

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

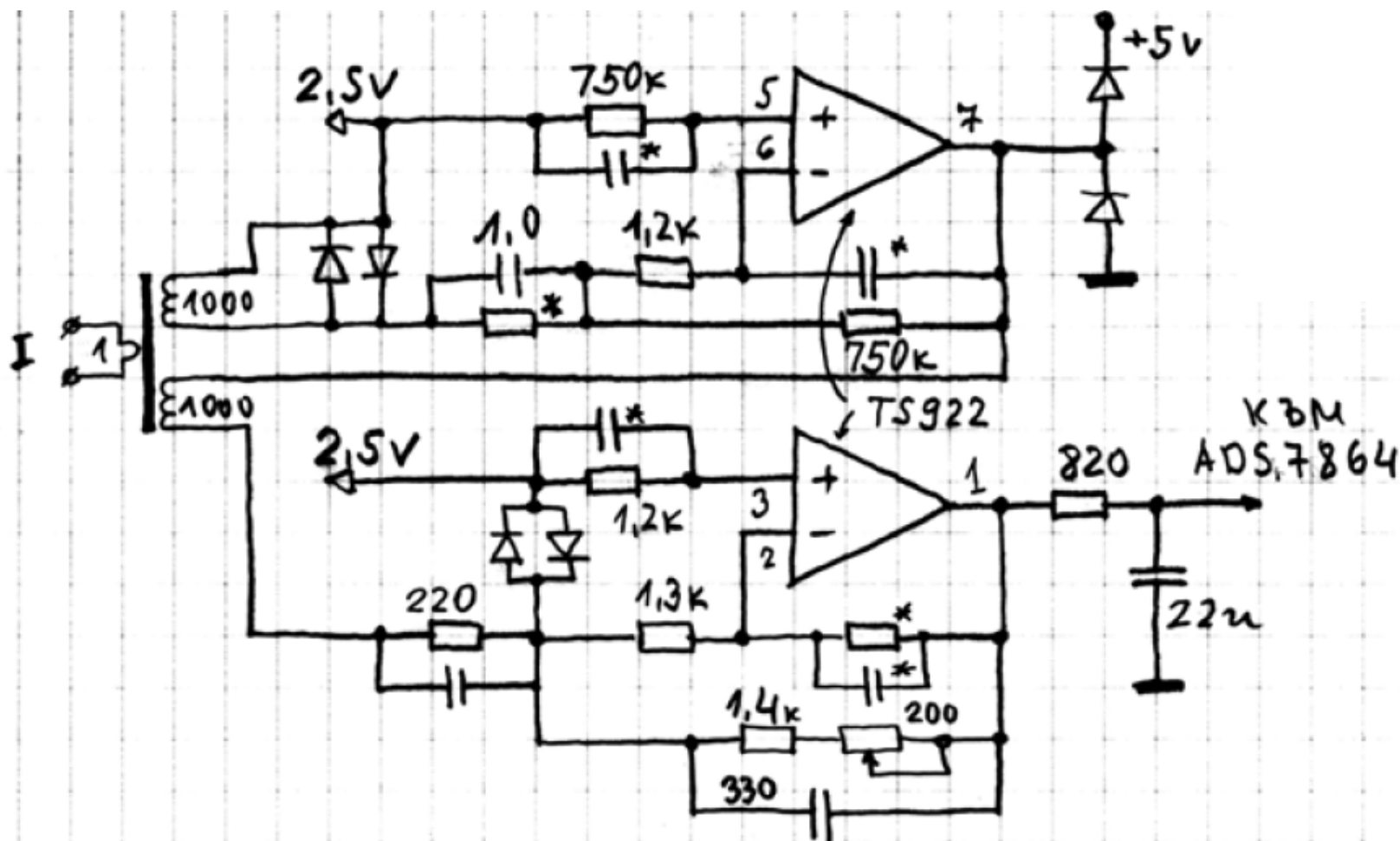
Преобразуватели на ток

Следващата схема е на преобразувател на ток в напрежение с токов трансформатор за прецизни измервателни преобразуватели с клас 0,2 и номинален ток 1А. Схемата е значително усложнена като повечето от допълнителните елементи са за защита и за гарантиране нейната устойчивост. Трите двойки диоди са поставени на намотките на трансформатора защото от там могат да навлязат опасни по стойност напрежения (при претоварване и аварии).

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на ток



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на ток

За устойчивост усилването на ОУ с обратна връзка е намалено на около 600 пъти и са добавени елементите означени със звезда. Тези, на пръв поглед извънредни мерки, се налагат поради много дълбоката обратна връзка през трансформатора и възможността да се прехвърля паразитен сигнал през взаимния капацитет на намотките. Този сигнал може да създава и положителна обратна връзка. Също така в трансформатора токът и напрежението са дефазирани (90°). Затова последователно на намотката в изхода на първия ОУ е добавен резистор 220Ω .

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на ток

Вторият усилвател е преобразувател на ток в напрежение. Стойностите на резисторите в обратната връзка са изчислени така, че размахът на напрежението в изхода да е около 5V при максимална стойност на тока:

$$1\text{A}/1000=1\text{mA}; 1\text{mA}+20\% - 1,2\text{mA}; 1,2 \cdot \sqrt{2}=1,7\text{mA}.$$

Стойността на съпротивлението в обратната връзка се намира според израза $2,5\text{V} / 1,7\text{mA} = 1,47\text{k}$. За компенсиране толерансите на елементите е предвидена настройка в тесни граници – резисторът е съставен от един с постоянна стойност (1,4k) и тример-потенциометър.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

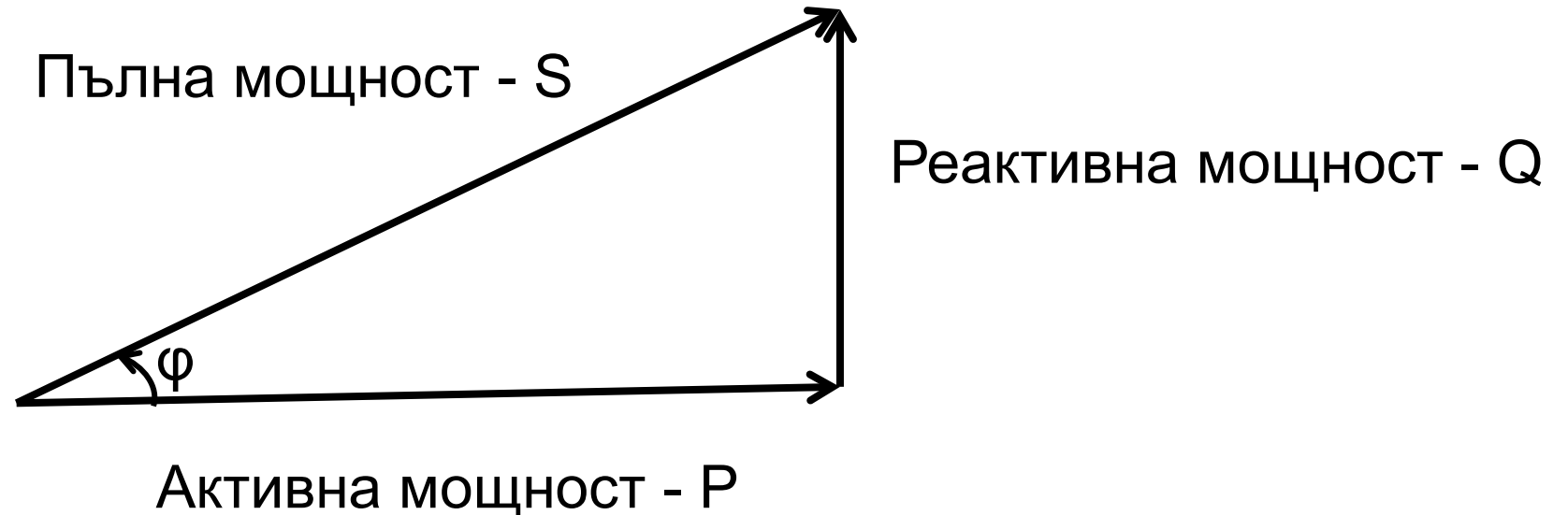
Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

$$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

$$P = S \cdot \cos\varphi$$

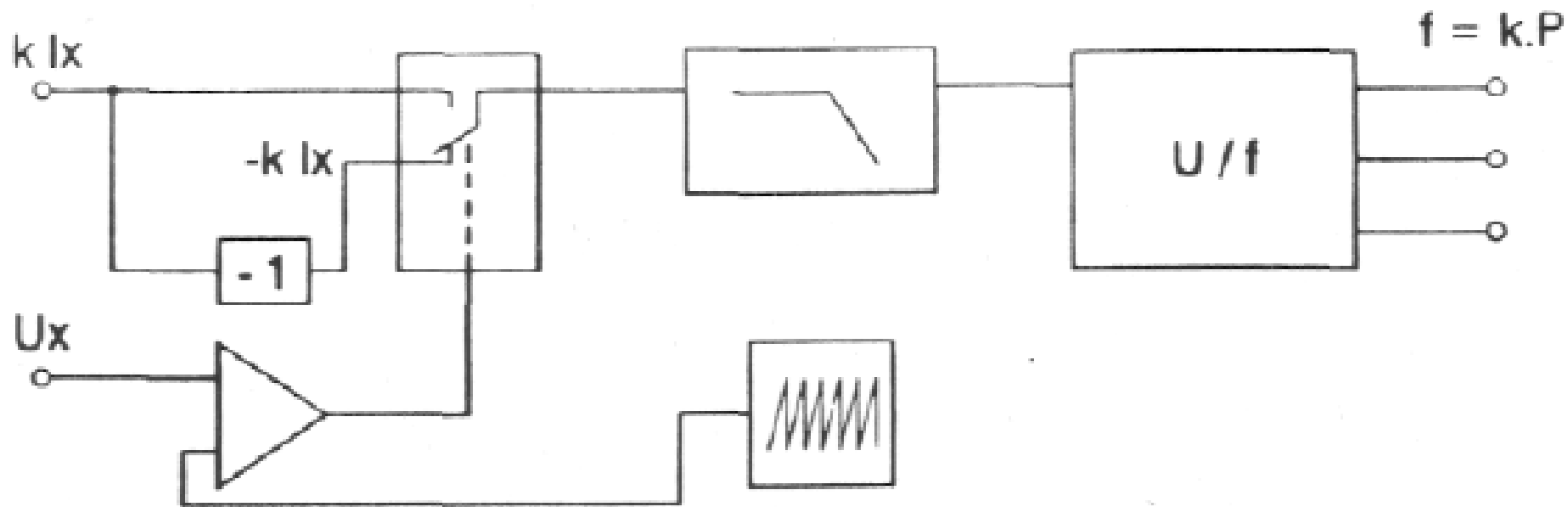
$$Q = S \cdot \sin\varphi$$



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



Блокова схема на аналогов измервателен умножител с широчинно импулсна модулация (ШИМ)

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Схемата съдържа компаратор, който сравнява входното напрежение U_x с подходящо подбрано по амплитуда и честота трионообразно напрежение. Компараторът управлява един аналогов ключ, който подава правата или инверсната стойност на сигнал, пропорционален на тока I_x . Високото ниво подава инверсния сигнал, а ниското – правия. Средната стойност на сигнала на изхода на аналоговия ключ е равна на средната стойност на произведението между тока и напрежението, съответно на мощността - $(U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos\varphi)$.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

След филтриране с нискочестотен филтър постояннотоковият сигнал се преобразува от блока U/f в честота. Измерването на мощността се свежда до измерване на честотата, а измерването на енергията до броене на импулсите на изхода на преобразувателя.

При синусоидални напрежение и ток грешката на този преобразувател се определя от точността на инвертора на тока I_x , от бързодействието на ключа и от параметрите на генератора на трионообразно напрежение. Типичните стойности на достигнатия клас на точност е 0,05-0,1%.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

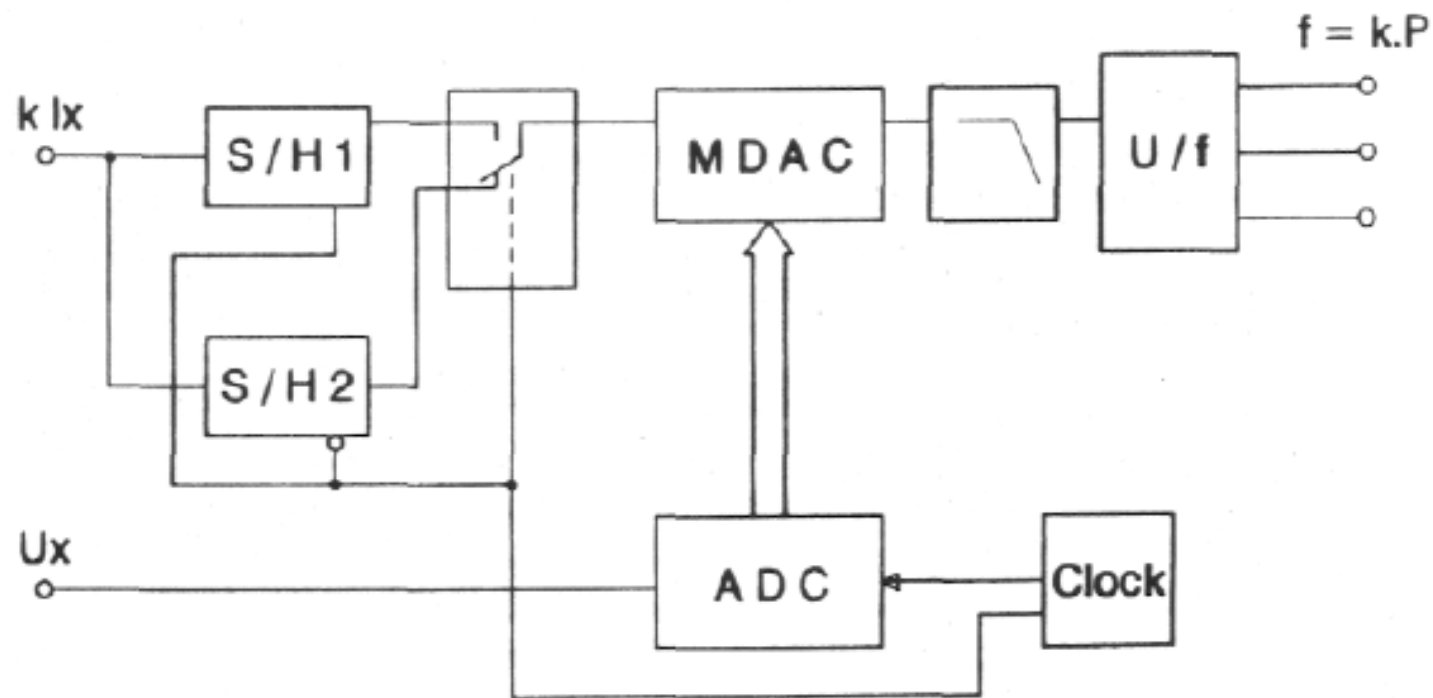
Преобразуватели на мощност

От принципа на работа се приема, че входните сигнали (U_x и I_x) не се променят за един период на трионообразното напрежение. За да бъде вярно това допускане, честотата на генератора на трионообразно напрежение трябва да се избере достатъчно висока. Това обаче води до влошаване на линейността и точността, дължащо се на крайното време за превключване на аналоговите ключове. Фирмените източници сочат, че се използва честота 5-6 kHz, което ограничава отчитането на хармониците до 20 - 30 номер.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



Блокова схема на измервателен умножител с използване на АЦП и ЦАП

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Моментната стойност на напрежението на изхода на умножителния цифрово-аналогов преобразувател (MDAC) е пропорционална на произведението на моментната стойност на тока и на измерената от аналогово-цифровия преобразувател (ADC) моментна стойност на напрежението. Закъснението на аналого-цифровия преобразувател може да се компенсира като се въведе закъснение в канала на тока чрез подходяща схема, включена на аналоговия вход на умножителния цифрово-аналогов преобразувател (MDAC).

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

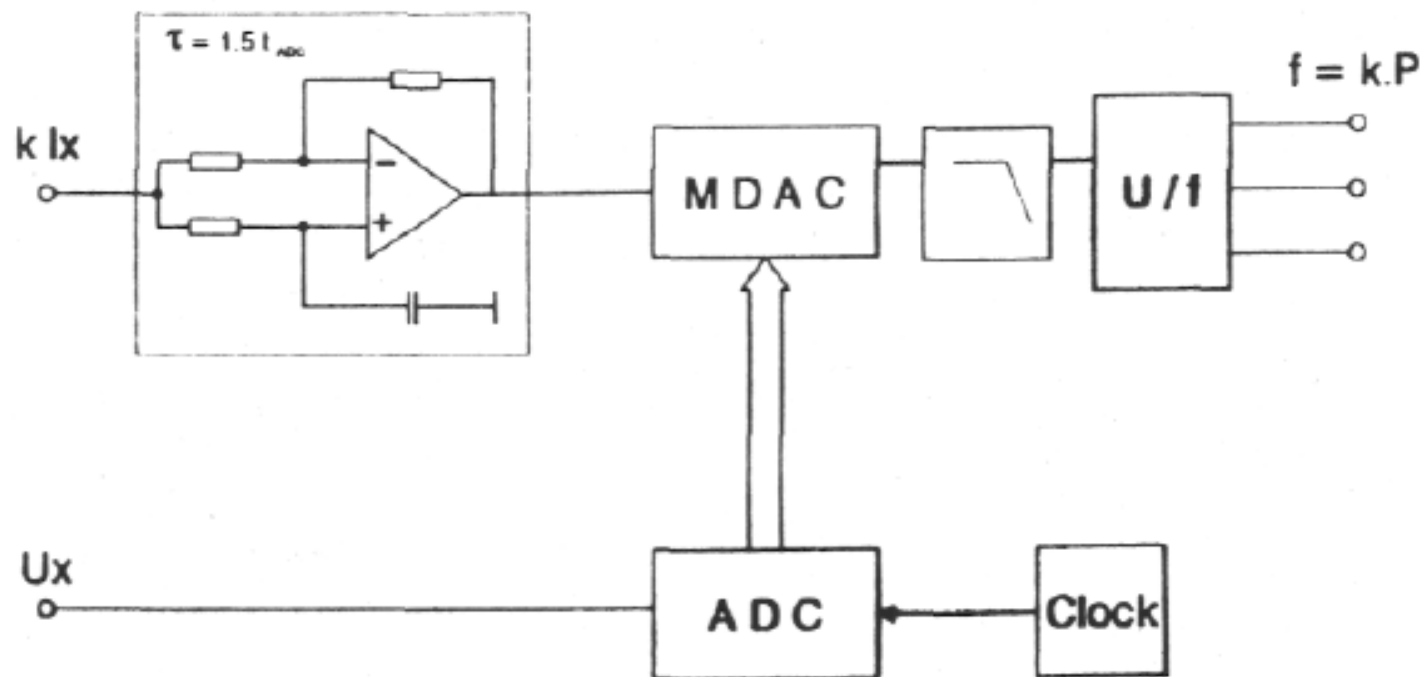
Преобразуватели на мощност

Преобразувателят използва две схеми "следене-запомняне" S/H1 и S/H2. Те се управляват синхронно с аналогово-цифровия преобразувател /ADC/ така, че на аналоговия вход на умножителния цифрово-аналогов преобразувател (MDAC) да постъпва запомнената стойност за тока от момента на стартирането на ADC. Това води до известно усложняване на схемата и е оправдано, когато е много важно спазването на фазовите съотношения (например при измерване на реактивна мощност).

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



Блокова схема на измервателен умножител с използване на АЦП и ЦАП и закъснение в токовия канал

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Схемата може да се прилага за точности от 0,05 до 0,1%. При този случай схемите за синхронизация са заменени със схема за закъснение с времезакъснение, компенсиращо закъснението на аналогово-цифровия преобразувател.

При използване на стандартни 12-разрядни преобразуватели се достига точност, подходяща за уреди с клас 0.1%.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Честотата на дискретизация без да се влошават параметрите на преобразуване може да бъде 50 kHz. Това означава, че в изходния резултат ще бъдат включени и хармоници на входните ток и напрежение със значително по-висок номер спрямо случая на умножителя с широчинно-импулсна модулация (ШИМ).

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Измерването на реактивната мощност се извършва по същия начин както се измерва активната, но единият от сигналите преди това се дефазира на 90° (много точно). Ако това е сравнително проста задача за синусоидален сигнал с постоянна честота, за тока и напрежението в реалната мрежа не е. Промяната на честотата при фиксирани фазо-изместващи вериги ще води до грешки, съизмерими със стойността на консумираната реактивна енергия.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Формата на напрежението и особено на тока в повечето случаи е далече от синусоида. Това не позволява използването на елементарни решения за дефазирание. Следващата схема може да се използва при измерване на реактивна мощност с точност по-добра от 0,5 %. С нея токът или напрежението се дефазират на 90° , а след това се използва измерител на активна мощност.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

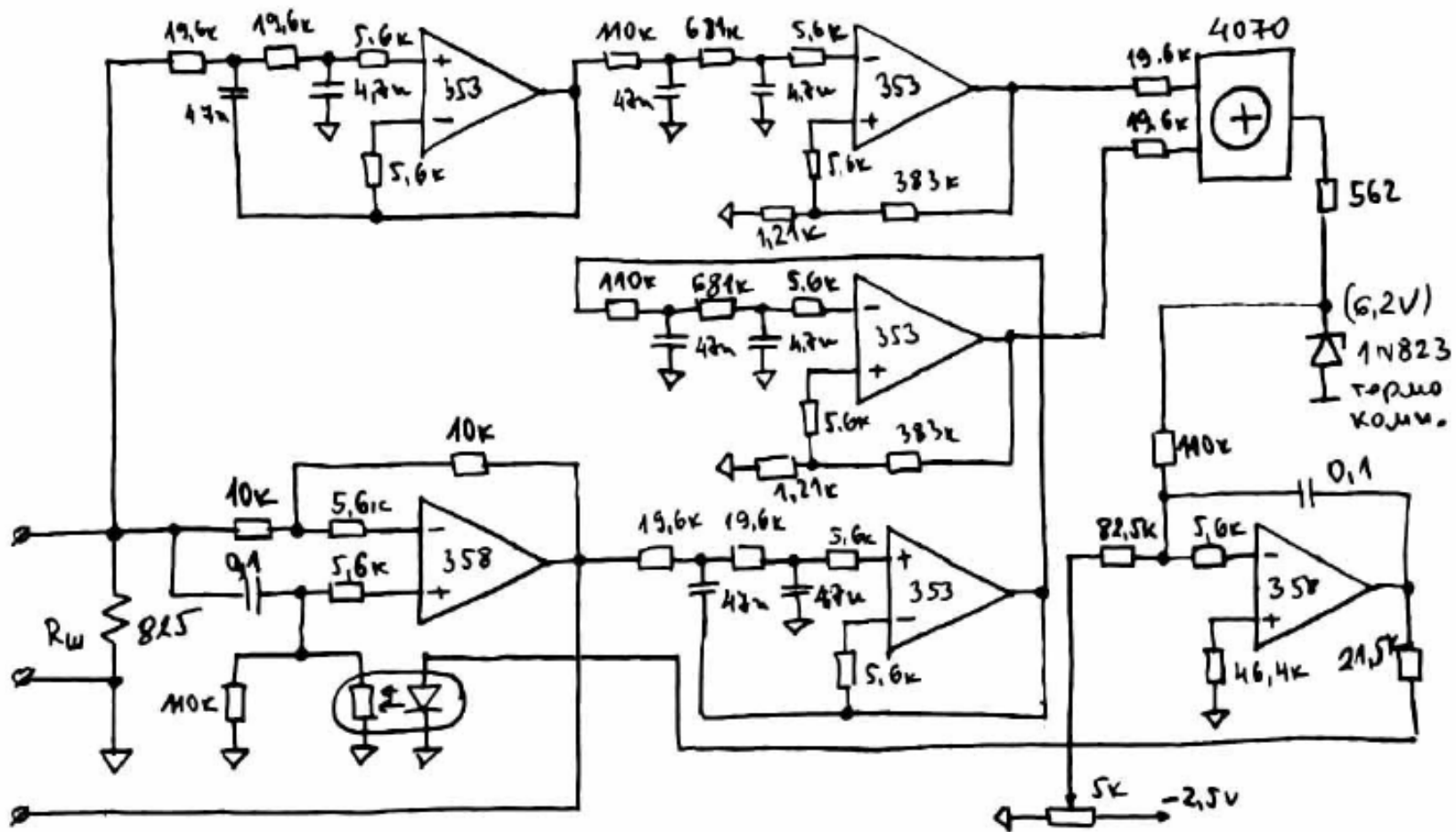


Схема за дефазирание сигнала на тока на 90°

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

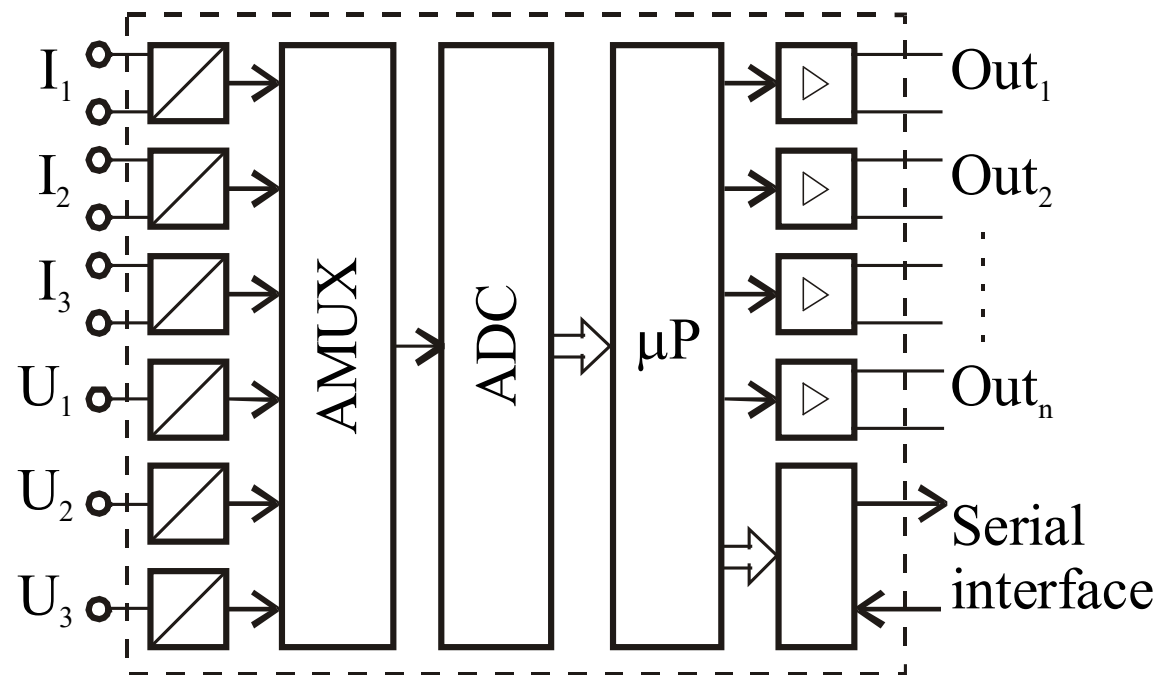
Дефазирането на сигнала става със схема на повторител, на чийто неинвертиращ вход има честотно зависима верига. Времеконстантата на тази верига се променя с управляем фоторезистор. Сигналите преди и след дефазирането се сравняват със схема на изключващо "ИЛИ", като сигналът в изхода на схемата при 90° ще е с коефициент на запълване 0,5. Този сигнал се преобразува в напрежение което се сравнява с еталонно напрежение със стойност $-2,5V$. Предвидена е настройка на това напрежение за да се компенсират грешките от толерансите на елементите.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Съвременните измервателни преобразуватели позволяват чрез параметризиране да бъдат използвани за различни приложения в различни захранващи мрежи и затова имат по три напрежителни и три токови входа, както е показано на блоковата схема.



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Основните модули на измервателния преобразувател са:

- входни преобразуватели на напрежение и ток за трите фази, необходими за нормиране на сигналите, подавани за аналогово-цифрово преобразуване;
- аналогов мултиплексор – 6 канален (AMUX);
- аналогово-цифров преобразувател (ADC);

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

- високопроизводителен микроконтролер или цифров сигнален процесор (μP) с голяма програмна и енергонезависима EEPROM и RAM памети за данни за необходимите изчисления, преобразувания и управление на визуализацията и комуникацията с персонален компютър;
- интерфейсен модул, който поддържа комуникация чрез аналогови изходни сигнали или индустриален цифров интерфейс.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Показаните схеми на входни преобразуватели обикновено се свързват към вградените в микроконтролерите аналогово-цифрови преобразуватели. Съществуват схеми на монолитни аналогово-цифрови преобразуватели, които комуникират по сериен интерфейс с микроконтролера. Този интерфейс позволява лесно галванично развързване и тогава биха могли да се използват шунтови резистори като преобразуватели на ток в напрежение.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

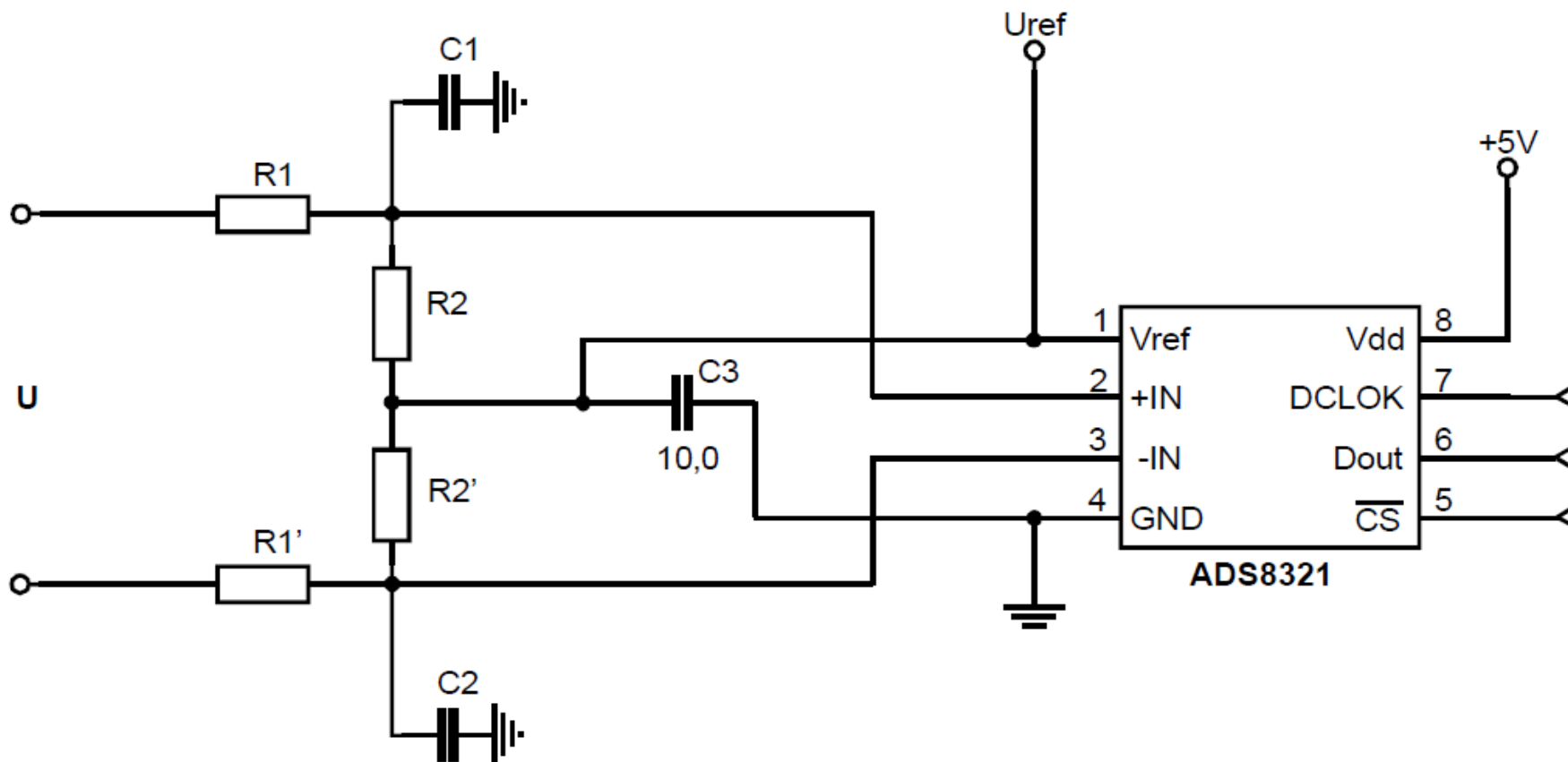


Схема на входна верига на преобразувател на напрежение

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

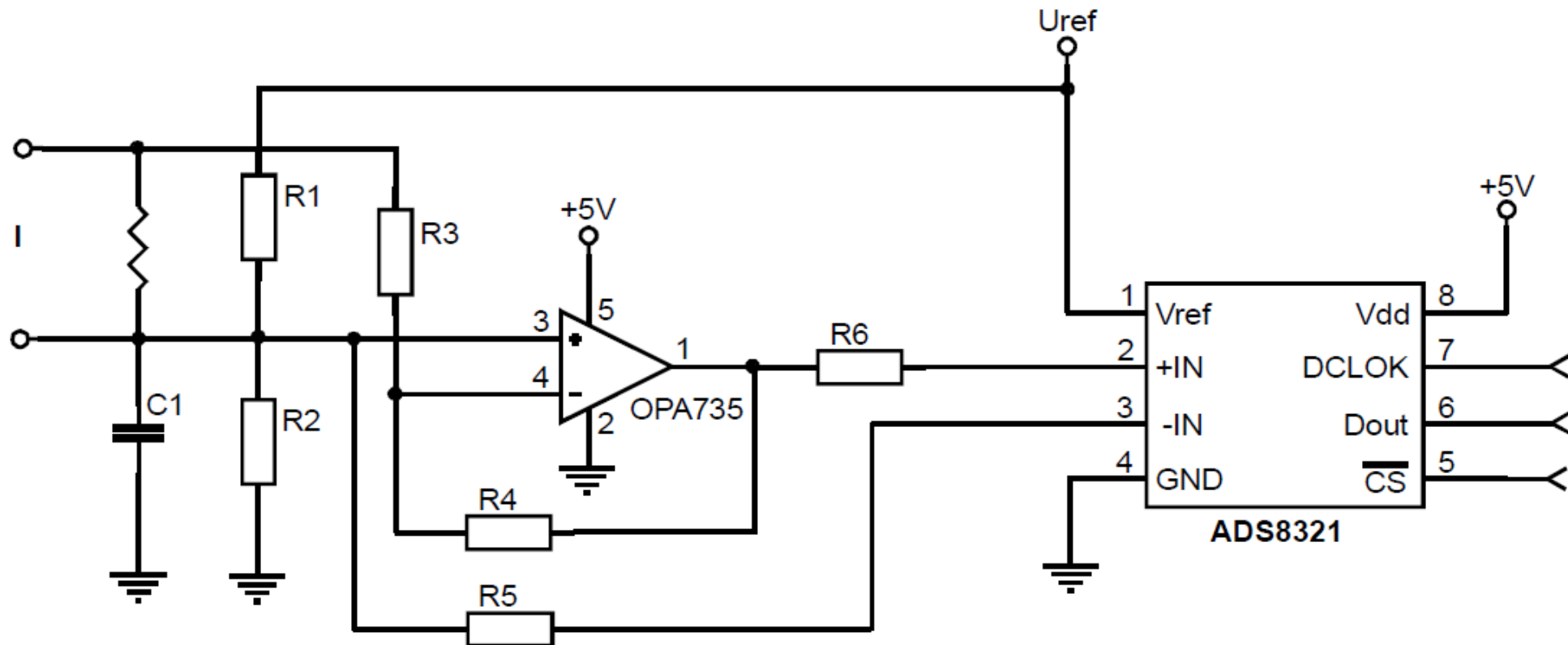


Схема на входна верига на преобразувател на ток

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Тази схема ще има по-малък брой елементи, ще се избягва токовия трансформатор, който е обемист елемент и фазовото отместване, което той внася. Недостатък на тези схеми е големият брой захранващи напрежения – за всеки елемент по един захранващ източник, които трябва да са галванично развързани.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

След дискретизиране сигналите се подлагат на цифрова обработка, за да се получат ефективните стойности и фазовите ъгли на измерваните токове и напрежения. За повишаване на точността при измерването на ефективните стойности трябва да се отчитат всички хармонични съставки, обикновено до деветата включително. За измерването на фазовите ъгли най-често се използва дискретна трансформация на Фурие (DFT), която се прилага върху дискретните стойности, получени при преобразуването на величините от аналогово-цифровия преобразувател.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

Този метод осигурява точно измерване на фазовите ъгли на първите хармонични на токовете и напреженията, като напълно се елиминира грешката от висшите хармоници. За прилагането на този метод е необходимо точно да се определи честотата на входните сигнали, т.е. честотата на мрежата. При енергийните измервания това се осъществява с измерване на периода на мрежовото напрежение. За тази цел се използва най-често „детектор на преминаване през нулата“.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

След това всеки период на входните сигнали (напрежения и токове) се дискретизира с честота, която е N пъти по-голяма от мрежовата, а N е броят на отчетите, получени от аналогово-цифровия преобразувател за един период на сигнала. Тогава ефективните стойности на напреженията (U_{RMS}) и токовете (I_{RMS}) се получават по формулите:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i^2}$$

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност

На базата на определените вектори на токовете и напреженията се изчисляват пълната (S), активната (P) и реактивната (Q) мощности и $\cos\varphi$:

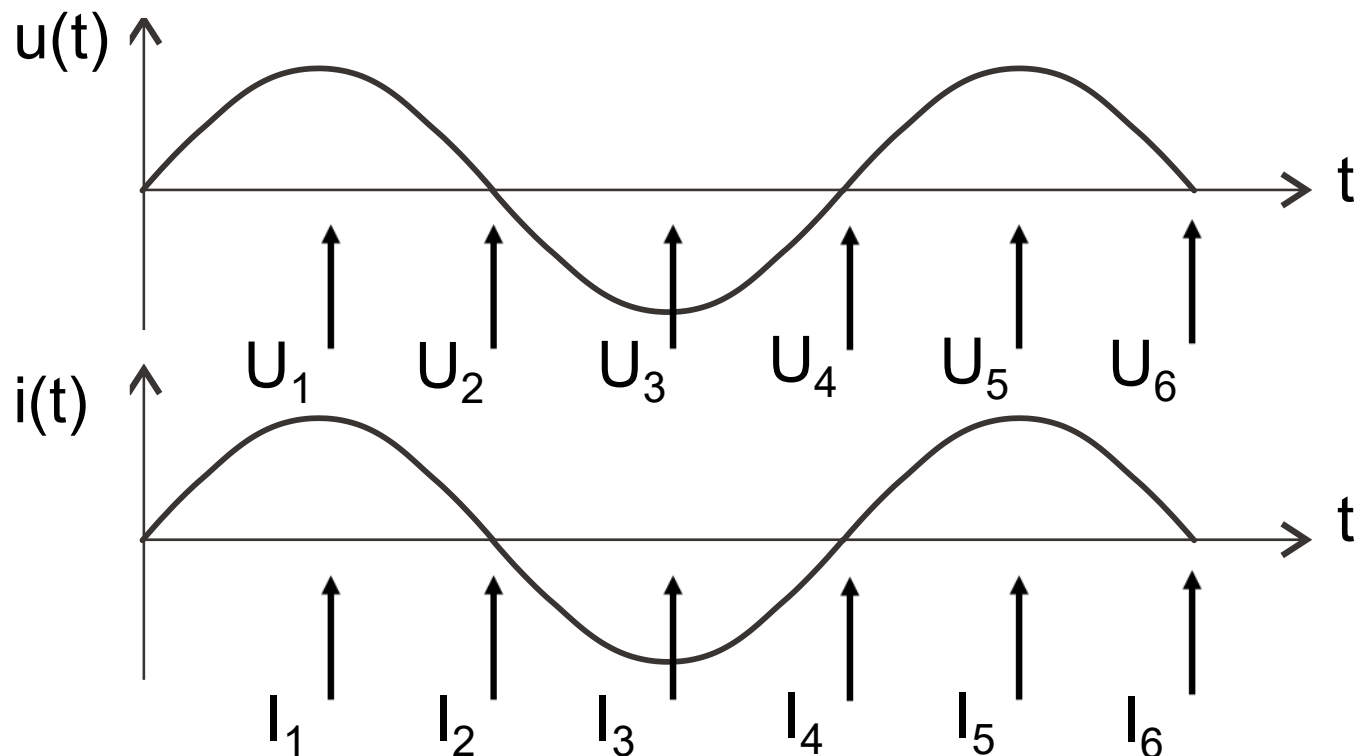
$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \cdot I_i; \quad Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \cdot I_{i-\Delta N}, \text{ където } \Delta N = N/4 \text{ (при дефазиране от } 90^\circ \text{ между напрежението и тока);}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \cos\varphi = \frac{P}{S}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{Q}{P}.$$

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



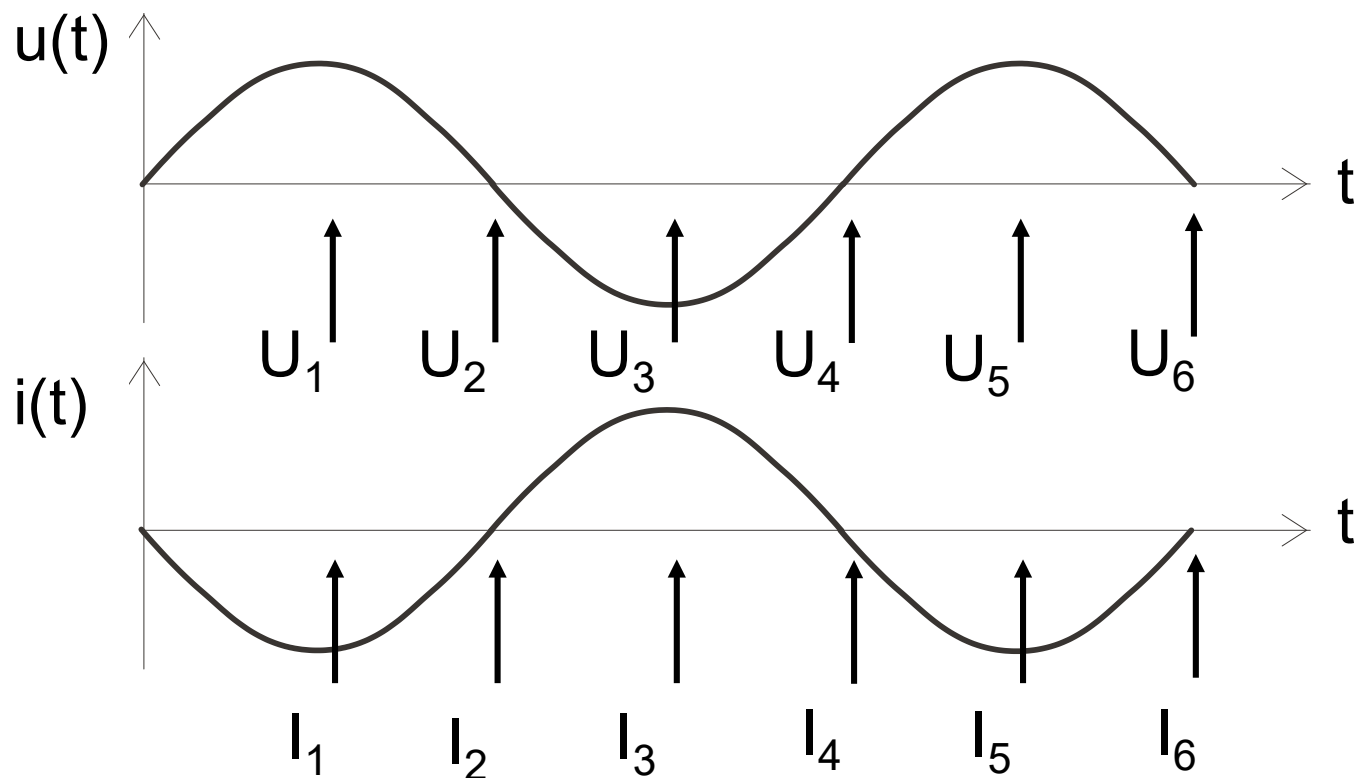
Измерване на
активна мощност

Дефазиране между
тока и напрежението
при консуматор

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



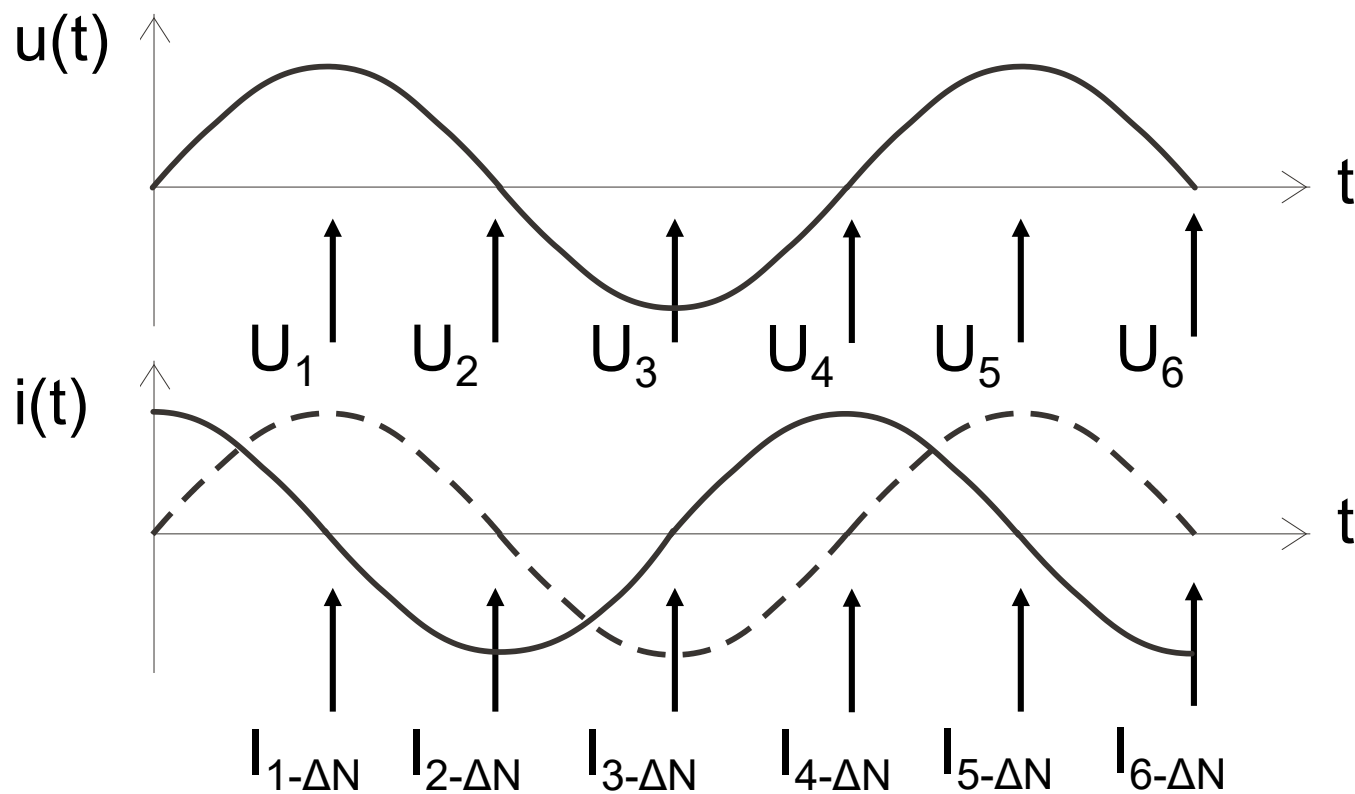
Измерване на
активна мощност

Дефазирание между
тока и напрежението
при генератор

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



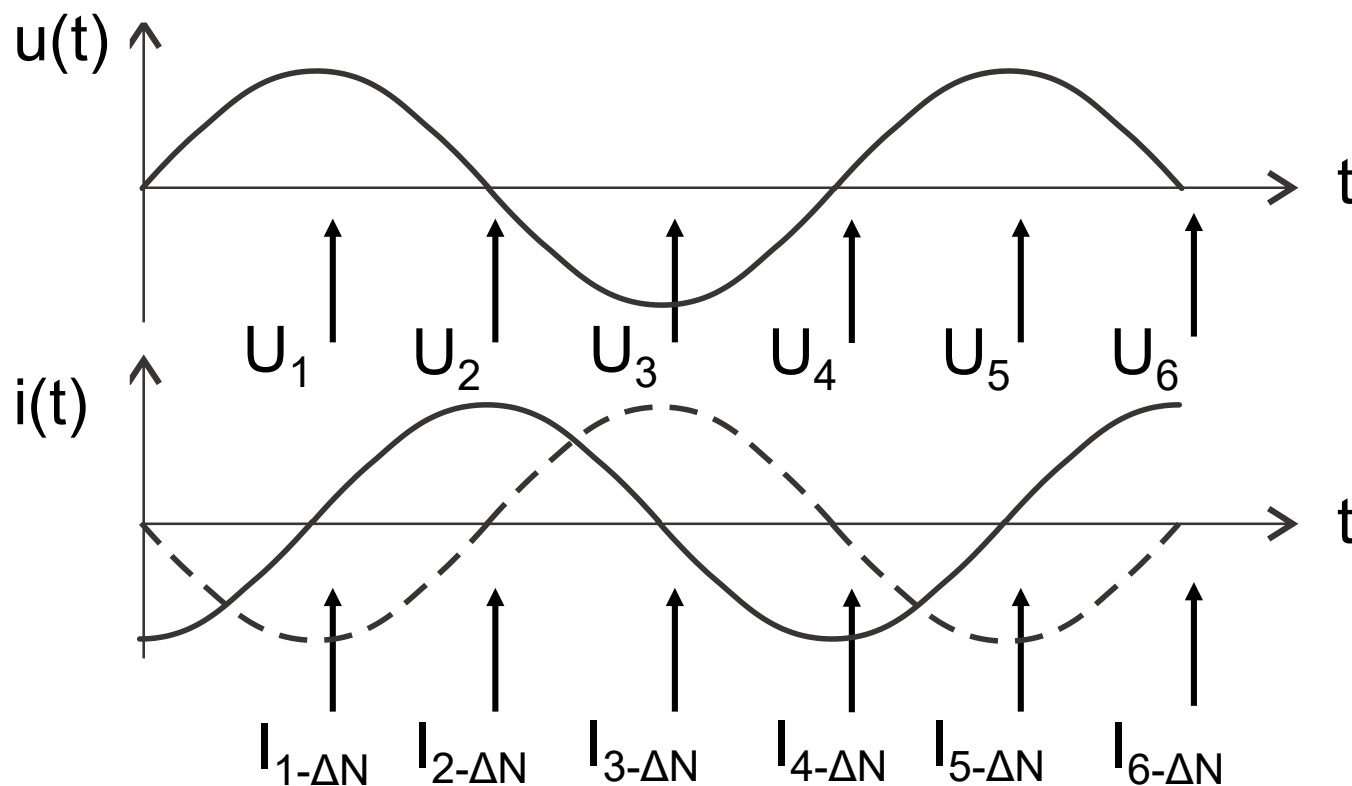
Измерване на
реактивна мощност

Дефазирание между
тока и напрежението
при индуктивен товар

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Преобразуватели на мощност



Измерване на
реактивна мощност

Дефазиране между
тока и напрежението
при капацитивен товар

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Точността при измерване на електрoенергия, на пръв поглед, не е висока – 1-2 % за битови цели и много по-рядко 0,1-0,2 % във възлови подстанции. Но, съгласно стандарта тази точност трябва да се запазва и при претоварване 4, 6 или 8 пъти, а това означава значително увеличаване на исканата точност. Така един електромер за 10А трябва да отчита вярно и при 40А (за съвременното потребление това не е много – 8-10kW) и при 100 mA. Изисква се също съхранение на информацията дълго време без захранване, устойчивост на шокови смущения и др.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Според стандарта за електромери клас 1 (1%) основните изисквания за допустима грешка са:

За активен товар ($\cos\phi=1$):

от $0,05 \cdot I_{осн}$ до $0,10 \cdot I_{осн} < 1,5\%$

от $0,10 \cdot I_{осн}$ до $I_{max} < 1,0\%$

За реактивен товар ($\cos\phi=0,5$):

от $0,1 \cdot I_{осн}$ до $0,2 \cdot I_{осн} < 1,5\%$

от $0,2 \cdot I_{осн}$ до $I_{max} < 1,0\%$

Обикновено $I_{max} = (4-6) \cdot I_{осн}$. Допълнително има изискване за чувствителност - уредът да започне да отчита при $0,4\%$ от основния ток.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

За постигане на изискваната точност при използване на електронен електромер могат да се направят следните изчисления. При $I_{\max} = 6 \text{ A}$ и при 6-7 разряда за постигане на точност 1,5% при ток 0,05 A, като се има предвид, че сигналът е двуполярен, се получават около 16000 нива за АЦП. Ако преобразуването е без превключване на обхватите трябва да се използват 14-15 разряда или за уред с точност 1% е необходим поне 14-разряден АЦП. Освен това има изисквания тези параметри да се запазват в широк температурен обхват.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Електронните електромери работят съгласно дефиницията за активна енергия – сумата (интеграл) от моментните стойности на произведението на тока и напрежението. Колкото е по-висока честотата на дискретизация, с която се отчитат моментните стойности, толкова повече хармонични съставки от по-висок ред ще бъдат включени в крайния резултат. За целта има специално разработени интегрални схеми включващи бързи и многоразрядни АЦП (за тока и напрежението), умножители, филтри и преобразуватели в код или честота.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

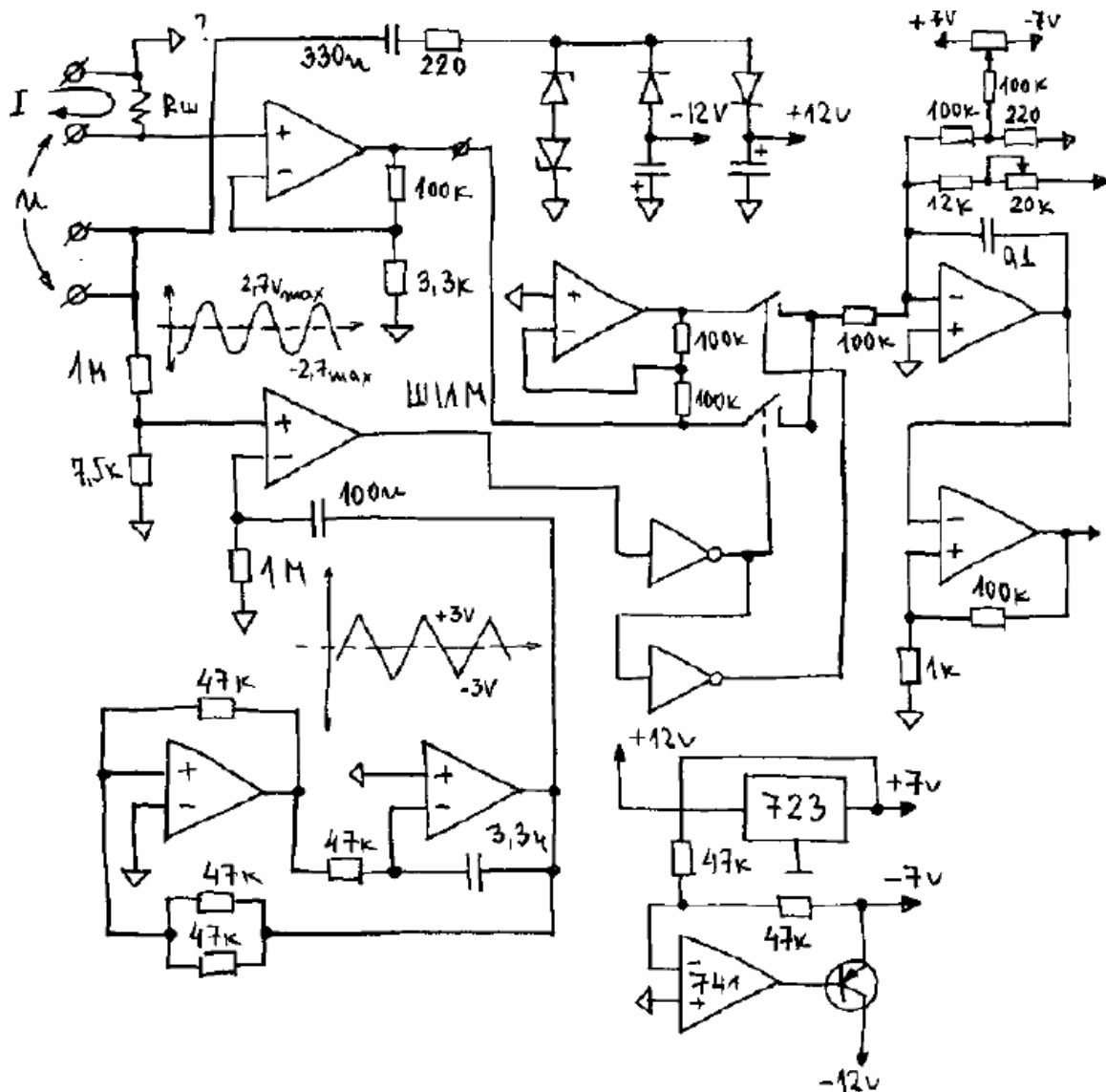
Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Умножението на моментните стойности на U и I може да се извърши и чрез “класически” време-импулсен умножител. Токът от измерваната верига се усилва, инвертира и подава на аналогови ключове. Напрежението се преобразува в импулси с различна продължителност (ШИМ). Когато импулсите са в ниско ниво към интегратора се подава сигналът от токовата верига, а когато са във високо ниво – инверсната му стойност.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели



Измерване на електрическа
енергия

Схема на електромер с
време-импулсен умножител

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Сигналът за тока се получава от шунтово съпротивление. Усилването е около 30 пъти. Аналоговите ключове са от тип CD4066. Генераторът на триъгълно напрежение за основната честота на ШИМ е реализиран с два операционни усилвателя – интегратор и компаратор. За получаване на необходимата точност изходните нива на компаратора трябва да са стабилни.

Амплитудата на генератора (3V) трябва да е по-голяма от максималната амплитуда на входното напрежение след делителя (2,7V).

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Честотата на генерации трябва да е 5-10kHz, като в случая е около 6 kHz (на схемата осцилограмите за 50Hz и 6kHz са при различен мащаб на времето!). Модулацията се получава като на компаратора се подава входното напрежение на електромера и триъгълното (на инвертиращия вход). Триъгълното напрежение се подава през кондензатор за да се отстрани евентуалното постоянно токово отместване предизвикано от не-идеалните операционни усилватели.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Интеграторът, заедно с компаратора в изхода преобразуват енергията в импулси. Когато напрежението в изхода на интегратора достигне прага на задействане на компаратора, той се превключва и през веригата 12к и потенциометъра 20к интеграторът се разрежда до достигане на другото ниво на компаратора. Това е “класическа” схема на преобразувател на напрежение в честота (в случая доста ниска). Импулсите от изхода на компаратора се подават на брояч (делител) от изхода на който се управлява електро-механичен брояч.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

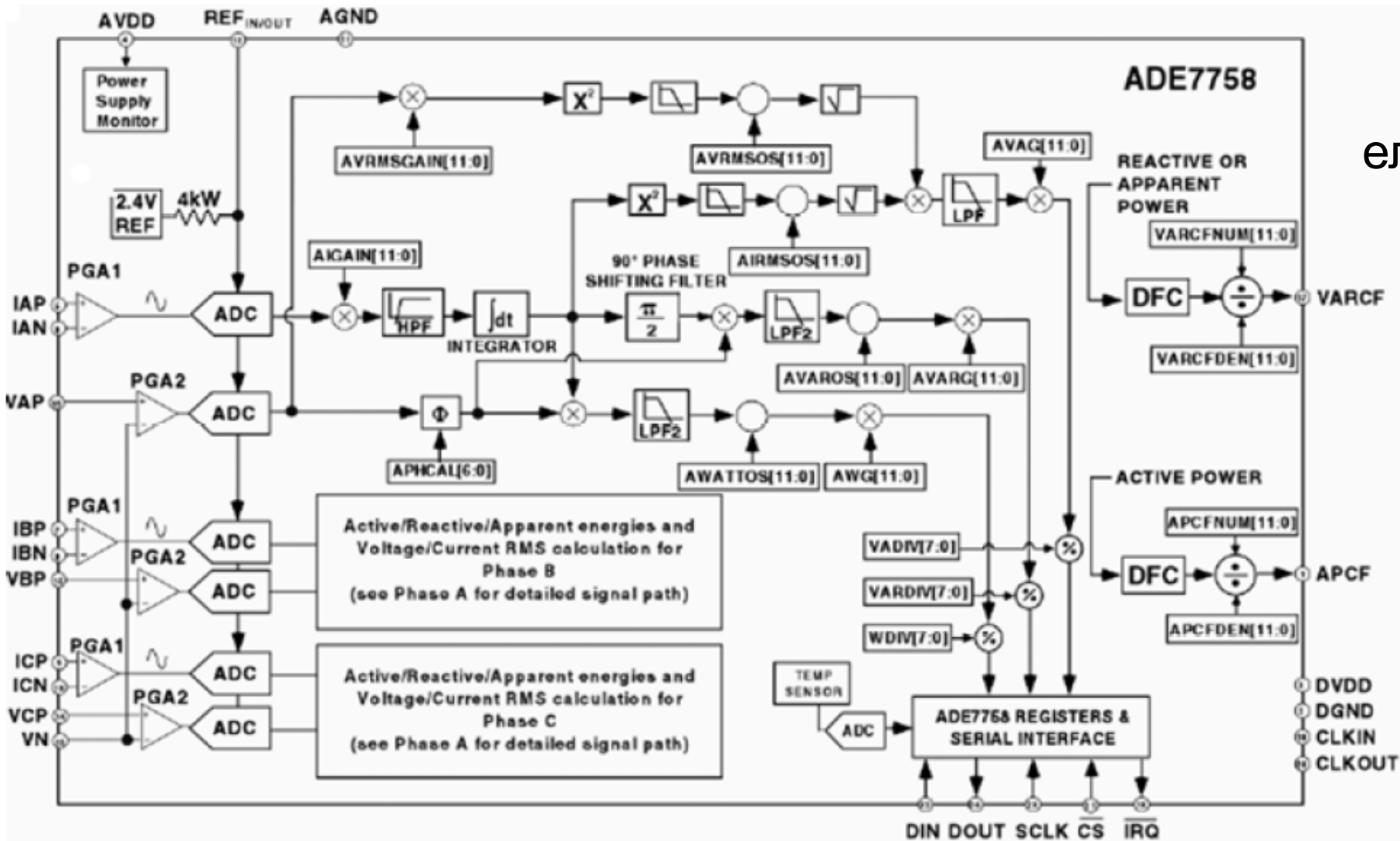
Измерване на електрическа енергия

За цифрово измерване на електрическа енергия могат да се използват схемните решения на преобразувателите на мощност с добавяне на функции за броене, запомняне на информацията при отпадане на захранването и др.

За изграждане на входната част може да се използват и специализирани интегрални схеми, типичен представител на които е преобразувателят на мощност в трифазни мрежи ADE7758 на Analog Devices.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели



Измерване на
електрическа енергия

Функционална
блокова схема на

ADE7758

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Схемотехника на измервателни преобразуватели

Измерване на електрическа енергия

Предимството на този подход е, че в изхода на интегралната схема се получават цифрови данни, които се подават по сериен интерфейс SPI за допълнителна обработка към микроконтролер с по-ограничени изчислителни възможности. Достъпни са ефективните стойности на напреженията и токовете във всяка фаза, активната, реактивната и пълната енергии, както и честотата. Недостатъкът е, че всички изчисления са ограничени от точността, заложена в конкретната интегрална схема и използвания алгоритъм за изчисление.