

ГІДРО-ДИЗЕЛЬНА АВТОНОМНА ЕНЕРГОСИСТЕМА З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Розглянуто схемне рішення гідро-дизельної автономної енергосистеми змінного струму. Наведено результати моделювання електромеханічних процесів в розглянутій системі.

Комбіноване використання різних джерел енергії в сучасних автономних енергосистемах (АЕ), які живлять віддалені від централізованих мереж об'єкти, є усталеною тенденцією. Беззаперечно, ідеальним рішенням при побудові таких АЕ слід вважати рішення, які дозволяють повністю відмовитись від споживання невідновлюваних джерел енергії (нафтопродукти). Проте, на жаль, такі проекти через мінливість відновлюваних джерел енергії впродовж доби та року (енергія сонця, вітру, гідроенергія річок і морських хвиль) є, як правило, надзвичайно коштовними. Зважаючи на це, зусилля науковців, які досліджують і розробляють АЕ, доцільно зосереджувати на розвитку наукових основ побудови та вдосконаленні характеристик комбінованих, чи як ще їх називають, гібридних АЕ. Гібридні АЕ в Україні розробляються, але, як правило, з енергоблоків і вузлів іноземного виробництва за технічної підтримки іноземних фірм. Така ситуація навряд чи може вважатись задовільною з точки зору перспектив розвитку пов'язаних з виробництвом електротехнічного обладнання вітчизняних підприємств. А отже, дослідження в галузі розробки наукових основ створення і вдосконалення характеристик АЕ є актуальними.

В даній роботі розглянуто схемне рішення і запропоновано алгоритми керування складовими елементами гідро-дизельної АЕ змінного струму (Рис. 1) з асинхронними генераторами з КЗ ротором.

АГ з КЗ ротором є безконтактними і простими в обслуговуванні електричними машинами. Їх вартість менша вартості синхронних генераторів співставної потужності. Для зменшення вартості в АЕ застосовано нерегульовану приводну гідротурбіну (ГТ).

Розглянемо загальні принципи і особливості побудови та функціонування представленої АЕ.

Нерегульована гідротурбіна є приводом АГ2. Частота її обертання залежить як від рівня напору води, так і навантаження на валу. Вали АГ2 і ГТ між собою жорстко зв'язані. Збудження АГ2 відбувається від батареї конденсаторів C_A, C_B, C_C (ємнісне збудження). Споживачі електроенергії представлені еквівалентними опорами Z_A, Z_B, Z_C , які підключені до фаз статора АГ2. Паралельно АГ2 через фільтрові дроселі підключено вентильний перетворювач ВП2 на повністю керованих ключах $S7 \dots S12$, зібраний по схемі автономного інвертора напруги. Клеми постійного струму ВП2 шунтовано батареєю електролітичних конденсаторів C_{d1} і баластним резистором з опором R_B , який комутується ключем S_B . ВП2 відповідальний в системі за стабілізацію частоти і величини напруги, яка надходить споживачам. Якщо відключити ВП2 від АГ2 і споживачів, то при малих навантаженнях на АЕ частота напруги буде завищеною, а при великих – навпаки, нижче допустимої. Що стосується діючого значення напруги, то його величина, як відомо з теорії АГ з ємнісним збудженням, суттєво залежить від частоти обертання АГ і крім цього, від характеру і величини навантаження.

АГ1 має вентильну систему збудження побудовану на основі вентильного перетворювача ВП1, що як і ВП2, реалізований за схемою автономного інвертора напруги на повністю керованих вентилях ($S1 \dots S6$). Його приводом є дизельний двигун (ДД). ВП1 по шині постійного струму підключений паралельно ВП2 і може обмінюватись з ним активною потужністю. Крім того, ВП1 регулює величину фазної напруги АГ1.

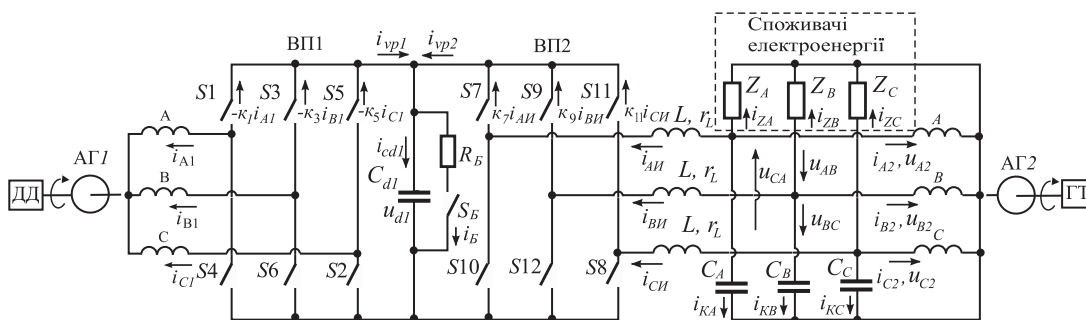


Рис. 1. Схема включення генераторів в АЕ

Одним з основних принципів, які закладаються в алгоритм керування гібридних АЕ з дизельними генераторами, полягає в тому, що добовий час роботи дизеля повинен бути



Таблиця 1.

| Елементи АЕ | Функціональне призначення | Тривалість роботи впродовж доби |
|-----------------|--|--|
| ГТ | Постачає механічну потужність АГ2 | Працює постійно, крім аварійних ситуацій пов'язаних з нею і АГ2 |
| ДД | Постачає механічну потужність АГ1 | Працює в часи "пік" або при пошкодженні АГ2 чи ГТ |
| АГ1 | Електромеханічне перетворення енергії | – " – |
| АГ2 | – " – | Працює постійно, крім аварійних ситуацій пов'язаних з ним і ГТ |
| ВП1 | Збудження і стабілізація напруги АГ1, робота в якості регульованого випрямляча | Починає працювати після виходу дизеля на номінальні оберти, припиняє працювати по команді на зупинку дизеля |
| ВП2 | Стабілізація величини і частоти напруги в автономній мережі | Працює постійно. При його пошкодженні споживачі повинні бути миттєво знеструмлені з метою захисту від перенапруг, генератори повинні бути зупинені |
| R_B і S_B | Стабілізація напруги на конденсаторі C_{d1} | – " – |
| C_A, C_B, C_C | Збудження АГ2, згладжування вищих гармонік напруги, що вносяться роботою ВП2 | – " – |
| L | Згладжування вихідних струмів ВП2 | – " – |
| C_{d1} | Згладжування пульсацій напруги в колі постійного струму | – " – |

максимально можливо мінімізований. Якщо застосувати цей принцип до гідро-дизельної АЕ, то це означає, що основним джерелом енергії для АЕ, знову ж, якщо це технічно можливо, повинен бути гідрогенератор, а допоміжним або резервним – дизельний генератор. Іншими словами систему бажано проектувати так, щоб дизельний генератор працював лише в часи "пік" або у випадку виходу з ладу гідрогенератора.

Виходячи з викладеного, функціональне призначення елементів АЕ (Рис. 1) та відомості щодо тривалості їх роботи впродовж доби викладено в Табл. 1.

Математичне моделювання АЕ. Математичне моделювання є необхідним і важливим етапом в проектуванні складних електромеханічних систем. За наявності адекватної моделі автономної енергосистеми з'являється можливість досліджувати перехідні процеси в енергосистемі та перевірити її працездатність, коректувати алгоритми роботи систем керування елементів АЕ.

Як правило, для складних систем при розробці їх моделей застосовують структурний підхід. Скористаємось ним і в даному випадку. Розглянемо моделі окремих структурних елементів і рівняння зв'язку між ними.

1. *Дизельний двигун.* Для спрощення загальної моделі приймаємо його частоту обертання постійною. Отже дизельний двигун описується єдиним рівнянням

$$\omega_{M1} = \text{const},$$

де ω_{M1} – механічна кутова частота обертання ротора.

2. *Асинхронні генератори АГ1, АГ2.* В якості генераторів застосуємо чотириполюсні асинхронні машини (АМ) 4А250S4УЗ з номінальною потужністю 75 кВт. Для їх моделювання скористаємось системами рівнянь АМ в фазних координатах статора з врахуванням насичення по основній гармоніці поля [1].

Вхідними даними для моделі АГ в фазних координатах статора незалежно від типу системи збудження є миттєві величини електричної кругової частоти обертання ротора (дорівнює круговій частоті обертання результуючого вектора напруги статора відносно системи координат, яка обертається з частотою ковзання: $\omega_1 = p\omega_{M1}$, $\omega_2 = p\omega_{M2}$, де p – число пар полюсів) і фазних напруг, а вихідними – фазних струмів і електромагнітного моменту (в АГ1 лише фазні струми, оскільки частота обертання вала АГ1 постійна).

3. *Вентильний перетворювач ВП1.* Фазні напруги АГ1, які формує ВП1, можна визначити з наступних рівнянь [4]

$$u_{A1} = u_{d1} \left(\frac{2}{3}k_1 - \frac{1}{3}k_3 - \frac{1}{3}k_5 \right), u_{B1} = u_{d1} \left(\frac{2}{3}k_3 - \frac{1}{3}k_1 - \frac{1}{3}k_5 \right),$$

$$u_{C1} = u_{d1} \left(\frac{2}{3}k_5 - \frac{1}{3}k_1 - \frac{1}{3}k_3 \right).$$

де $k_i = \begin{cases} 1, & \text{ключ замкнений} \\ 0, & \text{ключ розімкнений} \end{cases}$, $i = 1, 3, 5$; k_i – комутаційна функція i -го ключа.

4. *Вентильний перетворювач ВП2.* Математична модель ВП2 з врахуванням схеми включення і прийнятих на Рис. 1 позначень набуває вигляду

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{AI}}{dt} \\ \frac{di_{BI}}{dt} \\ i_{CI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{d1}(k_{11} + k_9 - 2k_7) - 3r_L i_{AI} + 2u_{AB} + u_{BC}}{3L} \\ \frac{u_{d1}(k_{11} - 2k_9 + k_7) - 3r_L i_{BI} - u_{AB} + u_{BC}}{3L} \\ -i_{AI} - i_{BI} \end{bmatrix}$$

де k_i – комутаційна функція i -го ключа, $i = 7, 9, 11$;
 $u_{AB} = u_A - u_B$; $u_{BC} = u_B - u_C$.

5. *Конденсатор C_{d1} .* Зміна в часі напруги на конденсаторі C_{d1} описується рівнянням

$$\frac{du_{d1}}{dt} = \frac{i_{VP1} + i_{VP2} - i_B}{C_{d1}},$$



$$i_{VP1} = -k_1 i_{A1} - k_3 i_{B1} + (i_{A1} + i_{B1}) k_5;$$

$$i_{VP2} = k_7 i_{AI} + k_9 i_{BI} - (i_{AI} + i_{BI}) k_{11}.$$

6. *Баластний резистор* R_B . Приймаємо безіндуктивним. Тоді миттєвий струм через нього визначається рівнянням

$$i_B = k_B (u_{d1}/R_B),$$

де k_B – комутаційна функція ідеального ключа S_B , $k_B = 0(1) - S_B$ розімкнений (замкнений).

7. *Система збудження АГ2*. Приймаємо $C_A = C_B = C_C = C$. Тоді напруги на конденсаторах будуть визначатись за допомогою наступних диференціальних рівнянь

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{A2} \\ u_{B2} \\ u_{C2} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_{KA} \\ i_{KB} \\ i_{KC} \end{bmatrix}.$$

Приймавши до уваги рівняння зв'язку між АГ2, ВП2 і навантаженням

$$i_{KA} + i_{AI} + i_{ZA} + i_{A2} = 0, \quad i_{KB} + i_{BI} + i_{ZB} + i_{B2} = 0,$$

$$i_{KC} - (i_{AI} + i_{BI}) + i_{ZC} + i_{C2} = 0,$$

одержуємо

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{A2} \\ u_{B2} \\ u_{C2} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} -i_{AI} - i_{ZA} - i_{A2} \\ -i_{BI} - i_{ZB} - i_{B2} \\ i_{AI} + i_{BI} - i_{ZC} - i_{C2} \end{bmatrix}.$$

Приймаємо $Z_A = Z_B = Z_C$. Тоді диференціальні рівняння, що описують процеси в навантаженні, приймають наступний вигляд

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ZA} \\ i_{ZB} \\ i_{ZC} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_H} \begin{bmatrix} u_{A2} - r_H i_{ZA} \\ u_{B2} - r_H i_{ZB} \\ u_{C2} - r_H i_{ZC} \end{bmatrix}.$$

де r_H, L_H – активний опір і індуктивність фази навантаження.

8. *Гідротурбіна*. Прийемо, що при незмінній величині напору води механічна характеристика гідротурбіни лінійно падаюча. Тобто із збільшенням моменту на валу ГТ пропорційно зменшується її кутова механічна частота обертання і відповідно механічна частота обертання ротора АГ2 ω_{M2} . Виходячи з даного допущення отримуємо

$$\frac{M_T - M_{TN}}{M_{T0} - M_{TN}} = \frac{\omega_2 - \omega_N}{\omega_0 - \omega_N}, \text{ або}$$

$$M_T = \frac{(M_{T0} - M_{TN})(\omega_2 - \omega_N)}{\omega_0 - \omega_N} + M_{TN}, \quad (1)$$

де M_T – приведений до валу АГ2 поточний момент ГТ; M_{T0}, M_{TN} – приведені до валу АГ2 моменти ГТ двох точок механічної характеристики ГТ

($M_{TN} > M_{T0}$), яким відповідають кругові електричні частоти обертання ротора АГ2 ω_0 та ω_N ; ω_2 – кругова електрична частота обертання ротора АГ2, якій відповідає момент M_T .

Сумарний момент тертя турбіни і АГ2 прийемо лінійно залежним від ω_2

$$M_{TP} = k_{TP} (\omega_2 / \omega_0), \text{ де } k_{TP} = \text{const.} \quad (2)$$

При жорсткому зв'язку між валами турбіни і АГ2 зміна ω_2 в часі визначається наступним виразом

$$\omega_2 = \frac{1}{J} \int (M_T - M_{G2} - M_{TP}) dt, \quad (3)$$

де M_{G2} – гальмівний момент АГ2; J – результуючий момент інерції системи ГТ–АГ2 приведений до валу АГ2. Момент M_{G2} орієнтовно може бути прийнятий рівним електромагнітному моменту АГ2.

Підставивши (1) і (2) в (3) отримуємо

$$\omega_2 = \frac{1}{J} \int \left(M_{TN} + \frac{(M_{T0} - M_{TN})(\omega_2 - \omega_N)}{\omega_0 - \omega_N} - M_{G2} - k_{TP} \frac{\omega_2}{\omega_0} \right) dt. \quad (4)$$

Величина ω_2 в (4) під знаком інтеграла береться з попереднього кроку інтегрування. Надалі в розрахунках було прийнято: $M_{TN} = 104 M_{AG2N}$, $M_{T0} = 0,1 M_{TN}$, $\omega_N = 314$ рад/с, $\omega_0 = 1,1 \omega_N$, $k_{TP} = 0,1$, де M_{AG2N} – номінальний момент АГ2 в режимі двигуна, $M_{AG2N} = 484,3$ Н·м.

Алгоритми керування ключами силової частини АЕ.

1. *Перетворювач ВП1*. Керування ВП1 відбувається згідно алгоритму Рис. 2, в основу якого закладено відомий частотний метод керування АГ з вентиляним збудженням (ВЗ).

Згідно цього методу ВП1 повинен певним чином змінювати частоту обертання результуючого вектора статорної напруги АГ1. В результаті цього змінюється ковзання АГ1, його напруга і відповідно потужність, яка віддається по колу постійного струму. Як правило [1], частоту першої гармоніки напруги АГ з ВЗ змінюють в залежності від величини відхилення діючого значення фазної напруги або напруги в колі постійного струму ВП відносно заданого значення, застосовуючи РІ-регулятор з від'ємним зворотним зв'язком по напрузі. Проте з певних міркувань в АЕ, що розглядається, цей підхід був дещо змінений. Основна відмінність алгоритму Рис. 2 від традиційно застосовуваних для АГ з ВЗ – використання комбінованого керування ковзанням АГ. З Рис. 2 добре видно, що в блок-схемі комбінується розімкнуте керування по потужності навантаження на



АЕ (P_{AE}) та керування за помилкою по напрузі u_{d1} . Це зроблено для зменшення низькочастотних пульсацій величини вихідної потужності АГ1 по колу постійного струму ВП1, які виникають в результаті дії зворотного зв'язку по напрузі як в ustalених так і перехідних режимах роботи системи.

Алгоритм працює наступним чином. Сигнал k_{AG2} , рівний відношенню заданої граничної потужності P_{AG2G} до номінальної потужності P_{AG2N} АГ2, визначає, за якого рівня завантаженості АГ2 повинен вступити в роботу АГ1. Тобто P_{AG2G} – граничне навантаження на мережу, яке АГ2 буде покривати самостійно. Числове значення k_{AG2} та значення коефіцієнтів підсилення сигналів, які надалі використовувались при моделюванні, наведені на Рис. 2.

Пороговий елемент ПЕ при $P_{AE}/P_{AG2N} < k_{AG2}$ видає сигнал $k_{C/П}$ ("стоп/пуск") = 0 на своєму виході, який обнуляє заданий вихідний струм ВП1 та блокує роботу розподільвача імпульсів керування ключами ВП1.

Після збільшення навантаження на мережу P_{AE} до рівня більшого за $k_{AG2} P_{AG2N}$ сигнал $k_{C/П}$ стає рівним 1 і припиняє блокувати розподільвач імпульсів та обнуляти i_{VP1}^* .

Заданий струм i_{VP1}^* розраховується за наступним емпіричним виразом

$$i_{VP1}^* = \frac{P_{AE}}{u_{d1}} k_{P1} \left(\frac{P_{AE}}{P_{AG2N}} - k_{AG2} \right) (1 + k_{U1}(u_{d1}^* - u_{d1})) k_{C/П}. \quad (5)$$

В даному виразі P_{AG2N}/u_{d1} – величина вихідного струму ВП1 по колу постійного струму, при якому ВП1 буде видавати потужність рівну P_{AG2N} . $P_{AE}/P_{AG2N} - k_{AG2}$ є різницею між потужністю навантаження на АЕ та граничною потужністю АГ2 у в.о., k_{P1} – постійний коефіцієнт. Величина $k_{P1}(P_{AE}/P_{AG2N} - k_{AG2})$ обмежена знизу рівнем 0,32 з метою недопущення роботи дизеля при малих навантаженнях (менше 30 % від номіналу). Множник $1 + k_{U1}(u_{d1}^* - u_{d1})$, який обмежений рівнями 1 і 1,5, є сигналом відпрацювання зворотного зв'язку по u_{d1} , який збільшує задане значення струму ВП1 при провалах u_{d1} .

Сигнал i_{VP1}^* далі перетворюється в $\Delta\omega_1^*$ – задану кругову частоту ковзання (частота струму ротора АГ1)

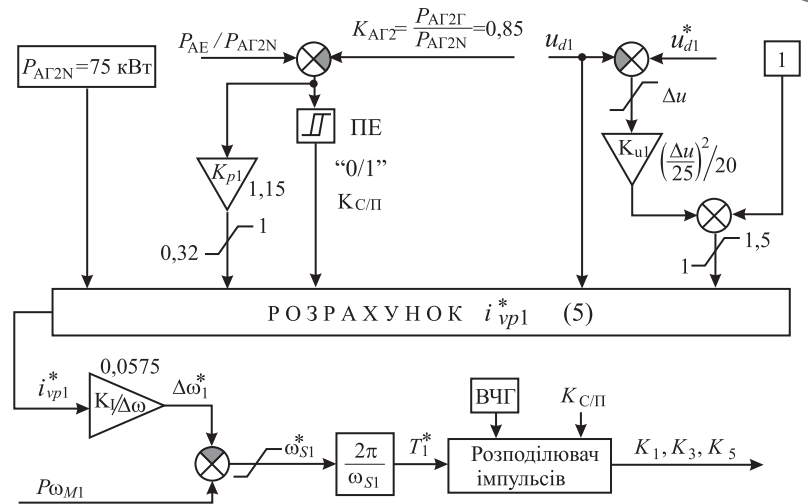


Рис. 2. Блок-схема алгоритму керування ВП1

$$\Delta\omega_1^* = k_{1/\Delta\omega} i_{VP1}^*, \Delta\omega_1^* > 0,$$

де $k_{1/\Delta\omega}$ – коефіцієнт перерахунку i_{VP1}^* в $\Delta\omega_1^*$.

За найденим значенням $\Delta\omega_1^*$ розраховується $\Delta\omega_{s1}^*$ і T_1^* – розрахункова кругова частота і період статорної напруги. Сигнал T_1^* надходить на вхід розподільвача імпульсів. Його особливістю є те, що імпульси перемикачів з частотою $1/T_1^*$ додатково перемножуються з сигналом високочастотного генератора ВЧГ. Сигнал ВЧГ – прямокутні імпульси постійної частоти з рівнями "1" і "0" шпаруватість яких наростає при збудженні АГ1 і незмінна (0,6 в моделі) після збудження. Логічне перемноження імпульсів частоти однократного перемикачів і ВЧГ еквівалентно переходу до так званої "прямокутної" широтно-імпульсної модуляції (ШІМ за прямокутним законом).

2. *Баластове навантаження.* Це навантаження підключається/відключається ключем S_B до кола постійного струму в залежності від рівня сигналу k_B . Рівень k_B визначається пороговим елементом наступним чином (вказано числові величини, які використовувались при моделюванні)

$$k_B = \begin{cases} 0, & u_{d1} \leq 800 \text{ В, ключ розімкнено;} \\ 1, & u_{d1} > 820 \text{ В, ключ замкнено;} \\ & \text{попередній рівень, } 800 \text{ В} < u_{d1} \leq 820 \text{ В.} \end{cases}$$

3. *Перетворювач ВП2.* Алгоритм керування ВП2 було побудовано виходячи з його функціонального призначення. Відповідно блок-схема запропонованого алгоритму (Рис. 3) містить два контури відпрацювання помилок регульованих змінних: f_s – частоти напруги мережі і u_m – амплітуди фазної напруги мережі. Обидва контури містять РІ-регулятори з додатковими елементами. Особливістю побудови контура відпрацювання помилки по частоті є змінні величини коефіцієнтів підсилення регулятора. Досягається це



завдяки нелінійному підсилювачу НП, вихідний сигнал якого нелінійно залежить від модуля похибки $f_s - f_s^*$. Коефіцієнт підсилення НП зменшується із зменшенням похибки. Завдяки цьому в ustalених режимах роботи АЕ досягається зменшення величини пульсацій частоти f_s . Другий контур – контур відпрацювання помилки по напрузі, відрізняється значно меншими коефіцієнтами підсилення та наявністю додаткового блока усереднення. Отже цей контур більш інерційний ніж перший. Величини коефіцієнтів підсилення підсилювачів сигналів на блок-схемі відповідають прийнятим при моделюванні.

Сигнали i_{q2}^* , i_{d2}^* – задані струми ВП2 в перетвореній двофазній системі координат, яка обертається синхронно з результируючим вектором напруги статора АГ2. Кутове положення цього вектора Θ (відносно осі q нерухомої двофазної системи координат) розраховується в блоці abc/Θ з наступного виразу

$$\Theta = \arctan X/Y + \pi \operatorname{sign} Y (\operatorname{sign} X)^2 (1 - \operatorname{sign} X),$$

де $X = u_{A2} - 0,5u_{B2} - 0,5u_{C2}$; $Y = \sqrt{3}(u_{B2} - u_{C2})/2$, якщо Θ розраховується через миттєві фазні напруги, і $X = \sqrt{3}(\Psi_C - \Psi_B)/2$, $Y = 1,5\Psi_A$, якщо Θ розраховується через миттєві потокозчеплення фаз статора, $\Theta = [-\pi; \pi]$; $\operatorname{sign} X(Y) = 0$ при $X(Y) = 0$, 1 при $X(Y) > 0$, інакше -1 .

Розрахунок складових результируючого вектора напруги АГ2 u_{q2} , u_{d2} в системі координат, яка обертається синхронно з цим вектором, проводиться в блоці abc/dq за наступними виразами

$$u_{d2} = 2(\cos \Theta u_{A2} + 0,5u_{B2}(\sqrt{3} \sin \Theta - \cos \Theta) - 0,5u_{C2}(\sqrt{3} \sin \Theta + \cos \Theta))/3,$$

$$u_{q2} = 2(-\sin \Theta u_{A2} + 0,5u_{B2}(\sqrt{3} \cos \Theta + \sin \Theta) + 0,5u_{C2}(\sin \Theta - \sqrt{3} \cos \Theta))/3.$$

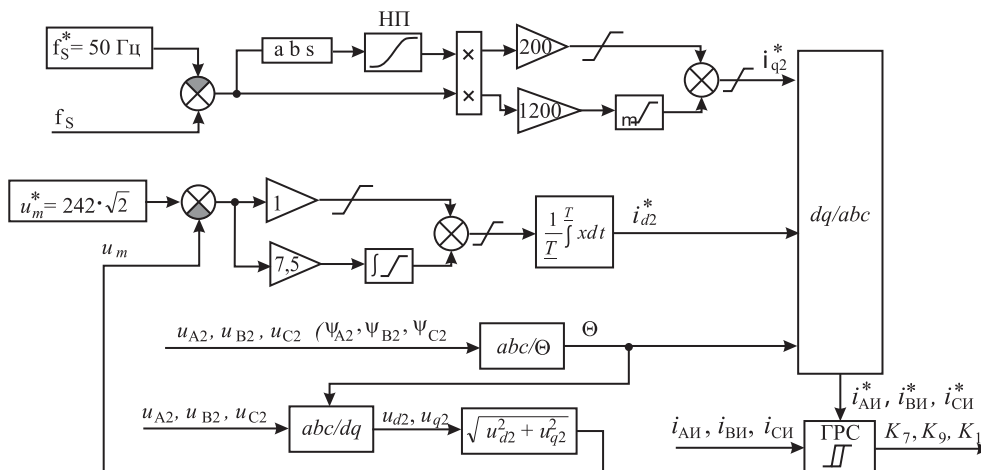


Рис. 3. Блок-схема алгоритму керування ВП2

Таким же чином можна отримати перетворені струми навантаження u_{dZ} , u_{qZ} для обчислювання активної потужності навантаження АЕ

$$(P_{AE} = 3(u_{d2}i_{dZ} + u_{q2}i_{qZ})/2).$$

Задані струми ВП2 розраховуються в блоці dq/abc :

$$i_{AI}^* = -i_{d2}^* \sin \Theta + i_{q2}^* \cos \Theta,$$

$$i_{BI}^* = 0,5 i_{q2}^* (\sqrt{3} \sin \Theta - \cos \Theta) + 0,5 i_{d2}^* (\sqrt{3} \cos \Theta + \sin \Theta),$$

$$i_{CI}^* = -i_{AI}^* - i_{BI}^*.$$

Значення заданих і фактичних струмів ВП2 надходять до гістерезисного регулятора струму ГРС, який формує сигнали k_7, k_9, k_{11} керування ключами S_7, S_9, S_{11} . Сигнали k_8, k_{10}, k_{12} керування ключами S_8, S_{10}, S_{12} інверсні до k_7, k_9, k_{11} .

Розрахункові дослідження. В ході чисельних розрахунків перевірялась працездатність розроблених алгоритмів керування елементами АЕ. Як уже зазначалось, обидва генератори в числовій моделі були прийняті такими, що мають однакові параметри і виконані на основі машини 4A250S4Y3 номінальної потужності 75 кВт. Характеристика холостого ходу цієї машини була отримана розрахунково [2] на частоті 50 Гц і наведена в Табл. 2.

Величини активних опорів і індуктивностей розсіювання згідно [3] прийняті наступні: $r_1 = 0,04$ Ом, $L_1 = 4,5 \cdot 10^{-4}$ Гн, $r_2 = 0,023$ Ом, $L_2 = 4,5 \cdot 10^{-4}$ Гн. Ємність конденсаторів збудження на фазу АГ2 було прийнято 0,00085 Ф, ємність $C_{d1} = 0,05$ Ф, опір $R_B = 9,5$ Ом, параметри дроселів: $L = 0,0005$ Гн, $r_L = 0,075$ Ом.

Результати досліджень електричних та електромеханічних процесів в АЕ приведено на Рис. 4, 5. Часові залежності зазначених процесів отримані при накиданні ($t = 2,502$ с) та скиді ($t = 4,182$ с) симетричного навантаження, яке за характером близьке до активного ($R_A = R_B = R_C = r_H = 2,15$ Ом,

$L_A = L_B = L_C = L_H = 0,0001$ Гн). Частота мережевої напруги f_s в системі вимірювалась раз на два періоди частоти основної гармоніки.

На Рис. 4 зображені часові залежності: а –



частоти мережевої напруги, δ – електромагнітного моменту АГ1, ϵ – діючого значення фазного струму АГ1, ζ – струму ВП1 по колу постійного струму, η – напруги на конденсаторі C_{d1} , θ – струму через баластний опір, ι – механічної частоти обертання ротора АГ2, κ – електромагнітного моменту АГ2, λ – діючого значення фазного струму АГ2, μ – струму ВП2 по колу постійного струму, ν – діючого значення фазної напруги навантаження АЕ, ξ – струмів ВП2 в двохфазній системі координат, яка обертається синхронно з результируючим вектором напруги АГ2.

На Рис. 5 наведено часові діаграми струмів і напруг: a – фазна напруга і масштабований фазний струм АГ1, b – напруга фази А АГ2 і струм фази А ВП2 при відсутності навантаження на АЕ, v – ці ж змінні, що і на Рис. 5, b , але після накиду навантаження.

З наведених на Рис. 4 діаграм видно, що розроблені алгоритми керування забезпечують стійку роботу АЕ. Тривалість встановлення частоти мережі після накиду навантаження $r_H = 2,15$ Ом на фазу ($P_{AE} = 1,08$ в.о., 1 в.о. = 75 кВт) і підключення АГ1 до паралельної роботи по колу постійного струму знаходиться в межах 1,5 с. Помітний провал напруги u_{d1} по колу постійного струму пов'язаний зі споживанням активної потужності АГ1 в процесі форсованого збудження. Фазні струми АГ1 і АГ2 (Рис. 4, v , z , 1 в.о. дорівнює номінальному струмові машини) у встановлених режимах знаходяться в межах номіналу. Після включення АГ1 його вихідний струм по колу постійного струму встановлюється на рівні близько 40 А, а ВП2 споживає струм близько 30 А. Різниця цих струмів споживається баластним навантаженням.

Таблиця 2.

| | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U_0, B | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 215 | 220 |
| I_0, A | 21,13 | 22,94 | 24,54 | 26,46 | 28,55 | 30,96 | 32,33 | 33,50 |
| U_0, B | 225 | 230 | 235 | 240 | 245 | 250 | 260 | 275 |
| I_0, A | 35,48 | 37,46 | 39,58 | 42,41 | 45,64 | 49,39 | 59,61 | 81,20 |

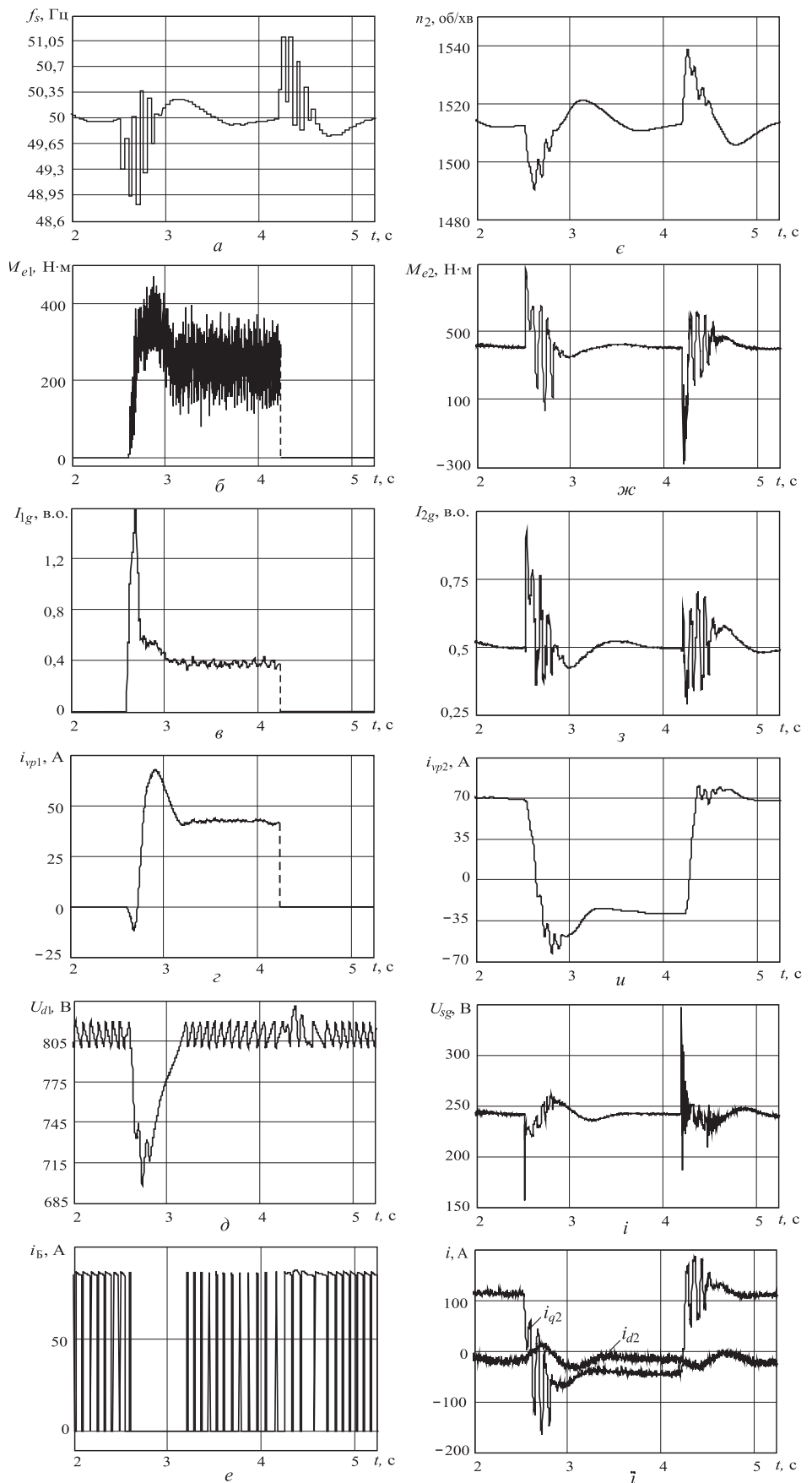


Рис. 4. Діаграми електромеханічних процесів

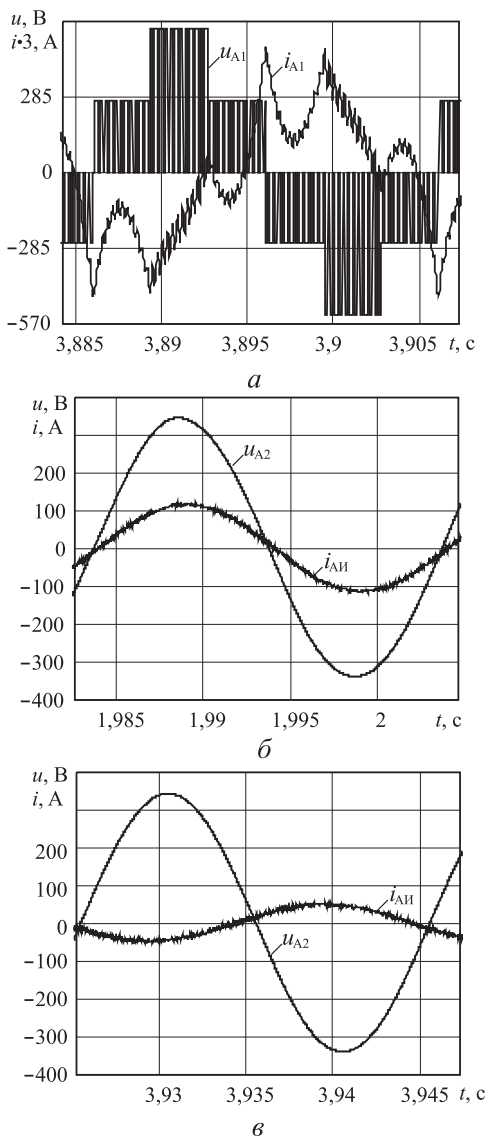


Рис. 5. Часові діаграми струмів і напруг елементів АЕ

За відсутності навантаження на АЕ струм i_{q2} додатний, що свідчить про споживання активної потужності перетворювачем ВП2 від АГ2. При підключенні навантаження знак i_{q2} змінюється на від'ємний, а отже ВП2 віддає активну потужність споживачам. Знак струму i_{d2} у встановлених ре-

жимах від'ємний. Це означає, що ВП2 споживає реактивну потужність, зменшуючи амплітудне значення напруги на навантаженні.

Наведені на Рис. 5 криві струмів і напруг підтверджують відповідність електричних процесів в елементах АЕ теорії машино-вентильних систем. Зокрема форма i_{A1} відрізняється від форми струму, яку отримують при однократному за період перемиканні вентилів, лише високочастотною складовою. Струм i_{A1} відстає по фазі від напруги u_{A1} на кут більший за 90° . В наближеному до х.х. режимі роботи АЕ зсув між струмом ВП2 i_{AI} та відповідною напругою u_{A2} в межах кількох градусів, а в режимі навантаження ці криві практично в протифазі, що узгоджується з діаграмами Рис. 4.

Висновки. Запропоновано технічне рішення автономної гідро-дизельної АЕ змінного струму забезпечує в порівнянні з відомими підвищення надійності і поліпшення якості перехідних процесів електрогенеруючої частини. Отримані результати моделювання підтвердили ефективність розроблених алгоритмів керування складовими елементами розглянутої АЕ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мазуренко Л.И., Лиценко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. — Київ: Наук. думка, 2011. — 272 с.
2. Проектирование электрических машин / Под ред. Копылова И.П. — М.: Энергия, 1980. — 328 с.
3. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. — М.: Энергоиздат, 1982. — 504 с.
4. Мазуренко Л.И., Джура О.В., Динчик Л.М., Білик О.А. Математична модель асинхронних генераторів з вентильним збудженням автономної енергосистеми постійного струму // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. — Кременчук: КрНУ, 2013. — Вип. № 2/2013 (22). — Ч. 2. — С. 321–326.

© Джура О.В., 2013

