінного струму на дискретних проміжках часу, з яких складається робота цифрової системи керування, можна розглядати як мережу постійного струму. Споживачем є активне навантаження R , підключене до мережі з еквівалентним опором R_{Net} . Останній опір є сумою внутрішнього опору джерела та лінії електропередач. Дефіцит потужності виникає при збільшенні співвідношення ($K=R_{Net}/R$). Тобто, при збільшенні навантаження вище номінального рівня його опір наближається до опору мережі (трансформатора). До мережі паралельно через ідеальні ключі підключено генератор (рис. 2).

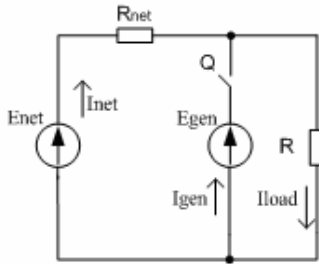


Рис. 2 Спрощена структурна схема паралельної генерації

В якості генератора виступає однофазний автономний споживач електроенергії (наприклад, споживач із джерелом живлення у вигляді сонячних батарей), який має надлишкову енергію. Цю енергію можна генерувати до мережі, яка живить власних споживачів (опір R на рис. 2). Задачею генератора є оптимальна за критерієм мінімуму втрат генерація надлишкової енергії (1).

В усталеному режимі при паралельній роботі генератора із мережею маємо наступні вирази для струмів:

$$I_{net} = \frac{E_{net} - E_{gen}}{R \cdot K} ; \quad (2)$$

$$I_{gen} = \frac{E_{gen}}{R} - \frac{E_{net} - E_{gen}}{R \cdot K} ; \quad (3)$$

$$I_{load} = \frac{E_{gen}}{R} . \quad (4)$$

В такому разі вираз для визначення втрат потужності в мережі складається із двох доданків для проміжків часу коли генератор підключений ($T = T_{on}$) та відключений ($T = T_{max} - T_{on}$)

$$W_{\Delta P} = I_{netOn}^2 \cdot (R \cdot K) \cdot T_{on} + I_{netOff}^2 \cdot (R \cdot K) \cdot (T_{max} - T_{on}), \quad (5)$$

де I_{netOn} , I_{netOff} - струми для проміжків часу підключеного та відключеного генератора відповідно; T_{max} - максимальний час роботи генератора.

Переписавши вирази струмів I_{netOn} та I_{netOff} отримаємо рівняння втрат потужності у наступному вигляді

$$\Delta P = \left(\frac{E_{net} - E_{gen}}{R \cdot K} \right)^2 \cdot (R \cdot K) \cdot T_{on} + \left(\frac{E_{net}}{R \cdot K + R} \right)^2 \cdot (R \cdot K) \cdot (T_{max} - T_{on}). \quad (6)$$

При генерації енергії до мережі важливим є мінімально припустимий рівень генерованої потужності, який еквівалентний до мінімального рівня напруги генератора E_{genMin} . Фізично, мінімально припустима напруга генератора, це є напруга, за якою струм паралельно підключеного генератора дорівнює нулю. В такому разі енергія не генерується до мережі.

$$I_{gen} = \frac{E_{gen}}{R} - \frac{E_{net} - E_{gen}}{R \cdot K} = 0 . \quad (7)$$

З наведеного рівняння (7) можна знайти вираз для самої напруги

$$E_{genMin} = \frac{E_{net}}{K + 1} . \quad (8)$$

Якщо позначити рівень енергії, яку генератор має передати до навантаження, як W_{gen} , то тривалість роботи генератора

$$T_{on} = \frac{W_{gen}}{E_{gen} \cdot \left(\frac{E_{gen}}{R} - \frac{E_{net} - E_{gen}}{R \cdot K} \right)} . \quad (9)$$

Реальний рівень мінімально припустимої напруги генератора пропонується прийняти на 10 % більшим, за значення E_{genMin} , при якому потужність генератора дорівнює 0.

$$U'_{min} = 1,1 E_{genmin} . \quad (10)$$

Тоді максимальний час роботи генератора за умови передачі до навантаження енергії

$$T_{max} = \frac{W_{gen}}{1,1 E_{gen} \cdot \left(\frac{1,1 E_{gen}}{R} - \frac{E_{net} - 1,1 E_{gen}}{R \cdot K} \right)} . \quad (11)$$

Підставивши вирази часу роботи (9 та 11) у вираз для визначення втрат потужності (6) отримаємо залежність, яка дозволяє зробити висновок про оптимальний за критерієм мінімуму мережних втрат режим генерації енергії (1). Враховуючи складність виразу вважаємо доцільним навести остаточний результат у вигляді графіку (рис. 3) у відносних одиницях.

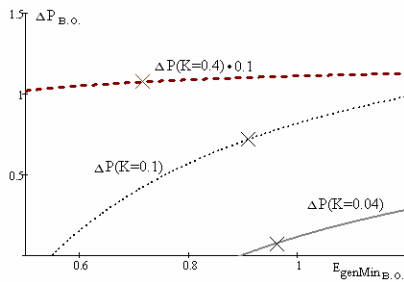


Рис. 3 Залежність втрат в мережі від ЕРС генератора при різних рівнях дефіциту потужності

На рис. 3 показані три випадки для зменшення рівня напруги навантаження на 4 %, 10 % та 40 % відповідно. Графічно показані точки мінімально припустимої ЕРС для генератора.

З отриманої залежності можна зробити висновок: оптимальним за критерієм мінімуму втрат в мережі є режим додаткового живлення навантаження з мінімально припустимою напругою. Інакше, генератор має передавати енергію до навантаження з мінімально можливим рівнем генерованої потужності. Обмеженням режиму передачі енергії є умова її повного споживання навантаженням до початку нового циклу роботи «акумуляція-генерація»

$$\begin{cases} E_{GenMin} \rightarrow \min \\ E_{Gen} \geq E_{min} \\ T_{on} = T \end{cases} \quad (12)$$

Для виконання задачі ліквідації дефіциту потужності на проміжку циклу T_{max} до навантаження необхідно передати енергію $\frac{E_{net}^2}{R}(T_{max})$, яка складатиметься із енергії мережі (в момент часу $T_{max} - T_{on}$, коли ключ Q закритий) та енергії генератора (в момент часу T_{on} , коли ключ Q відкритий). Якщо до рівнянь ввести коефіцієнт заповнення імпульсів $DT = T_{on}/T_{max}$ та прийняти $E_{gen} = \Delta E \cdot E_{net}$, то маємо рівняння енергії, яку необхідно передати навантаженню.

$$\frac{E_{net}^2}{R}(T_{max}) = DT \cdot \frac{(\Delta E \cdot E_{net} + E_{net})^2}{R} + (1 - DT) \left(\frac{E_{net}}{R + R \cdot K} \right)^2 R. \quad (13)$$

Рівняння втрат в мережі при цьому виглядає так

$$W_{\Delta P} = DT \cdot \frac{(\Delta E \cdot E_{net})^2}{R \cdot K}. \quad (14)$$

Рівняння (13) у відносних одиницях дає змогу отримати рішення для коефіцієнту заповнення імпульсів DT при різних значеннях ΔE та визначеному K . Наприклад, для $K=0,4$ (еквівалентний опір мережі дорівнює 40 % від опору навантаження) маємо залежності, показані на рис. 4.

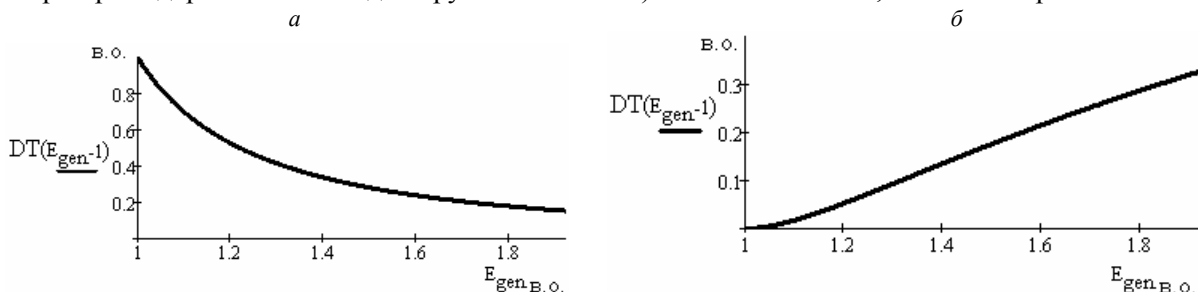


Рис. 4 Залежність ЕРС генератора та необхідного DT для ліквідації дефіциту потужності а та залежність втрат в мережі б при різних значеннях ЕРС генератора

Отже, оптимальним для задачі компенсації дефіциту потужності є режим роботи $E_{Gen} = E_{net}$. При зменшенні ЕРС генератора забезпечити навантаження необхідним рівнем потужності неможливо в той час, як збільшення ЕРС генератора відносно ЕРС мережі призводить до збільшення втрат.

Експериментальна перевірка результатів. Для експериментального підтвердження аналітичних результатів було проведено моделювання паралельної роботи однофазного генератора та мережі 0,4 кВ. Генератор є складовою частиною системи живлення споживача з автономним джерелом енергії (наприклад, сонячні батареї). На проміжку циклу роботи, який триває 24 години, автономний споживач накопичує ≈ 4 кВт·год надлишкової енергії, яка може бути генерована до мережі живлення. Максимальний час, відведений на генерацію надлишкової енергії, становить 2 години.

Задачею генератора є оптимальна за критеріями мінімуму втрат та якості електроенергії передача накопиченої енергії до мережі.

Функціональна схема моделі наведена на рис. 5. Параметри моделі наступні: діюче значення ЕРС мережі змінного струму 220 В; еквівалентний активний опір мережі 4 Ом; еквівалентна індуктивність мережі 5 мГн; опір навантаження 10 Ом (співвідношення опорів мережі та навантаження $K=0,4$). Інвертор виконано на основі повномостової схеми із трикутним сигналом завдання 5 кГц для ШІМ модуляції. Параметри вихідного LC фільтру: $L_f=6$ мГн та $C_f=2,2$ мкФ відповідно. Моделювання виконано у середовищі PSIM.

Слід звернути увагу на спосіб керування Н-мостом: особливістю обраного способу керування є використання обох нульових векторів на періоді формування дискретного рівня напруги (вираз 16). Якщо частота опорного сигналу $f_c = 5$ кГц, тривалість імпульсу дорівнює $t_{imp} = f_c^{-1} = 200$ мкс, кількість імпульсів на періоді напруги ($T_{net} = 20$ мс) $N = T_{net} / t_{imp} = 100$. Рівняння проміжку часу ввімкненого та вимкненого станів силових ключів

$$t_{imp} = t_{offLow} + \frac{t_{on}}{2} + t_{offHigh} + \frac{t_{on}}{2}, \quad (15)$$

де t_{offLow} - час вклучених ключів VT3 ^ VT4 (рис. 5); $t_{offHigh}$ - час вклучених ключів VT1 ^ VT2 (рис. 5); t_{on} - час вклучених ключів VT1^VT4 або VT2^VT3 (рис. 5).

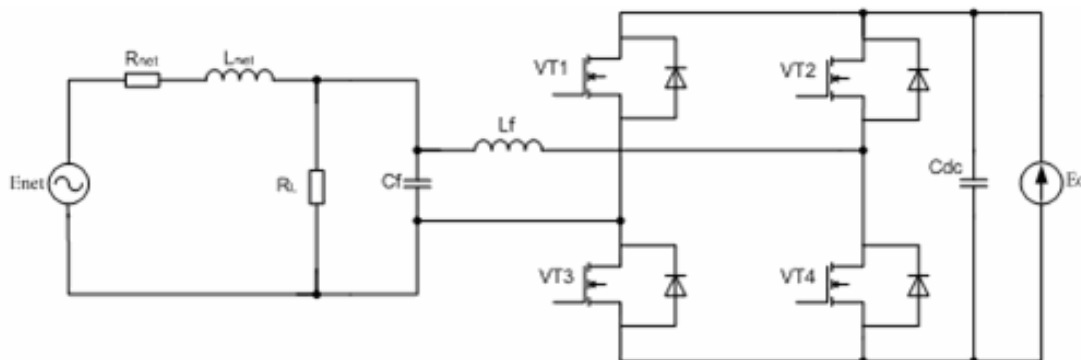


Рис. 5 Функціональна схема моделі

Результати моделювання для трьох режимів роботи представлені в таблиці.

Нагадаємо, що фаза синусоїдної напруги інвертора повинна співпадати із фазою напруги мережі живлення. Для сучасних електронних генераторів на базі силових ключів надійна синхронізація з напругою слабкої мережі, забрудненою вищими гармоніками, є відкритим питанням. Фазовий зсув напруг залежить від параметрів фільтру та величини навантаження. Для LC фільтру та структурної схеми (рис. 5) фазовий зсув описує вираз

$$\Delta\varphi(R_L) = \arg\left(1 - 4\pi^2 L^2 f^2 + \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot f}{R_L} \cdot i\right) \quad (17)$$

Відповідно до результатів моделювання втрати в мережі при роботі в режимі ліквідації дефіциту потужності із забезпеченням номінальної напруги на навантаженні майже в 2 рази перевищують втрати при роботі в режимі додаткового живлення, та на 54% більші за втрати в режимі роботи з мінімально припустимим за стандартом рівнем напруги [14]. Аналогічними є рівні енергії, спожитої із мережі: найменше значення спожитої енергії має місце в режимі додаткового живлення з мінімальною напругою генератора.

Результати моделювання паралельної роботи генератора

Режим роботи	Потужність/ енергія	Навантаження	Генератор	Втрати в мережі	Мережа	Напруга на навантаженні	Час роботи
Режим додаткового живлення	P , Вт	3315	2016	332	1669	182	2
	ΣW , Вт-год	6630	4032	664	3338		
Режим ліквідації дефіциту потужності (граничне значення -10% U_m)	P , Вт	4015	3078	86	878	200	1,31
		2437	0	974	3412	156	0,69
	ΣW , Вт-год	6941	4032	784	3504		
Режим ліквідації дефіциту потужності (нормальне значення +3,6% U_m)	P , Вт	5202	5470	18	-308	228	0,73
		2437	0	974	3412	156	1,27
	ΣW , Вт-год	6892	4032	1250	4109		

Висновки. В роботі виконано аналіз режимів генерації енергії до мережі обмеженої потужності із використанням силового інвертора.

Сформульовано дві задачі для режимів генерації: оптимальна за критеріями мінімуму втрат генерація енергії до мережі та ліквідація дефіциту потужності.

Отримано аналітичні вирази для обчислення мінімально припустимого рівня напруги генератора. Встановлено, що для мінімізації енергії мережевих втрат інвертор повинен генерувати потужність при мінімально припустимому рівні напруги, який повинен бути не менше, ніж поточне діюче значення напруги на навантаженні. Додатково повинна виконуватися умова повної передачі надлишкової енергії генератора за відведений на генерацію проміжок часу.

Для ліквідації дефіциту потужності із мінімумом мережевих втрат ЕРС інвертора має дорівнювати ЕРС мережі.

Список літератури

1. **Бялобржеський О.В.** Комбінована система керування асинхронним генератором із компенсацією реактивної потужності у вузлі електричної мережі / **О.В. Бялобржеський, Л. Г. Свтушенко** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2016. – Вип. 1/2016 (33). – С. 83–89.
2. **Климов В.П.** Топологии источников бесперебойного питания переменного тока (ИБП) / В.П. Климов, А.А. Портнов, В.В. Зуенко // Электронные компоненты, 2003. – №7. С. 14-18.
3. **Козлов В.С.** Аспекти впровадження силових активних фільтрів на промислових об'єктах / **В.С. Козлов, І.І. Пересунько, А.О. Антоненко** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2016.-№3(126).-С.46-49.
4. **Мальшков Г.М.** Параллельная работа инверторов / Г.М. Мальшков // Практическая силовая электроника. – 2009. – №3 (35). – С. 3-8.
5. **Синчук О.Н.** Система управления электропотреблением горнорудных предприятий с целью повышения электроэнергоэффективности добычи железорудного сырья / **О.Н. Синчук, И.О. Синчук, С.Н. Бойко** // Технічна електродинаміка, 2016. - №6. – С. 60-62.
6. **Труднев С.Ю.** Исследование параллельной работы ШИМ-инвертора и однофазной сети / **С.Ю. Труднев** // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2014. – №6. – С.60-66.
7. **Bascope R.** Multi-state commutation cells to increase current capacity of multi-level inverters / **R. Bascope, J. Neto, G. Bascope** // Telecommunications Energy Conference (INTELEC), October 2011.
8. **Bauer J.** Solar power station output inverter control design / **J. Bauer, J. Lettl** // Radioengineering. – 2011. – Vol. 20, no. 1. – P.258-262
9. **Bortis D.** η -Pareto Optimization and Comparative Evaluation of Inverter Concepts considered for the GOOGLE Little Box Challenge / **D. Bortis, D. Neumayr, J. W. Kolar** // Proceedings of the 17th IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL 2016), Trondheim, Norway, June 27-30, 2016.
10. **Martins A.** Robust converter synchronization to a weak grid through a DFT-based method / **A. P. Martins, J. C. Ferreira** // Renewable Energy & Power Quality Journal. – 2006. – Vol. 1, No.4. –P.57-63.

11. **Rigbers K.** High-efficient Soft-Switching Converter for Three-Phase Grid Connections of Renewable Energy Systems / **K. Rigbers, P. Lurkens, M. Wendt and other** // Power Electronics and Drives Systems Conference (IEEE PEDS 2005), February 2006. – pp.246-250.
12. **Shi L.** The Bi-directional Three-Phase PWM Rectifier Inverter for Electric Vehicle Charging Station / **Lei Shi, Haiping Xu, Dongxu Li, Zuzhi Zhang, Yuchen Han and Zengquan Yuan** // Journal of Energy and Power Engineering. – 2013. – No. 7. – pp.1370-1376.
13. **Uemura H.** System-level optimization of three-phase three-level T-type UPS system: dissertation for the degree of Doctor of Sciences / ETH.- Zurich, 2015.- 168 p.
14. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.- М.: Издательство стандартов, 1999.- 31 с.
15. **Yang J.-Z.** A precise calculation of power system frequency and phasor / **J.-Z. Yang, C.-W. Liu** // IEEE Transactions on Power Delivery. - April 2000. - Vol. 15, no 2. - P. 494-499.
Рукопис подано до редакції 05.04.2017
УДК 622.235: 622.271

А.А. СКАЧКОВ, гірничий інженер, начальник департаменту технологій і планування виробництва ГДД, ООО «МЕТІНВЕСТ ХОЛДИНГ»

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ УСТУПУ

У статті аналізуються умови, за яких вибухове руйнування кристалічних порід здійснюється за допомогою взаємодіючих свердловинних зарядів бризантних вибухових речовин. При цьому враховується суперпозиція пружних хвиль, випромінених від різних рядів свердловин та відображених від поверхонь уступу.

Мета. Головна мета дослідження – визначити основні, найбільш суттєві фактори, що впливають на властивості порід і складених ними масивів, конкретно – на поширення в них акустичних хвиль. Мета ця присвячена вирішенню нагальної проблеми скорочення питомого споживання вибухових речовин для дроблення породи шляхом зміни порядку виконання технологічних операцій і параметрів свердловинних зарядів з урахуванням анізотропії порід, що підриваються.

Методи досліджень полягають в аналізі геологічних даних по залізородних родовищах Кривбасу, проектної документації, виробничих даних гірничих підприємств і кар'єрів, наукових публікацій та їх подальшому синтезу й формулюванні розроблених положень у відповідності до надійно апробованих методів.

Наукова новизна полягає у виконанні дослідження хвильових процесів в породному масиві відомими способами, але відповідно до сформованої методичної послідовності та структурної алгоритмізації, цільова орієнтація яких конкретно відповідає поставленим цілям.

Практичне значення виконаного аналізу полягає в підтвердженні придатності аналізованих методів для вирішення інженерних і прикладних задач досліджень у викладеній постановці.

Результати. Виконаний аналіз хвильових процесів в пружному середовищі, яке представлене скельним субстратом, підтвердив, що для вирішення задач управління суперпозицією (взаємодією) хвиль в цьому середовищі цілком можна застосувати випробувані методи. Отримані результати підтверджують доцільність прийнятої схеми й алгоритму обчислювальних операцій для умов дроблення скельного субстрату свердловинними зарядами.

Оригінальність полягає в тому, щоб визначити комплексний підхід до вирішення поставленого завдання і ряд пріоритетних технічних рішень.

Висновки. Подальший розвиток і застосування результатів досліджень забезпечить значне зниження собівартості залізородної продукції за рахунок підвищення ефективності буропідривноїх робіт в кар'єрі.

Постановка проблеми. Наукові дослідження та виробнича практика буро-вибухових робіт (БВР) в кар'єрах свідчать про те, що уступ порід найбільш нерівномірно руйнується в зоні, прилеглої до укосу, в результаті чого утворюється гірнича маса з найбільш неоднорідною кускуватістю [1-3]. Винятково складний напружено-деформований стан масиву в цій частині при взаємодії свердловинних зарядів між собою та породними оголеннями є однією з найбільш складних задач теорії вибухового руйнування скельних масивів, тому пошук шляхів її вирішення є вельми актуальним [2], так як сприяє вирішенню проблеми підвищення ефективності БВР.

Аналіз досліджень щодо вибухового руйнування кристалічних масивів [3-4] підтверджує, що одним з *найменш вивчених* є нерівномірний вплив на формування вибухом навантаження крайової частини уступу, оптимізувати що є можливим при цілеспрямованому використанні ефектів розвитку динамічної зони руйнування, створюваної силовими полями взаємодіючих зарядів ВР приконтурних рядів [4-5]. У зв'язку з цим в дослідження закладалася ідея