

Ю. Л. Бондаренко, М. Д. Петрук, Д. Є. Ступак, І. А. Іщенко

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТРИФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ШЛЯХОМ АДАПТИВНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ МІЖ ОДНОФАЗНИМИ СПОЖИВАЧАМИ

У статті описано спосіб підвищення ефективності роботи трифазного генератора шляхом застосування системи перерозподілу його потужності між однофазними споживачами. Проаналізовано можливі підходи та методи вирішення проблеми виникнення асиметрії навантаження джерел живлення. Запропоновано структурну схему системи електроживлення однофазних споживачів, яка реалізує рівномірне навантаження фаз у разі виникнення асиметрії навантаження. Обґрунтовано порядок функціонування такої схеми в різних режимах роботи системи перерозподілу потужності між споживачами, а також на його основі запропоновано алгоритм функціонування. Наведено обґрунтування схемного рішення адаптивної системи перерозподілу потужності між однофазними споживачами під керуванням однокристального мікроконтролера та розроблено варіант її принципової схеми. Сформульовано вимоги та на їх основі спроектовано варіант побудови інвертора, який відповідає особливостям запропонованої структурної схеми за рівнем вхідної напруги. Розроблено та досліджено функціонування програмного коду роботи однокристального мікроконтролера за запропонованим алгоритмом. Наведено результати практичної перевірки функціонування запропонованої системи електроживлення, які продемонстрували підвищення ефективності трифазного генератора шляхом застосування системи перерозподілу його потужності між однофазними споживачами. З'ясовано, що модернізація пристрою можлива через реалізацію функції підмішування потужності. За результатами експерименту сформульовано напрямки подальших досліджень щодо удосконалення запропонованої схеми.

Ключові слова: трифазний генератор; ефективність; асиметрія навантаження; адаптація; однокристальний мікроконтролер; перерозподіл потужності; широтно-імпульсна модуляція; диференційний захист; алгоритм перерозподілу потужності.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В умовах інтенсивного вогневого ураження противником об'єктів енергетичної інфраструктури нашої держави в ході збройної агресії російської федерації проти України гостро постало питання забезпечення енергопостачанням критично важливих військових та цивільних об'єктів за рахунок широкого застосування автономних джерел електроживлення (АДЖ). Значна частина АДЖ, які використовуються із цією метою, є трифазними генераторами різної потужності, які забезпечують можливість живлення як однофазних, так і трифазних споживачів електроенергії та характеризуються високими показниками економічності й енергоефективності.

© Ю. Л. Бондаренко, М. Д. Петрук, Д. Є. Ступак, І. А. Іщенко, 2024

У той же час більшість споживачів, зокрема й військового призначення, потребують саме однофазного живлення. Як правило, вони підключаються до однієї з фаз трифазного генератора. За такого підключення користувачів до АДЖ забезпечити рівномірне завантаження кожної з трьох фаз генератора практично не можливо через випадковий характер споживання ними електроенергії. Це обумовлено не тільки неможливістю здійснення контролю за підключенням споживачів до відповідної електромережі, але й через динамічні зміни рівня споживання ними в часі, що призводить до типової ситуації, коли в певний момент одна чи дві фази є перевантаженими, а решта – не завантаженими. При цьому завантаження кожної з фаз генератора в часі змінюється непередбачувано.

Нормальний режим функціонування трифазного генератора передбачає симетричне навантаження, за якого на кожну з фаз припадає приблизно однакова потужність (в ідеалі – 33% від загальної потужності). При цьому забезпечується найкраща ефективність його роботи.

У разі асиметричного навантаження фаз максимальна потужність на одну з них допускається не більше 40% від номінальної потужності генератора (за умови, що сумарне навантаження на двох інших не перевищує 30% від номінальної потужності). Це призводить до неефективного використання потужності трифазного генератора та ненормальних режимів роботи електромережі [2].

Отже, ефективність роботи трифазного генератора суттєво знижується внаслідок асиметрії навантаження, що створюється однофазними споживачами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підходи до вирішення завдання рівномірного розподілу однофазних споживачів для симетрування потужності наведено в різних джерелах.

У [1] розглянуто метод розподілу навантаження за фазами, що передбачає рівномірне підключення споживачів до кожної з трьох фаз. Але цей метод може бути застосований тільки в стаціонарних мережах з усталеним і контрольованим навантаженням.

У [5] описано метод оптимізації розподілу навантаження за рахунок аналізу середнього навантаження на кожну з фаз із подальшою перекомутацією споживачів між фазами. Проте це не дозволяє проводити оперативну перекомутацію споживачів у разі виникнення асиметричного навантаження.

У [1] запропоновано спосіб рівномірного завантаження фаз шляхом підключення споживачів до АДЖ через випрямляч Ларіонова, що не можливо застосувати для тих, які споживають змінну напругу.

У [7] розглянуто схему з подвійним перетворенням. Напруга спочатку випрямляється схемою Ларіонова після чого за допомогою інвертора формується 220 В 50 Гц. Основним недоліком такого методу є висока вартість його реалізації та необхідність застосування спеціалізованих інверторів (напруга після випрямлення становить близько 518 В) або знижувального трансформатора перед випрямленням.

У [1] як спосіб розв'язання проблеми асиметрії наведено метод моніторингу з подальшою корекцією. Регулярний моніторинг навантаження на кожній фазі дозволяє виявити дисбаланс і вжити заходи для його корекції. Це може включати перенесення деяких споживачів з однієї фази на іншу. Але цей метод підходить лише для стаціонарно розгорнутих систем.

У [3] досліджено метод усунення асиметрії шляхом під'єднання споживачів через симетруючий трансформатор, увімкнений за схемою «зигзаг-зірка». Такі трансформатори допомагають вирівняти навантаження між фазами, зменшуючи перекося та втрати енергії. Вони працюють на основі принципів електромагнітної індукції, адаптуючи струми й напруги таким чином, щоб мережа залишалася збалансованою навіть за умов нерівномірного розподілу навантаження. При цьому розподіл потужності відбувається у співвідношенні 50% на перевантажену фазу і по 25% на інші. Також слід зазначити високу вартість та масогабаритні показники (такі пристрої мають великий розмір і вагу, що може ускладнювати їх транспортування, установлення та інтеграцію в наявні системи).

У [5] розглянуто використання автоматичних балансувальних пристроїв, які автоматично, умовно рівномірно розподіляють навантаження між фазами. Вони можуть бути корисними в системах із динамічним навантаженням, де споживання енергії змінюється з часом. Проте такі системи розгортають стаціонарно, крім того, вони потребують програмно керованих розподільчих шаф.

Отже, завдання підвищення ефективності роботи трифазного генератора в умовах асиметричного навантаження, створюваного однофазними споживачами, є актуальним, оскільки відомі підходи до симетрування навантаження не дозволяють вирішити проблему перерозподілу потужності трифазного генератора за умови динамічних змін її споживання однофазними споживачами.

Метою статті є розроблення способу підвищення ефективності роботи трифазного генератора в умовах асиметрії навантаження шляхом адаптивного перерозподілу потужності між однофазними споживачами.

Виклад основного матеріалу. Випадковість виникнення асиметрії навантаження між фазами трифазного генератора в ході живлення електромережі обумовлює два режими його роботи:

перший, коли генератор працює в умовах відсутності розбалансу потужності між фазами або якщо такий розбаланс не перевищує допустимих меж;

другий, коли є значний розбаланс навантаження з перевантаженням однієї чи двох фаз.

У першому режимі забезпечується максимальна ефективність роботи генератора, оскільки 99% виробленої енергії передається споживачам. Тому в такій ситуації необхідно реалізувати пряму каналізацію енергії генератора до споживачів без зайвих перетворень та втрат.

У другому режимі необхідно забезпечити, з одного боку, безперебійність постачання електроенергії споживачам (тобто унеможливити ситуацію аварійного вимкнення генератора через перенавантаження в одній із фаз), а з іншого – найефективнішу роботу генератора в умовах асиметричного навантаження, тобто передачу максимально можливого обсягу енергії до споживачів.

Отже, запропонований спосіб підвищення ефективності роботи генератора повинен реалізовувати: у першому режимі – передавання потужності від генератора до споживачів без будь-яких перетворень; у другому – можливість рівномірного завантаження усіх фаз за рахунок додаткових перетворень напруги живлення генератора.

Для того, щоб забезпечити роботу генератора в другому режимі, пропонуємо передбачити в складі схеми живлення споживачів такі елементи (рис. 1):

трифазний генератор як основне джерело електроенергії;

однофазні споживачі, поділені на групи, кожна з яких підключена до однієї з фаз генератора;

комутатор, який реалізує функцію підключення споживачів або безпосередньо до генератора (у першому режимі), або до перетворювача (у другому);

систему аналізу споживаної потужності, яка формує керуючий сигнал для управління роботою комутатора;

перетворювач, який дозволяє перетворити трифазну напругу генератора в однофазну, придатну для живлення споживачів у другому режимі.

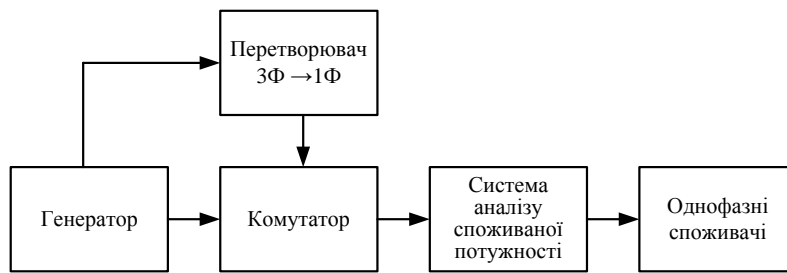


Рис. 1. Пропонована схема електроживлення споживачів

Щодо забезпечення рівномірності завантаження фаз найкращим варіантом перетворювача є випрямляч, побудований за схемою Ларіонова [1], яка придатна для живлення лише споживачів постійного струму. Для живлення споживачів змінного струму після випрямляча встановлюють інвертор. Більшість інверторів промислового зразка передбачає живлення вихідного каскаду інвертора напругою 310 В. Проте на виході схеми Ларіонова напруга становить 518 В, тому перед нею встановлюють трифазний знижувальний трансформатор (рис. 2а), що підвищує вартість схеми та збільшує її масу й габарити.

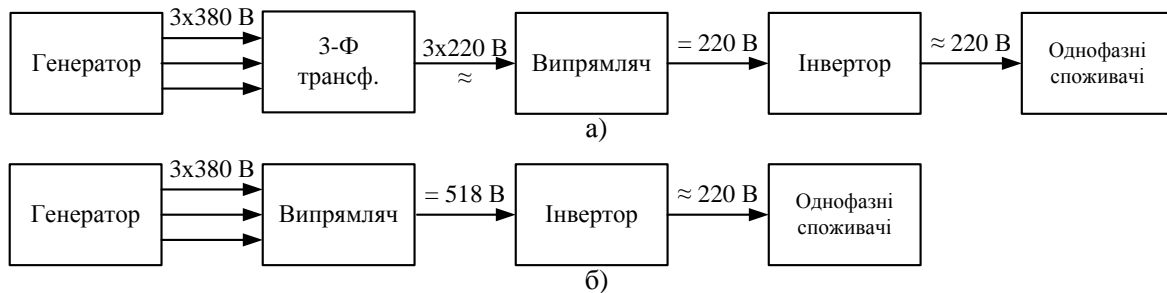


Рис. 2. Структурна схема системи перетворювача напруги 3Ф-1Ф

Для усунення зазначених недоліків та спрощення схеми перетворювача пропонуємо виключити з неї знижувальний трансформатор, але при цьому застосувати спеціалізований інвертор, який дозволяє його живлення напругою до 600 В. Його виготовлення обійдеться значно дешевше, ніж використання в схемі знижувального трансформатора.

Запропоновану структурну схему, що реалізує спосіб підвищення ефективності роботи трифазного генератора в умовах асиметричного навантаження, наведено на рис. 2б.

У виборі варіанта побудови спеціалізованого інвертора доречно зважати на те, що на вхід спеціалізованого інвертора з випрямляча буде надходити постійна напруга близько 518 В, тому немає сенсу застосовувати схему інвертора з двоступеневим перетворенням, що спрощує його схемне рішення. При цьому на виході інвертора повинен бути гармонічний сигнал 220 В 50 Гц. Для забезпечення такого вихідного сигналу пропонуємо спосіб його формування на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), шпаруватість якого описується функцією синуса. Це можливо реалізувати шляхом застосування як керувального елемента однокристального мікроконтролера (ОМК).

Для реалізації своїх функцій система аналізу споживаної потужності має містити у своєму складі блок вимірювання трифазного струму (БлВТС) та блок прийняття рішень (БлПР).

БлВТС – це набір датчиків, що повинні забезпечувати вимір струму кожної фази в межах від 0 А до максимального значення з урахуванням запасу (20% від максимального показника).

БлПР має забезпечувати виконання таких функцій: оброблення й перерахунок виміряних струмів у потужність, аналіз отриманої інформації та вироблення відповідного сигналу керування комутатором за відповідним алгоритмом прийняття рішень. Оскільки вихідним сигналом датчиків у БлВТС є напруга, описана поліномом, то отримання придатних для подальшої обробки даних потребує відповідних розрахунків. Це вимагає застосування у БлПР блоку обчислення на основі ОМК.

Схема побудови комутатора повинна відповідати таким вимогам:

забезпечувати можливість передачі електроенергії споживачам як прямо від генератора, так і від перетворювача;

мати достатньо високу швидкодію для уникнення ситуації переривання в живленні споживачів;

бути здатною забезпечити комутацію усієї потужності генератора на будь-яку з фаз у другому режимі;

працювати під управлінням сигналів від БлПР.

Запропоновану структурну схему реалізації способу підвищення ефективності роботи генератора в другому режимі наведено на рис. 3.

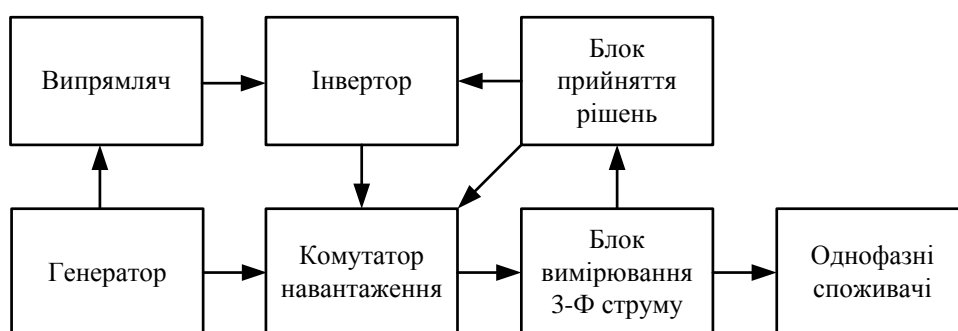


Рис. 3. Структурна схема системи перерозподілу потужності

Загальну принципову схему, що реалізує запропонований спосіб підвищення ефективності роботи трифазного генератора в умовах асиметричного навантаження, наведено на рис. 4.

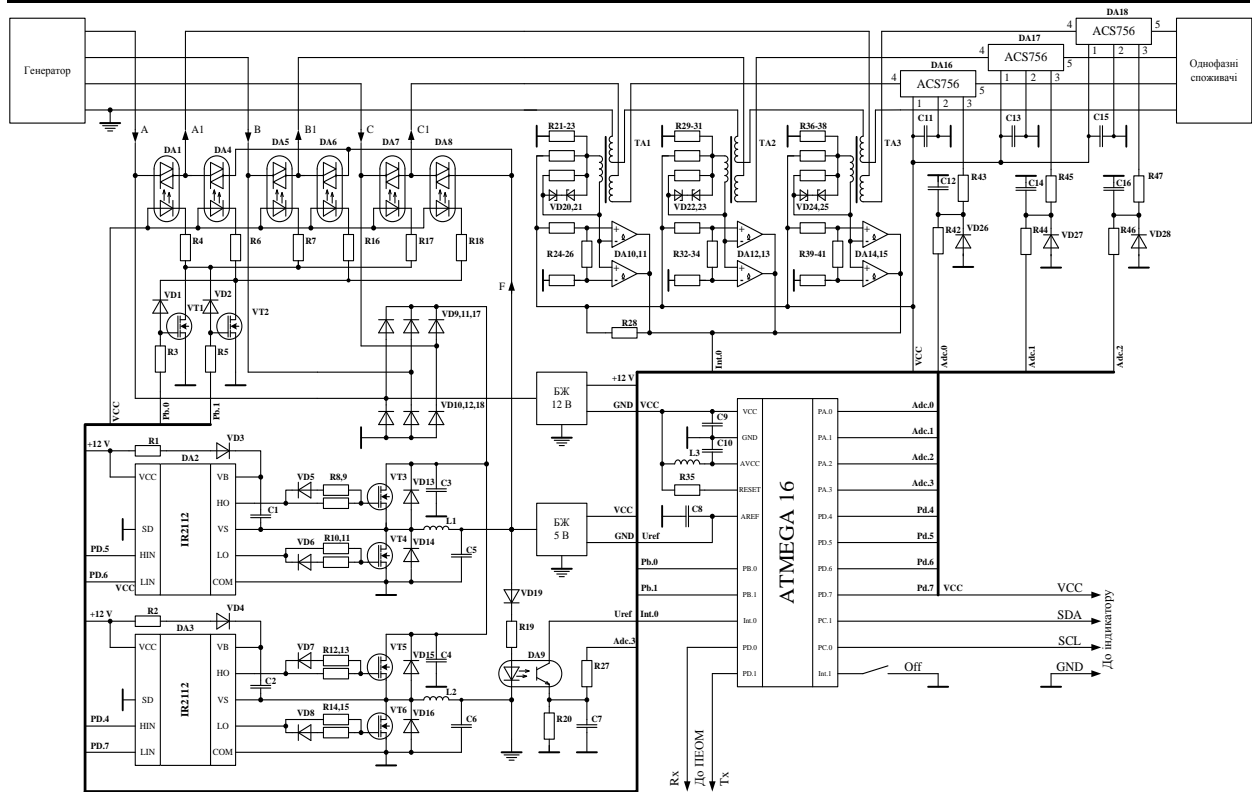


Рис. 4. Схема перерозподілу потужності однофазним споживачам

Напруга від генератора надходить на оптосимісторний комутатор (DA1, DA4-8) із шести інтегральних оптосимісторів, кожен із яких розраховано на напругу 800 В та робочий струм до 30 А. Кожен із них має забезпечувати комутацію всієї потужності для забезпечення перерозподілу в разі значної асиметрії навантаження. Для захисту від одночасного ввімкнення живлення від генератора та інвертора передбачено схему захисту, реалізовану на двох n-канальних польових транзисторах (VT1, VT2) та двох діодах (VD1, VD2).

Також вхідна напруга надходить на випрямляч, побудований за схемою Ларіонова на діодах VD9-12,17,18 (DSI30-08AS), обраних із запасом за потужністю для зменшення їх нагріву та розрахованих на роботу зі струмами до 30 А, що витримують зворотну напругу до 800 В.

Для забезпечення максимальної ефективності перетворення в режимі перерозподілу потужності було обрано синхронну структуру інвертора. За основу для побудови взято дослідження [4]. Як керувальний елемент (генератор синфазних ШІМ сигналів) було взято 8-бітний ОМК фірми *ATMEL – ATMEGA 16* через його доступність, наявність двоканального двопорогового 16-бітного таймера та 8-канального 10-бітного аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Для керування потужними вихідними N-канальними *MOSFET* транзисторами (*FQD2N80*) схему доповнено інтегральним драйвером *IR2112*.

Рівень вихідної напруги інвертора контролюється через оптотранзистор DA9, що застосовано для гальванічної розв'язки. Живлення оптотранзистора здійснюється від вбудованого в ОМК опорного джерела живлення для більшої точності результату роботи АЦП. Напруга знімається з навантаження оптотранзистора R20 вбудованим в ОМК АЦП

та перераховується в значення напруги табличним методом (експериментально зняті значення відповідності напруг записано в таблицю).

Для контролю споживаного струму (потужності) в кожній із фаз встановлено спеціалізований датчик ACS756 (на схемі DA16 – DA18), дані від якого надходять на входи ADC.0 – ADC.3 вбудованого в ОМК 10-бітного АЦП.

Для захисту особового складу від ураження струмом у схемі передбачено контроль диференційного струму, реалізований на диференціальних трансформаторах ТА1–ТА3 та компараторах DA10–DA15. Сигнал спрацювання будь-якого компаратора формує низький рівень на вході переривання INT0.

Крім того, для спрощення аналізу потужностей споживачів кожної із фаз та режиму роботи пристрій перерозподілу потужності доповнено виносним пультом з 16×2 дисплеєм, під'єднаним через каналний ущільнювач PCF8574T.

Для коректної роботи пристрою під керуванням ОМК слід організувати його роботу за таким алгоритмом (рис. 5).

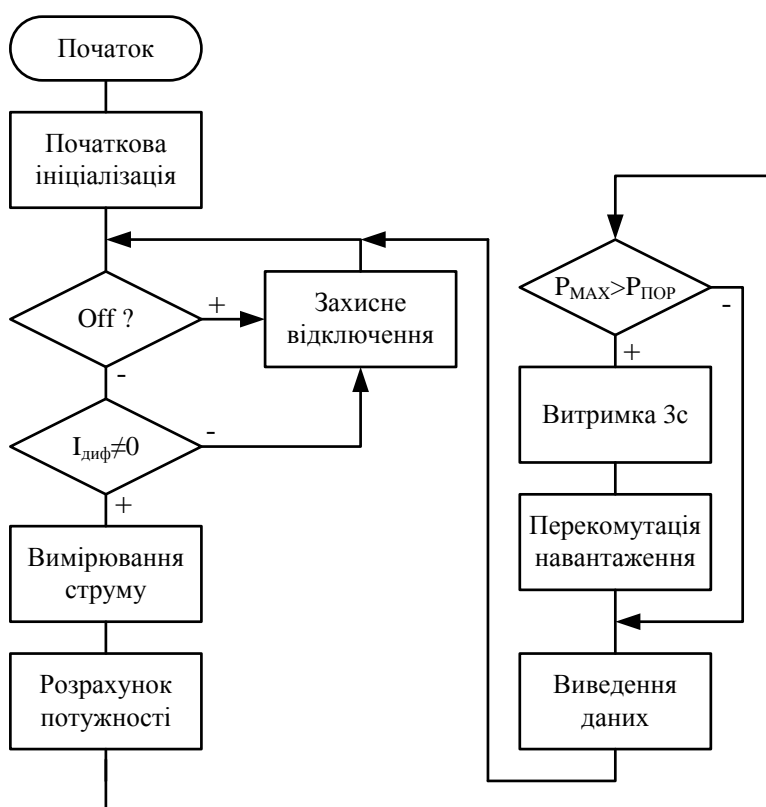


Рис. 5. Алгоритм роботи пристрою перерозподілу потужності

Робота починається з початкових налаштувань ОМК. Перед увімкненням навантаження проводиться аналіз дозволу роботи та відсутності диференційного струму.

Після увімкнення навантаження відбувається вимірювання струмів споживання в кожній із фаз та їх подальший перерахунок у значення потужності. Якщо виміряні потужності не перевищують вказаного порога (вводиться завчасно для кожного генератора з його технічного опису), то віддається команда на роботу в першому режимі (без перерозподілу).

Якщо ж вимірювання виявили перевищення споживаної потужності на будь-якій із фаз, то починається відлік часу в три секунди (час на завершення перехідних комутаційних процесів) до переходу в другий режим роботи (комутація однофазних споживачів на роботу від інвертора).

Незалежно від способу живлення споживачів виводиться інформація про поточну споживану потужність на дисплей та ПЕОМ.

Для простоти написання програмного коду було використано середовище графічного програмування *Algorithm Builder for AVR 5.44*.

Головна програма починається з налаштування векторів переривань, встановлення режимів роботи портів, обнулення змінних, ініціалізації дозволу переривань та налаштування режимів роботи таймерів (рис. 6, А), під час якого відбувається встановлення коефіцієнта попереднього поділу частоти та режиму роботи до збігу з порогом. Ініціалізація змінних проводить їх обнулення та формує дозвіл переривань.

За перериванням від таймера розраховується чергове значення $\sin(x)$ із подальшим зчитуванням і видачею у відповідний порт ОМК з урахуванням поточного півперіоду.

Формування вибірок значення синуса відбувається шляхом зміни часу спрацювання одного із виходів ШІМ таймера № 1 (рис. 6, Е), переконфігурація якого проходить за законом синуса кожні чотири такти підпрограмою. 32 значення позитивної півхвилі $\sin(x)$ збережено в блоці (рис. 6, Є).

Контроль параметрів струму та напруги виконується за перериванням від таймера № 2 (рис. 6, Л). Кожне спрацювання таймера переналаштовує АЦП та викликає блок обробки переривань (рис. 6, Б). За кожним спрацюванням зберігаються відповідні дані.

Параметри амплітуди вихідного сигналу інвертора контролюються кожні пів секунди. У разі виявлення відхилення вихідної напруги підпрограмою (рис. 6, С) проводиться корекція коефіцієнта домноження часового еквівалента значення синуса (K_u). Якщо відхилення напруги незначне, то корекція не проводиться. Для домноження використовується окрема підпрограма (рис. 6, Д).

Якщо корекція напруги неможлива та є значне відхилення, яке не компенсується зміною коефіцієнта домноження значення синуса, то відбувається перехід до підпрограми зупинки роботи (рис. 6, І). Цей фрагмент коду також відповідає за відключення навантаження в разі виникнення диференційного струму.

Перед початком роботи та після виникнення нештатних ситуацій слід ініціювати запуск роботи від генератора, для чого передбачено переривання від входу *int1* (рис. 6, З).

Після проведення вимірювання струму у всіх трьох фазах проводиться перерахунок значення потужності підпрограмою (рис. 6, Н), після роботи якої виконується сортування за допомогою іншої підпрограми (рис. 6, М).

Після визначення P_{max} порівнюються відхилення потужностей (рис. 6, О). Якщо відхилення потужності було виявлено, то запускається таймер № 0, що відраховує 3 с. У разі зникнення відхилення в цьому проміжку виконується повторний запуск.

За спрацюванням таймера № 0 проводиться перекомутація навантаження на роботу від інвертора (рис. 6, К).

Корекція вихідної напруги в разі виявлення відхилення підпрограмою (рис. 6, С) відбувається шляхом домноження на коригувальний коефіцієнт підпрограмою (рис. 6, Д).

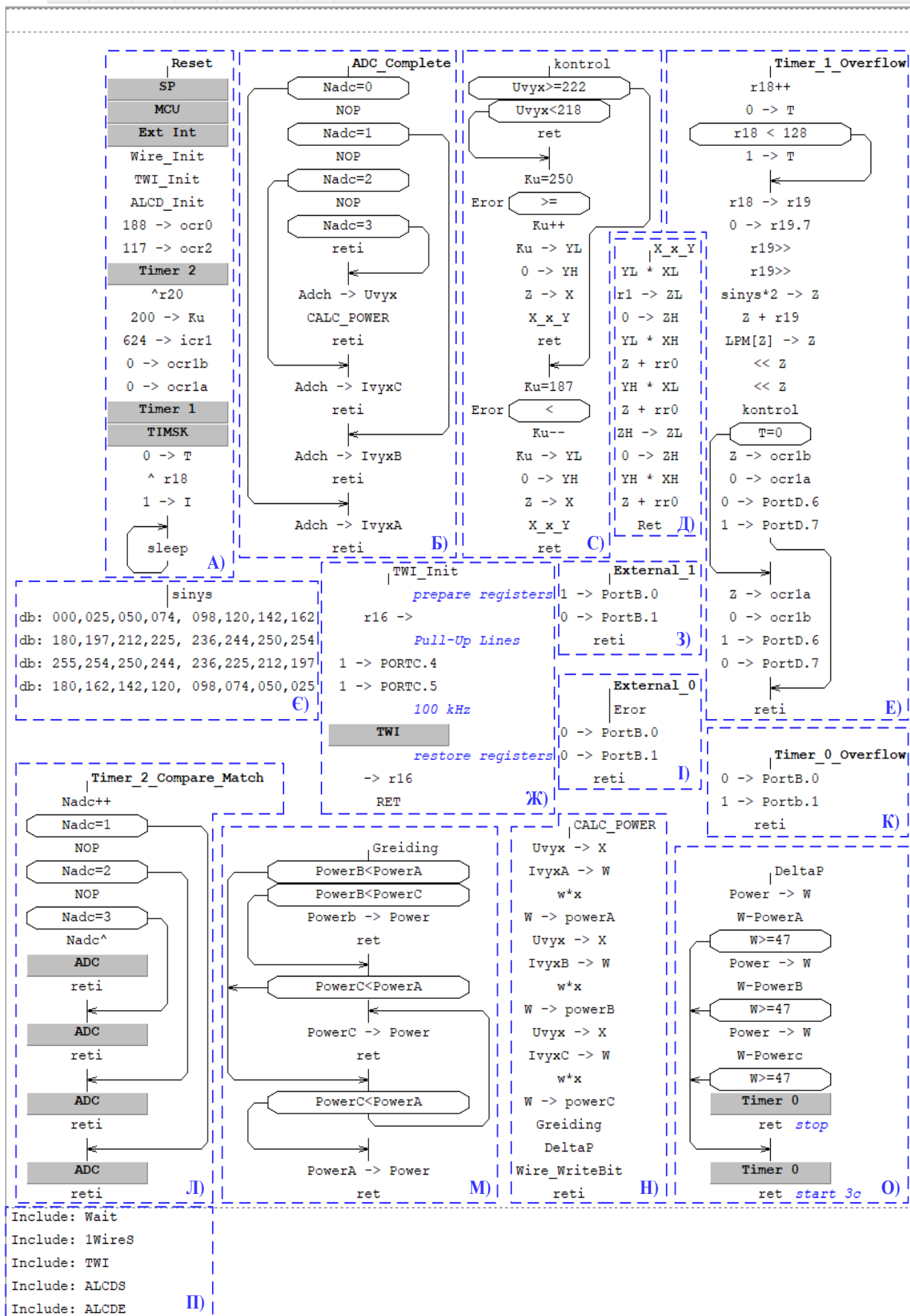


Рис. 6. Фрагменти коду програми

Для виведення даних використовується графічний дисплей 16×2 (підключеним через каналний ущільнювач *PCF8574T*), ініціалізація якого виконується підпрограмою (рис. 6, Ж). Також для роботи з ПЕОМ застосовуються додаткові бібліотеки, які під'єднуються до основного проекту в блоці (рис. 6, П).

Для перевірки функціонування системи перерозподілу потужності було проведено моделювання із використанням дослідного пристрою, у складі якого були ввідна розподільна коробка, комутатор навантаження, канал вимірювання струмів кожної фази, канал вимірювання диференційного струму та напруги на виході генератора, інвертор та макетна плата з вбудованим мікроконтролером ATMEGA16.

Перевірка правильності функціонування та відлагодження розробленого дослідного зразка системи перерозподілу потужності проводилася в наметовому містечку з роботою від трифазного дизельного генератора FGD6500E3 загальною потужністю 6,5 кВт та допустимим навантаженням на 1 фазу 2,8 кВт.

У ході експлуатації дослідного зразка розподільвача потужності було перевірено його роботу з різними навантаженнями. У табл. 1 споживану потужність фази А наведено в стовпчику P_A , потужності фаз В та С – у P_B та P_C відповідно, сумарну потужність фаз – у P_{Σ} , вихідну напругу інвертора – у $U_{\text{вих}}$, наявність диференційного струму – у $I_{\text{диф}}$.

Таблиця 1

Результати перевірки роботи системи перерозподілу потужності

№ досліджу	P_A (кВт)	P_B (кВт)	P_C (кВт)	P_{Σ} (кВт)	$U_{\text{вих}}$ (В)	$I_{\text{диф}}$ (мА)	Режим
1	0,98	0,93	0,97	2,88	221	< 1	Робота від генератора
2	0,00	0,07	0,43	0,5	223	< 1	Робота від генератора
3	1,73	0,92	0,41	3,06	221	< 1	Робота від генератора
4	2,35	1,56	0,93	4,84	222	< 1	Робота через інвертор
5	0,00	0,00	0,00	0,00	223	≈ 40	Аварійне відключення

Досліди 1 та 2 було проведено за незначного розбалансу та відсутності диференційного струму. Система перерозподілу потужності відповідно до заданого алгоритму скомутувала навантаження на роботу безпосередньо від генератора.

Досліди 3 та 4 проводилися за наявності розбалансу та відсутності диференційного струму. У досліді 3 максимальне навантаження на фазу не перевищувало програмно встановленого порога в 2 кВт.

Для визначення ефективності роботи в режимі перерозподілу потужності через інвертор було окремо оцінено коефіцієнт корисної дії (ККД) інвертора за різної потужності (табл. 2). Аналіз проводився на основі вимірювання постійного струму й напруги на вході та змінного струму й напруги (діючих значень) на виході.

Як видно з аналізу ККД інвертора, його ефективність знижується в разі збільшення генерованої потужності. Середній ККД становить близько 93%. Зниження також може бути пов'язане з неточністю вимірювань через місця включення приладів.

Аналіз ККД реалізованого інвертора з ШІМ-синусом

$I_{вх}, А$	$U_{вх}, В$	$P_{вх}, Вт$	$I_{вих}, А$	$U_{вих}, В$	$P_{вих}, Вт$	ККД, %
0,31	317	98	0,41	221	91,41	93,28
1,51	316	478	2,03	220	445,74	93,25
3,24	315	1021	4,30	221	951,06	93,15
5,65	313	1768	7,45	221	1645,48	93,07
7,32	312	2283	9,61	221	2124,33	93,05
8,94	312	2789	11,79	220	2594,05	93,01
13,17	310	4083	17,31	219	3791,88	92,87
17,41	308	5362	22,81	218	4973,26	92,75

Як бачимо, на ККД пристрою схеми перерозподілу потужності також впливає ККД випрямляча (близько 99%). Окрім того, слід враховувати втрати потужності (до 1%) на комутаторі навантаження. Тобто загальний ККД у разі роботи з рівномірним навантаженням становить близько 99%, а за розбалансу потужності – 92%.

Висновки. У ході практичної експлуатації було проведено перевірку роботи пристрою за відсутності розбалансу потужності та за умови, що потужність навантаження в каналах менше 2 кВт (тобто робота пристрою без перерозподілу потужності). ККД розподільчого пристрою становить 99%. Обмеження в 2 кВт пов'язані з генератором, що використовувався разом із системою перерозподілу.

Також було перевірено роботу пристрою за розбалансу потужності ($P_f > 2$ кВт), у такому разі ефективність системи перерозподілу знижувалась до 92%. З урахуванням цього за асиметричного навантаження вдалося отримати від 5,5 кВт генератора FGD6500E3 5,06 кВт вихідної потужності.

Слід відмітити також можливість під'єднання до ПЕОМ, що дозволяє зібрати статистичний розподіл навантаження для його подальшого перерозподілу між каналами.

Подальше вдосконалення пристрою можливе через реалізацію функції підмішування потужності.

Дослідження, проведені з використанням пристрою, показали ефективність застосування ОМК для створення системи перерозподілу потужності.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Попова І. О., Квітка С. О., Вовк О. Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження // Праці Таврійського держ. агротехнологіч. ун-ту : наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, Т. 1. С. 179–187. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187>
2. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ, 2023. С. 5–44.
3. Шевченко В. П., Белікова Л. Я. Трансформатори : навч. посіб. для студентів ВНЗ. Одеса : Одеськ. нац. політехнічн. ун-т, 2001. 128 с. URL: <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4872> (дата звернення: 25.10.2024).

4. Інвертор на базі мікроконтролера AVR / І. Білюк, О. Савченко, Р. Філоненко та ін. // Scientific Collection «InterConf». 2024. С. 326–329.
5. Кириленко О. В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему // Вісник НАН України. 2022. № 3. С. 18–23. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018>
6. Вплив відновлюваних джерел енергії на роботу електроенергетичної системи / О. М. Довгалюк, О. П. Лазуренко, Ш. Н. Саїдов, І. С. Яковенко // Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018) : матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф. 2018. С. 52–54.
7. Качан Ю. Г., Шрам О. А. Щодо структури енергоефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації // Вісник ВПІ. Серп. 2024. Вип. 4. С. 54–59. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59>
8. Лисенко А. І. Вибір інвертора для сонячних панелей. Порівняння моделей різних виробників // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики : Міжнар. наук.-техн. журнал. URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/131593/127784> (дата звернення: 27.10.2024).

Стаття надійшла до редакції 20.12.2024.

REFERENCES

1. Popova, I. O., Kvitka, S. O., & Vovk, O. Yu. (2023). Doslidzhennia nesymetrychnoho rezhymu na robotu dynamichnoho induktyvnoho navantazhennia [Research of the Asymmetrical Mode of Operation of a Dynamic Inductive Load]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu: naukove fakhove vydannia [Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University: scientific professional publication]*, Iss. 23, Vol. 1, 179–187. Zaporizhzhia. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187> [in Ukrainian].
2. DSTU EN 50160:2023 Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachenosti [Characteristics of the Voltage of the Power Supply in General Purpose Electrical Networks]. (EN 50160:2022, IDT). Kyiv [in Ukrainian].
3. Shevchenko, V. P., & Bielikova, L. Ya. (2001). *Transformatory [Transformers]*. Odesa. Retrieved from <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4872> [in Ukrainian].
4. Bilyuk, I., Savchenko, O., & Filonenko, R., et al. (2024). Invertor na bazi mikrokontrolera AVR [Inverter based on AVR microcontroller]. In *Scientific Collection «InterConf»*. (pp. 326–329) [in Ukrainian].
5. Kyrylenko, O. V. (2022). Zakhody ta zasoby peretvorennia enerhetyky Ukrainy na intelektualnu ekolohichno bezpechnu systemu [Measures and Means of Transforming the Energy Sector of Ukraine into an Intelligent Environmentally Safe System]. *Visnyk NAN Ukrainy [Bulletin of the NAS of Ukraine]*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018> [in Ukrainian].
6. Dovhaliuk, O. M., Lazurenko, O. P., Saidov, Sh. N., & Yakovenko, I. S. (2018). Vplyv vidnovliuvanykh dzherel enerhii na robotu elektroenerhetychnoi systemy [The Impact of Renewable Energy Sources on the Operation of the Electric Power System]. In *Enerhoefektyvnist ta enerhetychna bezpeka elektroenerhetychnykh system (EEES-2018): materialy II Vseukr.*

nauk.-tekhn. konf. [Energy Efficiency and Energy Safety of Electric Power Systems (EEES-2018): materials of the II All-Ukrainian Scientific and Technical Conference]. (pp. 52–54) [in Ukrainian].

7. Kachan, Yu. H., & Shram, O. A. (August, 2024). Shchodo struktury enerhoefektyvnoi elektromerezhi promyslovoho pidpriemstva z dzherelamy rozoseredzhenoї heneratsii [Regarding the Structure of an Energy-Efficient Power Grid of an Industrial Enterprise with Distributed Generation Sources]. *Visnyk VPI [Bulletin of the VPI], 4, 54–59.* <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59> [in Ukrainian].

8. Lysenko, A. I. (n.d.). Vybir invertora dlia soniachnykh panelei. Porivniannia modelei riznykh vyrobnykiv [Choosing an Inverter for Solar Panels. Comparison of Models from Different Manufacturers]. *Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky: Mizhnarodnyi nauk.-tekhn. zhurnal [Modern Problems of Electrical Engineering and Automation: International Scientific and Technical Journal].* Retrieved from <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/131593/127784> [in Ukrainian].

Y. L. Bondarenko, M. D. Petruk, D. E. Stupak, I. A. Ishchenko

THE METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF A THREE-PHASE GENERATOR THROUGH ADAPTIVE REDISTRIBUTION OF POWER BETWEEN SINGLE-PHASE CONSUMERS

The article describes a method of increasing the efficiency of the three-phase generator by applying a system of redistribution of its power between single-phase consumers. Possible approaches and methods for solving the problem of asymmetry of load of power supplies are analyzed. The structural scheme of the power supply system of single-phase consumers is proposed, which realizes a uniform load of phases in the event of load asymmetry. The order of operation of the scheme in different modes of operation of the power redistribution system between consumers is substantiated and on its basis the functioning algorithm is proposed. The substantiation of the circuit solution of the adaptive power redistribution system between single-phase consumers under the control of a single-chip microcontroller is provided and a version of its circuit diagram is developed. The requirements are formulated and on their basis the option of constructing an inverter is designed, which corresponds to the features of the proposed structural scheme according to the level of input voltage. The functioning of the program code of the single-chip microcontroller according to the proposed algorithm has been developed and investigated. The results of practical verification of the functioning of the proposed power supply system are presented, which demonstrated an increase in the efficiency of a three-phase generator by applying a system of redistribution of its power between single-phase consumers. According to the results of the experiment, the directions of further research on the improvement of the proposed scheme are formulated.

Keywords: *three-phase generator; efficiency; load asymmetry; adaptation; single-chip microcontroller; redistribution of power; pulse width modulation; differential protection; power redistribution algorithm.*