

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В публікації розглядаються можливості модернізації компенсатора реактивної потужності PIC-KVAR з метою підвищення його ефективності (шляхом зменшення затримки реакції) при застосуванні в умовах, коли споживач має динамічну характеристику навантаження. Пропонується вдосконалений алгоритм функціонування компенсатора, описана методика розробки та моделювання пристрою.

Ключові слова: *компенсатор реактивної потужності, мікроконтролер.*

1 Вступ

Не тільки споживач електроенергії вимагає від постачальника високої «якості продукту», а і постачальник вимагає від споживача деякої регламентованої «якості споживання». Ця «якість споживання» характеризується рядом параметрів, основні з яких: потужність, коефіцієнт потужності, величина гармонічних викривлень.

Коефіцієнт потужності — безрозмірна фізична величина, що характеризує споживача змінного електричного струму з точки зору наявності в навантаженні реактивної складової. Чисельно він дорівнює $\cos\varphi$, де φ — кут зсуву фаз напруги та струму. Основні споживачі електроенергії у промисловості вносять індуктивну реактивну складову потужності і знижують $\cos\varphi$. Доцільність та необхідність компенсації реактивної потужності докладно розглянуто в [2].

В роботі розглядається пристрій, що впливає саме на коефіцієнт потужності спожитої електроенергії, компенсуючи реактивну потужність, методи розробки програмного забезпечення мікроконтролера (МК). Наведено алгоритм роботи пристрою компенсатора реактивної потужності (КРП).

2 Основна частина

Предмет дослідження та модернізації. Звичайний конденсатор вирішує всі проблеми, пов'язані з індуктивною реактивною потужністю – достатньо лише під'єднати його до мережі. Але під'єднувати його необхідно саме тоді, коли навантаження споживає реактивну потужність. Саме для цього досить використовують контролер, який постійно вимірює $\cos\phi$ і комутує набір конденсаторних батарей. Таких контролерів розроблено і виготовлено чимало. Всі вони мають схожу будову та функціонал і призначені для використання у звичайних умовах мережі живлення підприємства, де динаміка зміни характеристики потужності невелика.

Але існують споживачі, динаміка зміни характеристики яких робить неможливим використання звичайних КРП. Серед таких споживачів сухопоршневий компресор стиснутого повітря виробництва Ateliers Francois (Ательє Франсуа) (рис 1, 2).



Рис. 1. Зовнішній вигляд компресора

LEROY SOMER		Mot. 3~ PLS315M-T		720 Kg	
N° 639840S.J001					
IP 23IK 08 I cl. F 40 °C S1					
V	Hz	min-1	kW	Cos φ	A
Δ380	50	1460	200	.87	375
Δ400		1468		.85	363
Y690		1468		.85	210
Δ415		1470		.84	354
Δ440	60	1760	230	.88	367
Δ460		1765		.87	354
DE NU320M		050 g		ESSO UNIREX N3	
NDE 6316 C3		1550 h			

Рис. 2. Характеристики електродвигуна.

Для підтримки заданого тиску у конструкції агрегата передбачено перепускні клапани, що з'єднують вхідні та вихідні патрубки кожної з трьох ступенів. Коли клапани відкриті агрегат знаходиться у розвантаженому стані, поршні не виконують роботи по стисканню повітря та навантаження на електродвигун досягає 15-20% [7]. Коли клапани закриті, агрегат знаходиться у навантаженому стані, поршні виконують роботу по стисканню повітря та навантаження на електродвигун близьке до 100%. На рис. 3 представлено заміри струму двигуна при навантаженому (350 А, $\cos\varphi=0,85$) і розвантаженому (150А, $\cos\varphi=0,5$) режимах роботи.

На рис. 4 представлено діаграми роботи компресора (а, б, в), звичайного КРП (г, г) та модернізованого (е, є) у оптимізованому режимі для динамічного навантаження.

Запропоновано розробити алгоритм роботи КРП, який буде аналізувати стан розряду конденсаторів шляхом контролю часу від останнього відключення батареї. Час розрядки конденсаторів для кожної батареї обиратиметься окремо і визначається її потужністю та активним опором резистора розрядки конденсаторів. Час розрядки визначається виразом [8]:

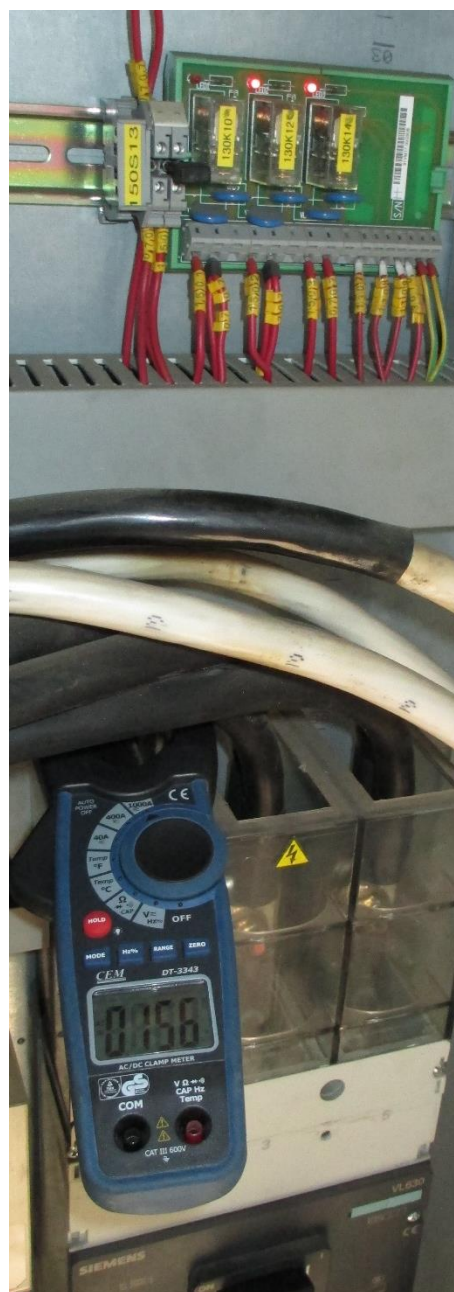
$$t = R * C * \ln \frac{\sqrt{2} * U_{\text{ном}}}{1.5 * U_{\text{роз}}},$$

де R – опір резисторів, C – потужність батареї, $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга батареї, $U_{\text{роз}}$ – напруга до якої необхідно розрядити конденсатори (10% від $U_{\text{ном}}$).

Існує і протилежна ситуація, при якій відбуваються недоцільні перекомутації конденсаторних батарей на навантаженні з повільною динамікою її змінювання. Також іноді спостерігається непередбачувана поведінка деяких контролерів (зупинка, «зависання») та недостатній функціонал (наприклад неможливість роботи в 1-фазній мережі, відсутність контролю температури установки). Як приклад, на рис. 5 показаний КРП з контролером ЕТІ. Установка не введена в експлуатацію через незадовільне функціонування.



а)



б)

Рис. 3. а) Струм 351 А в режимі «навантаження»; б) Струм 156 А в режимі «розвантаження»

Таким чином, існує можливість вдосконалення роботи КРП, насамперед, шляхом вдосконалення алгоритму комутації. Було прийнято рішення розробити власну програму для МК компенсатора без зміни схеми та будови пристрою. Для модернізації був обраний пристрій PIC-KVAR (зовнішній вигляд показаний на рис. 6).

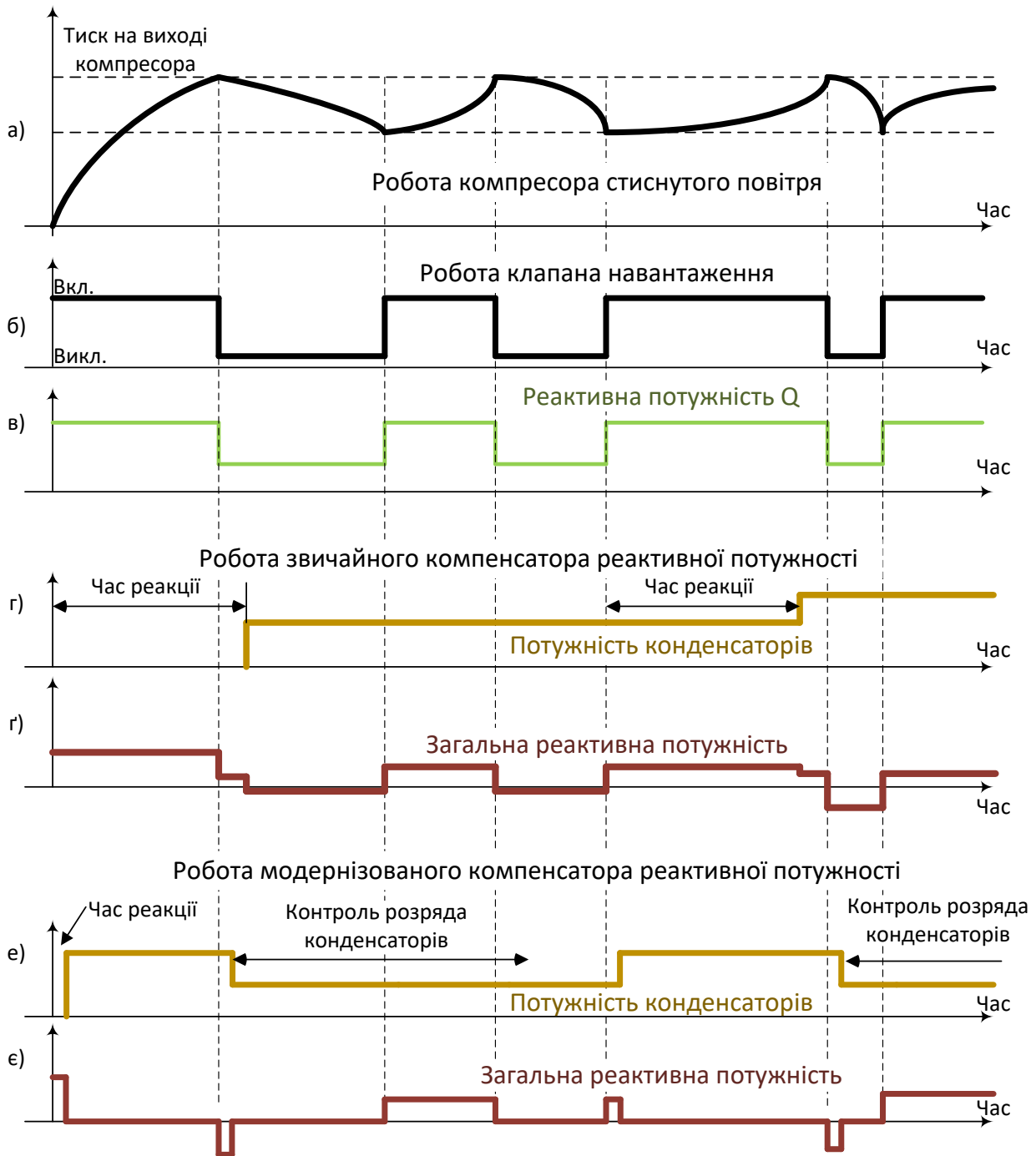


Рис. 4. Часові діаграми роботи компресора (а, б, в), звичайного КРП (г, д) та модернізованого (е, є)

Опис пристрою PIC-KVAR. КРП PIC-KVAR, що був обраний для модернізації має наступні характеристики:

- 6 вихідних каналів для підключення 6-ти контакторів конденсаторних батарей;

- контрольована потужність споживача – до 6000 кВА;
- контрольована напруга -- до 11500 В. (через вимірювальні трансформатори);
- контрольований струм -- до 3000 А. (через вимірювальні трансформатори).



Рис. 5. Установка КРП з контролером ЕТІ



Рис. 6. КРП PIC-KVAR

Модель схеми основних вузлів пристрою була зібрана в симуляторі Proteus та зображена на рис 7.

Основний недолік КРМ PIC-KVAR – занадто повільна реакція на зміну навантаження, тому метою вдосконалення було покращення алгоритму перемикання конденсаторних батарей, що надає змогу застосовувати пристрій для споживачів з динамічною характеристикою потужності (наприклад, компресор стиснутого повітря).

Методика та засоби розробки. МК, що був встановлений виробником у пристрої, має пам'ять типу FLASH, що може бути перезаписана новою програмою, але оригінальний код захищений виробником від читання. Але МК MICROCHIP PIC18F452 встановлений у панель DIP40, що дає змогу монтажу/демонтажу мікросхеми без пайки (рис. 8).

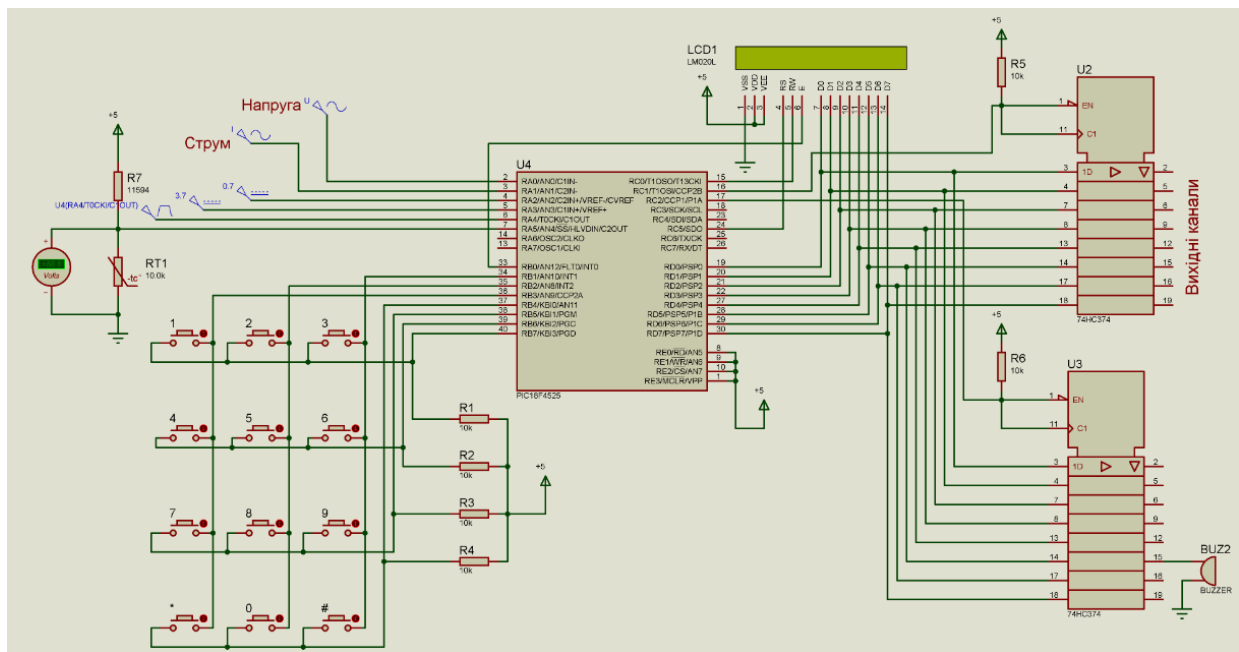


Рис. 7. Схема основних вузлів пристрою

Тому що МК PIC18F452 не рекомендований виробником для нових розробок, він був замінений його вдосконаленим (і більш дешевим) аналогом PIC18F4520.

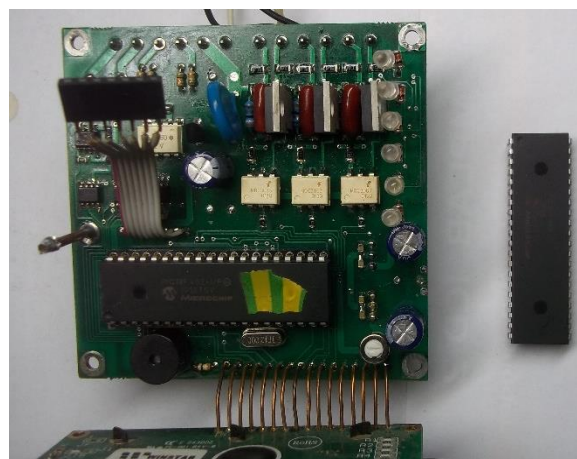


Рис. 8. Плата КРМ PIC-KVAR

Для розробки програми було обрано інтегровано середовище MPLAB X (безкоштовне) разом з компілятором для мови програмування Си MPLAB XC8 (платний, з повнофункціональною демо-версією на 60 днів) для 8-розрядних мікроконтролерів MICROCHIP, а також програмний пакет Proteus (версія для ознайомлення з функціоналом). Послідовність розробки програми із

застосуванням перелічених засобів показана на рис. 9.

На завершальній стадії був використаний внутрішньосхемний відлагоджувач ICD3 виробництва Microchip. Цей пристрій дозволяє приєднатись до реального контролера, встановленого в пристрій, записувати в нього код програми, зчитувати значення регістрів пам'яті під час його функціонування, зупиняти виконання програми для детального аналізу «поведінки» пристрою. ICD3 працює в парі з IDE MPLAB X.

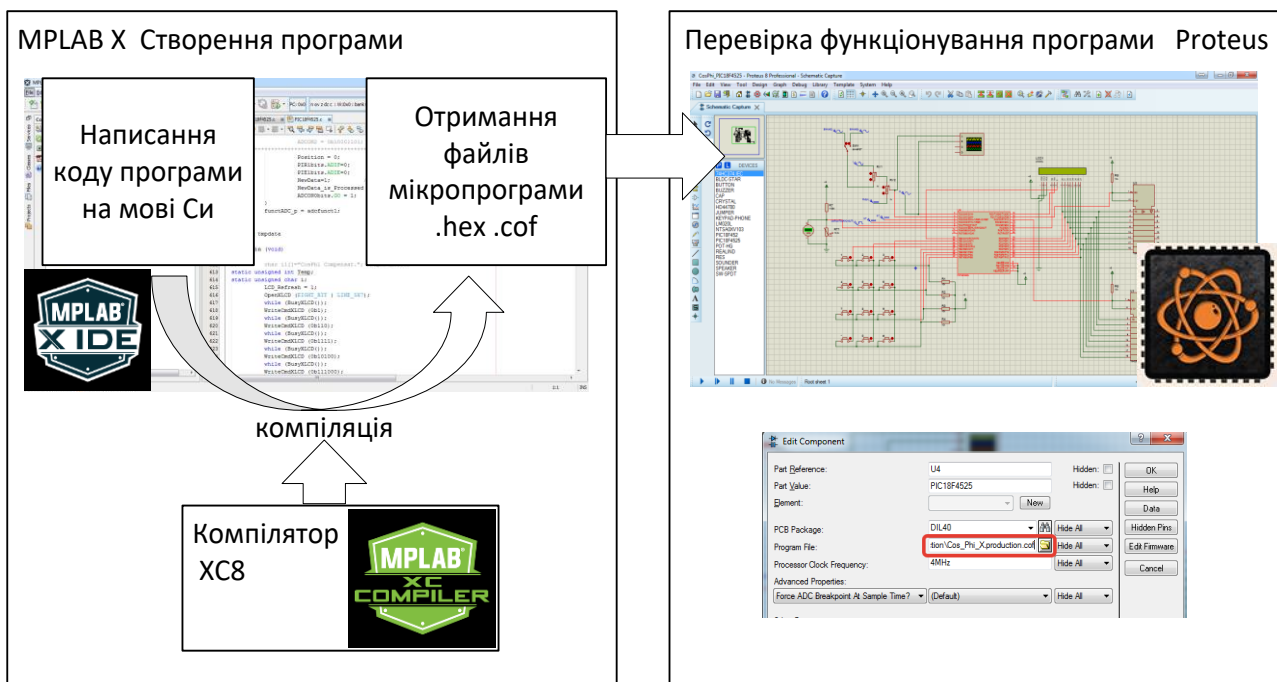


Рис. 9. Схема розробки програмного забезпечення МК

Схема роботи при використанні ICD3 показана на рис. 10. Також довелось підпаяти до плати пристрою тимчасовий роз'єм для програмування (рис. 11).

Розробка принципу вимірювання та виконання замірів мережі. Вивчення схеми пристрою дало змогу отримати перелік сигналів, що подаються на МК для вимірювання:

1. Аналоговий сигнал форми струму (червоний, рис. 12, 13).
2. Аналоговий сигнал форми напруги (синій, рис. 12, 13).

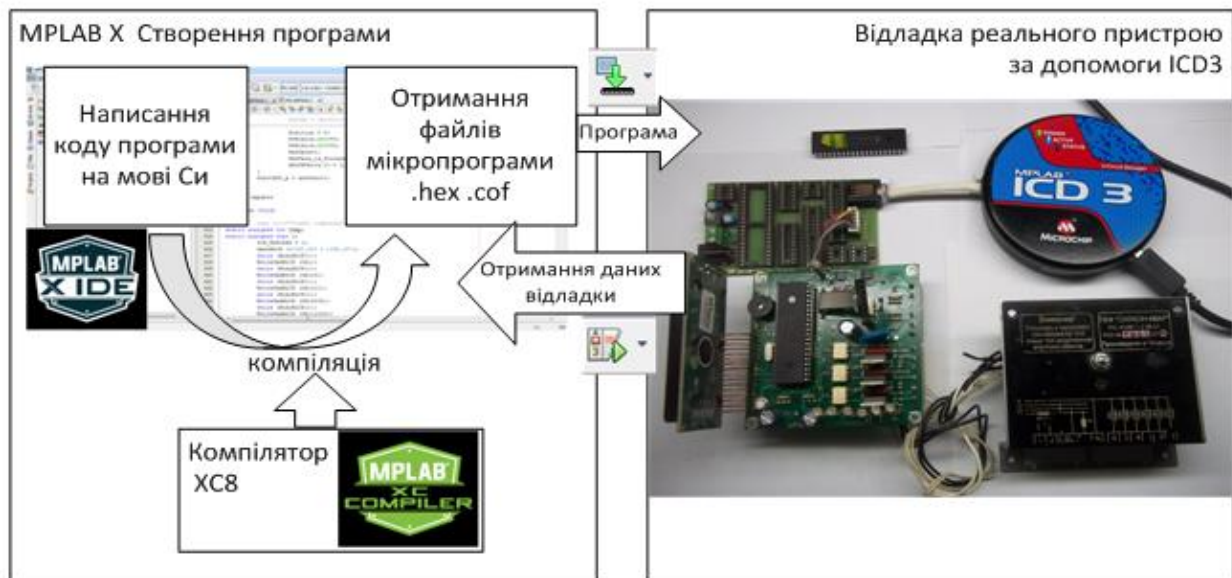


Рис. 10. Схема програмування МК

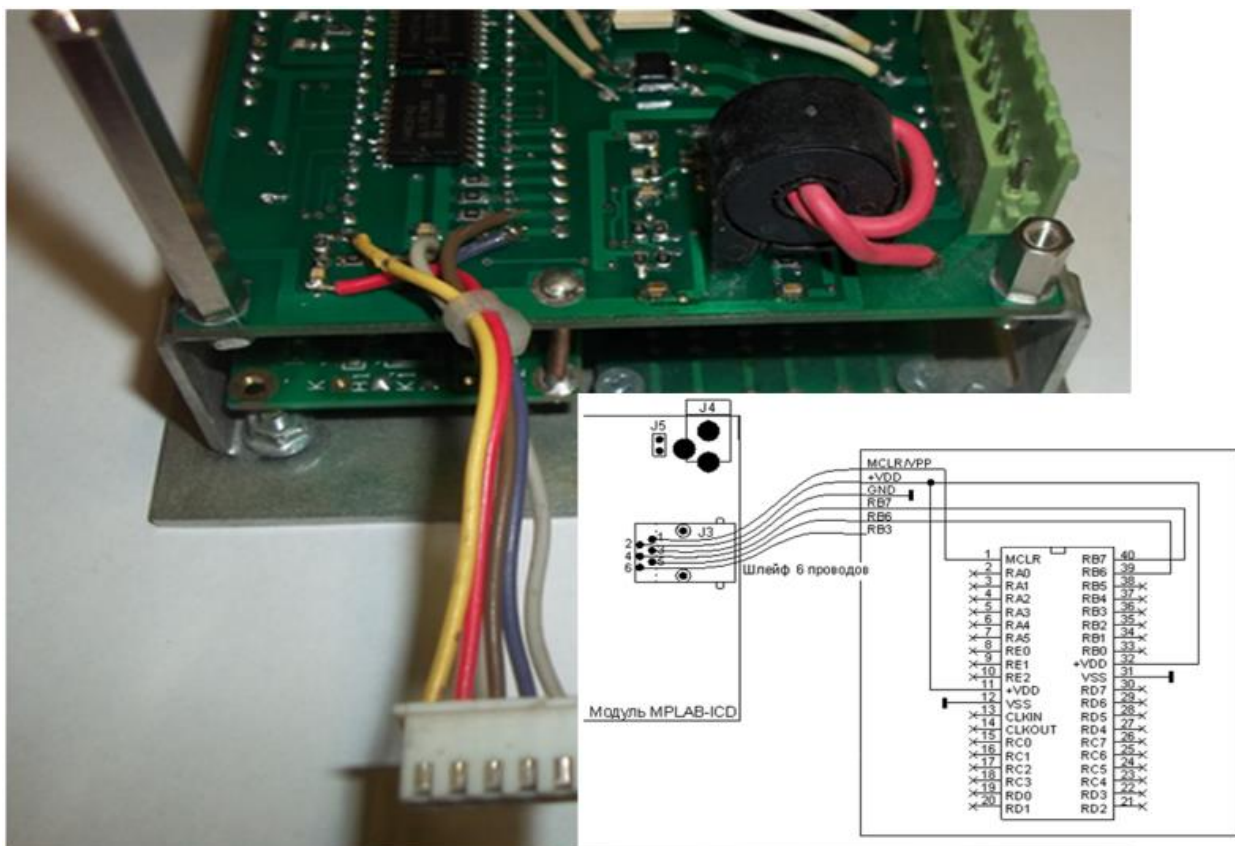


Рис. 11. Тимчасовий роз'єм для програмування

3. Меандр амплітудою 5В, що по частоті та фазі збігається з сигналом напруги (фіолетовий, рис. 12, 13).

4. Опорні напруги 0.7 В та 3.7 В для узгодження рівнів мікроконтролера та аналогової частини схеми пристрою.

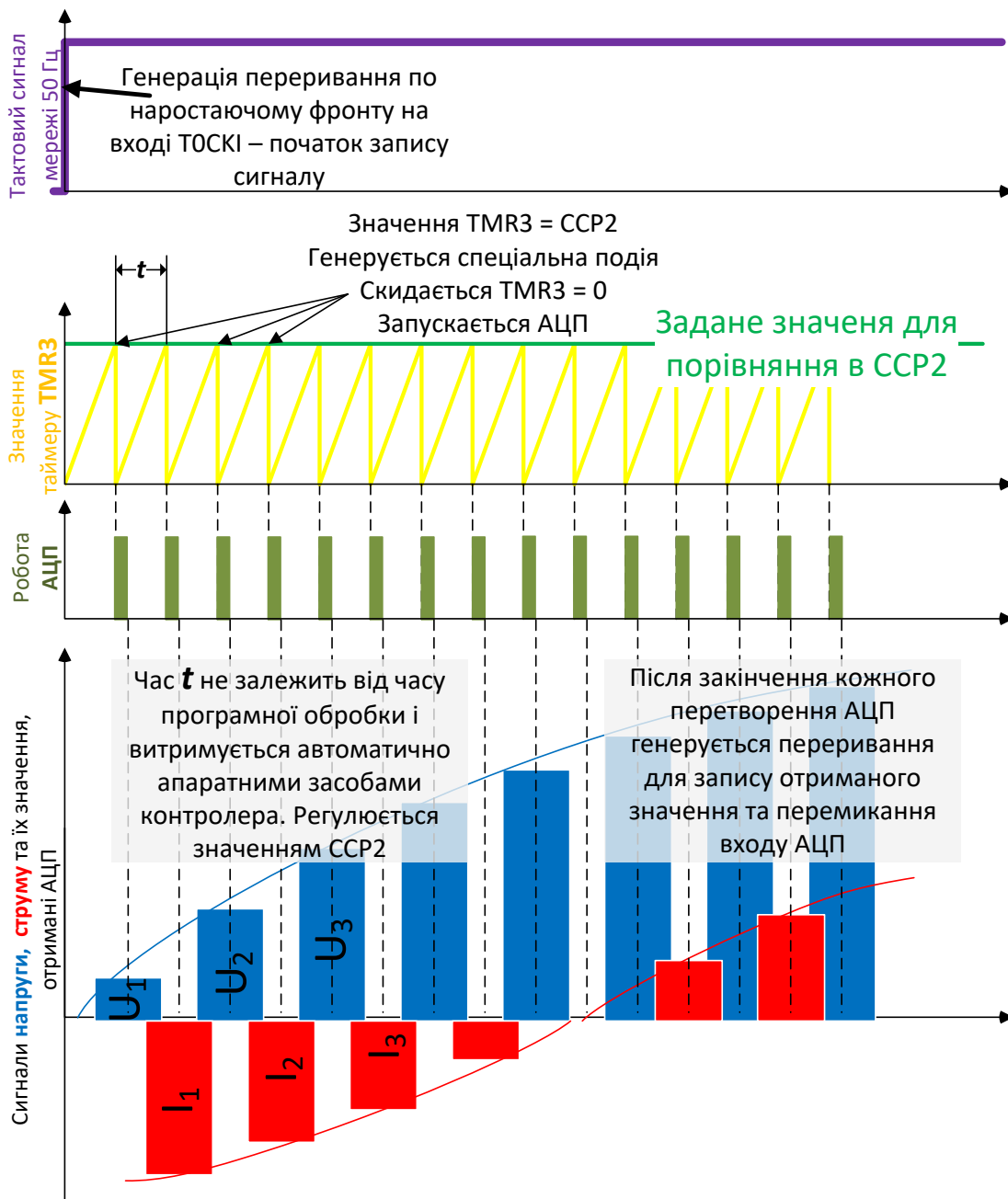


Рис. 12. Отримання форми сигналів струму та напруги

Призначення пристрою – компенсувати реактивну потужність споживача, тому основною задачею програми є визначення значення реактивної потужності, яка діє в даний час в контрольованій мережі. Для цього було визначено наступний алгоритм дій:

1. Отримання форми сигналів напруги та струму у вигляді масиву цифрових значень, що отримуються через чітко визначені проміжки часу t .
2. Обчислення їх середньоквадратичних (діючих) значень.
3. Обчислення повної потужності S :

$$S = U_{\text{ср.кв.}} \cdot I_{\text{ср.кв.}}; \quad U_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n U_i^2}{n}}; \quad I_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n I_i^2}{n}}.$$

4. Обчислення активної потужності P (рис 13):

$$P = \frac{\sum_{i=0}^n P_i}{n}; \quad p_1 = U_1 \cdot I_1; \quad p_n = U_n \cdot I_n;$$

5. Обчислення $\cos\varphi$:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

6. Обчислення реактивної потужності:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Для забезпечення однакових проміжків часу t між замірами миттєвого струму та напруги використані наступні апаратні можливості контролера:

- налаштоване переривання від модулю аналого-цифрового перетворення (АЦП або ADC);
- налаштований запуск АЦП від тригера спеціальної події, що генерується модулем захват/порівняння/ШИМ ЗПШ (ССР2) разом з таймером 3 (TMR3);
- налаштоване переривання від таймеру 0, на який подано тактовий сигнал вимірюваної мережі 50 Гц через вивід T0СКІ.

Використання апаратних можливостей МК надало можливість уникнути відхилень замірів у часі. Докладна схема отримання форми сигналів напруги та струму за допомогою модулів ADC, ССР2 та TMR3 проілюстрована рис. 12.

МК має дворівневу систему пріоритетів переривань. Вищий пріоритет має переривання від тактового сигналу мережі 50 Гц, тому що під час запуску та зупинки сканування (вимірювання) затримка оброблення небажана. Всі інші процедури сканування виконуються на апаратному рівні і допускають значну затримку опрацювання власних переривань, що ніяк не впливає на результат.

На основі миттєвих значень напруги та струму обчислюється повна потужність S та активна потужність P , а з них – реактивна потужність Q (рис. 13).

Алгоритм вибору та перемикання конденсаторних батарей. Мета функціонування алгоритму перемикання конденсаторних батарей, на перший погляд, виглядає нескладною – необхідно під'єднати набір конденсаторів, сумарна потужність яких еквівалентна реактивній потужності споживача в даний момент часу. Але алгоритм ускладнюється через велику кількість умов та обмежень, які накладають на пристрій властивості силової мережі, конденсаторів, норми енергопостачальника.

При розрахунку конденсаторної батареї необхідно врахувати:

- потужність, яку необхідно компенсувати;
- дискретність (мінімальну величину компенсації реактивної потужності, що дорівнює найменшій встановленій конденсаторній батареї);
- динаміку зміни потужності;
- час затримки між двома вимкненнями батареї, якій потрібен для її розрядки.
- необхідність мінімізації кількості перемикань конденсаторних батарей;
- ефекти старіння конденсаторів (поступове зменшення ємності);
- небажаність перекомпенсації.

Перш за все необхідно визначити мінімальний крок перемикання, тобто найменшу величину відхилення реактивної потужності від заданої, на яку пристрій буде реагувати. Необхідність підключення конденсаторної батареї настає тоді, коли величина реактивної потужності споживача перевищує мінімальний крок перемикання.

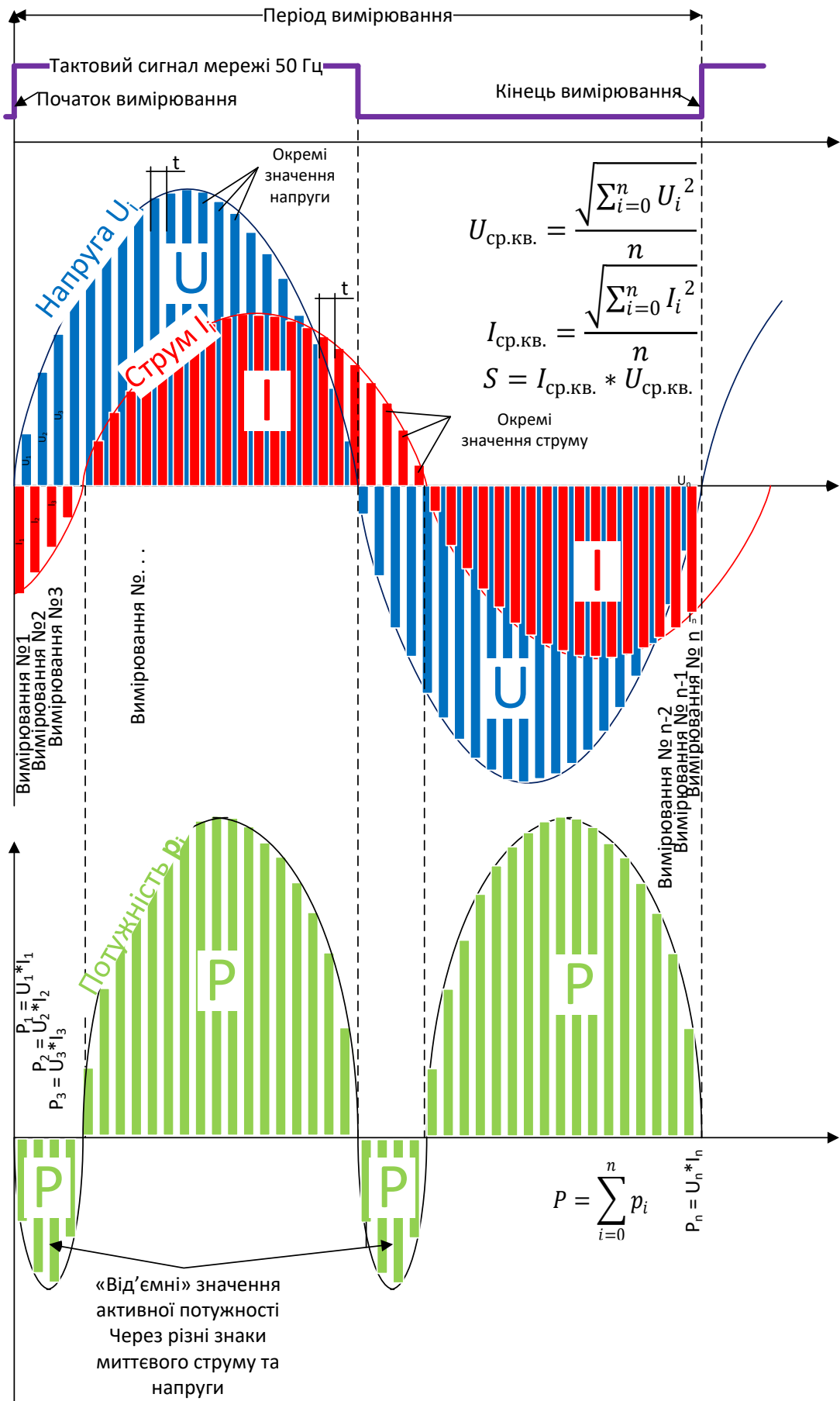


Рис. 13. Отримання значення активної потужності

Для визначення набору конденсаторних батарей, що необхідно увімкнути, програма виконує наступні дії:

- перебираються усі можливі комбінації батарей та запам'ятовуються ті комбінації, що забезпечують необхідну величину потужності;
- перевіряється ступень розрядки батареї, тобто її готовність до увімкнення в мережу;
- відбираються ті варіанти, які можуть бути реалізовані з найменшою кількістю перемикань.

В немодернізованому варіанті КРП виконував значно простіший алгоритм перемикання, що полягав в почерговому перемиканні усіх комбінацій батарей від варіанту з найменшою сумарною потужністю до варіанту з найбільшою потужністю, поступово наближуючись до потрібної величини. Такий алгоритм роботи прийнятний тільки у випадку, коли характеристики мережі змінюються досить повільно.

Алгоритми функціонування пристрою до і після модернізації наведено на рис. 14, 15 відповідно.

3 Висновок

Досягнені результати. Головна перевага розробленого пристрою – наявність контролю розрядження конденсаторних батарей. При його відсутності час реакції компенсатора не може бути меншим за час розрядки конденсаторів (до декількох хвилин). З контролем розрядження КРП може виконувати компенсацію споживачів з динамічною характеристикою навантаження з затримкою, що не перевищує 30 секунд.

Незначним недоліком можна вважати збільшення кількості налаштувань та можливість некоректного налаштування, що призведе до надто частих надлишкових перемикань.

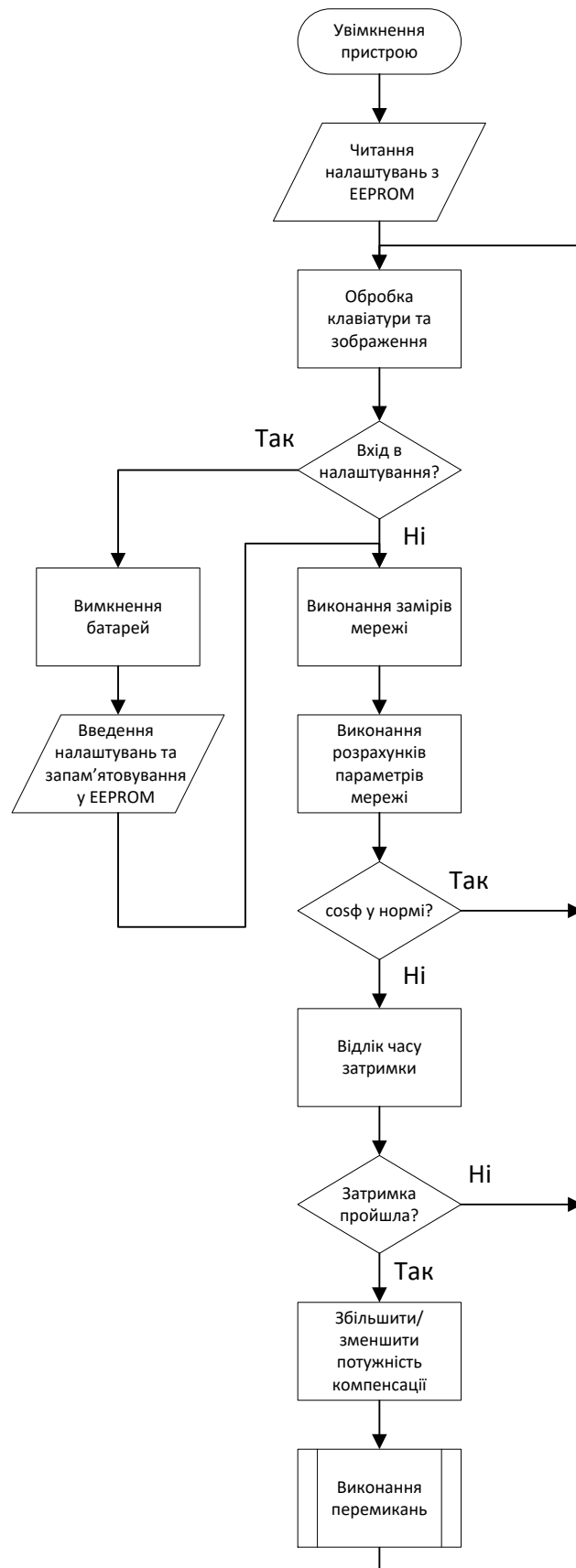


Рис. 14. Алгоритм функціонування КРП до модернізації

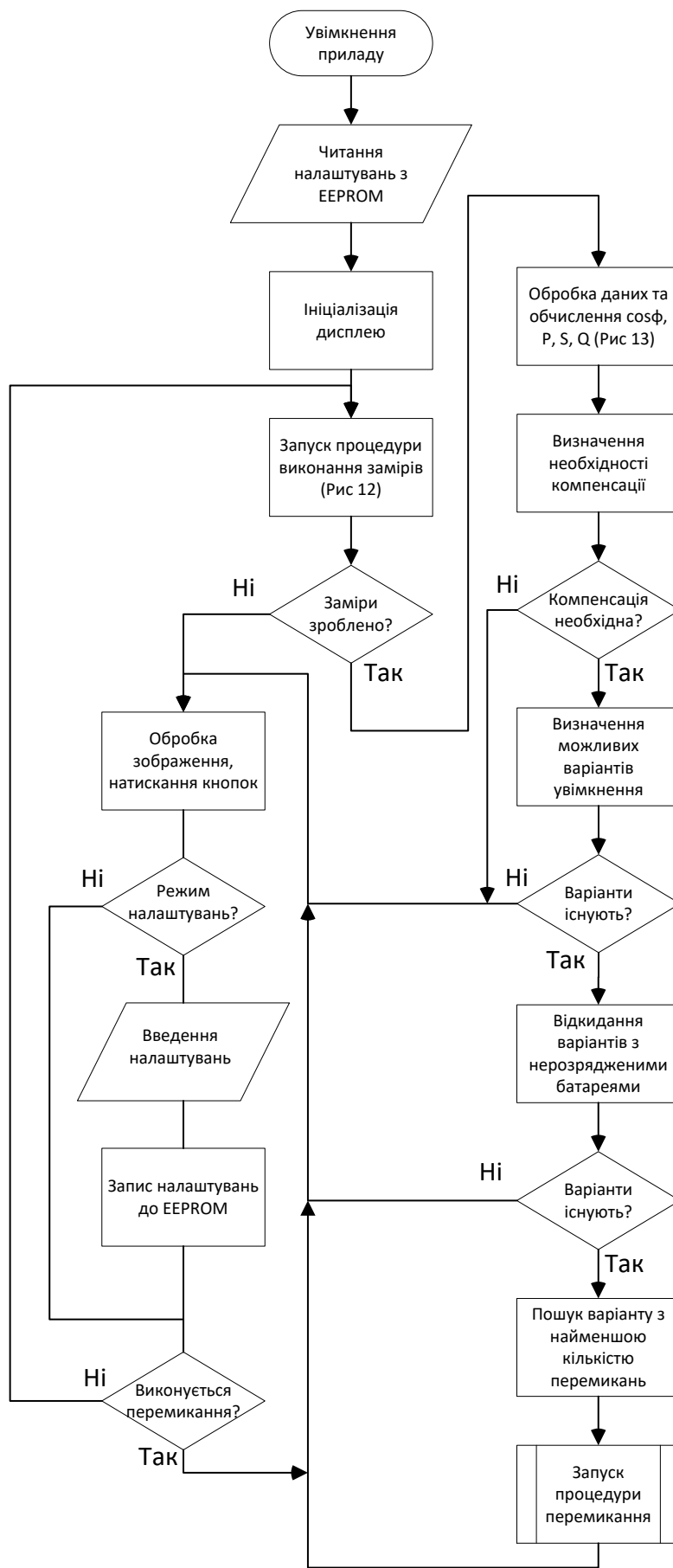


Рис. 15. Алгоритм функціонування модернізованого КРП

Напрямами подальшого вдосконалення КРП можуть бути:

- застосування алгоритмів самонавчання, передбачення поведінки мережі;
- розробка автоматичних алгоритмів налаштування – наприклад, алгоритму автоматичного визначення потужності конденсаторних батарей (реалізовано в компенсаторах виробника ЕТІ) та алгоритму оцінювання стану конденсаторних батарей шляхом контролю реакції мережі на комутацію;
- розробка методів програмного контролю розрядки батарей через контроль імпульсу струму у момент підключення батареї та, відповідно, автоматичної корекції заданого часу розрядки конденсаторів;
- розробка індикації статистичних даних функціонування пристрою за визначений оператором інтервал часу;
- впровадження контролю температури устаткування.

Посилання

1. *Регулятор реактивной мощности PIC-KVAR. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. НКФ «Силкон-Квар». Киев 2008.*
2. *Статья «Коэффициент мощности» – Режим доступа до довідника: https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_мощности..*
3. *PIC18FXX2. Однокристальные 8-разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры с 10-разрядным АЦП компании Microchip Technology Incorporated – Режим доступа до довідника: http://labkit.ru/userfiles/file/documentation/PIC_rus/PIC18F242_252_442_452.pdf.*
4. *PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D and nanoWatt Technology – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39626e.pdf>.*
5. *MPLAB® ICD 3 In-Circuit Debugger User's Guide For MPLAB X IDE – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002081B.pdf>.*
6. *MPLAB® X IDE User's Guide – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002027D.pdf>*
7. *Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп.— Москва: Энергоатомиздат, 1984. - 416 с.*

8. *Шишник С. Разряд конденсаторных батарей установок компенсации реактивной мощности / Сергей Шишник. // Силовая электроника. – 2006. – №2. – С. 50 – 52.*

Authors:

A. Sivolap, A. Tyrtysnikov

Software development for reactive power compensator

Abstract. Publication considers abilities of PIC-KVAR reactive power compensator modernization, with purpose to increase it's efficiency by decrease of reaction delay, in conditions of dynamical load characteristic of consumer. Proposed improved compensator workflow algorithm, described development method and modeling of device.

Keywords: reactive power compensator, microcontroller.

Авторы:

Сиволап А.В., Търтышников А.И.

Разработка программного обеспечения для компенсатора реактивной мощности

Аннотация. В публикации рассматриваются возможности модернизации компенсатора реактивной мощности PIC-KVAR с целью повышения его эффективности (путем уменьшения задержки реакции) при применении в условиях, когда потребитель имеет динамическую характеристику нагрузки. Предлагается усовершенствованный алгоритм функционирования компенсатора, описана методика разработки и моделирования устройства.

Ключевые слова: компенсатор реактивной мощности, микроконтроллер.