

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Моделирането на процеси и устройства от електроенергийната система има важно значение за научните изследвания, развойната дейност, производството и изпитанията на защитни и управляващи устройства. За цялостна проверка на действието на тези устройства е необходимо да се симулират преходни и стационарни режими от работата на електроенергийната система.

За тази цел е необходимо синтезиране на сигнали, моделиращи стационарен и преходни режими на работа на електроенергийната система, и устройства за тяхното генериране.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Области на приложение на симулирането

- научни изследвания и развойна дейност в областта на електроенергетиката;
- изпитания в различните етапи на производството и окачествяване на продукцията от измервателна, управляваща и защитна апаратура за нуждите на електроенергийната система;
- вторични изпитания на тази апаратура по време на експлоатацията;
- обучение на операторите при пълна безопасност в максимално близки до реалните работни условия.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Етапи в развитието на симулирането в електроенергетиката

- използване на мащабно намалени реални елементи от електроенергийната система;
- разработване на аналогови модели на елементи от електроенергийната система;
- съставяне на аналогови модели, управлявани от компютър;
- въвеждане на цифрови модели.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

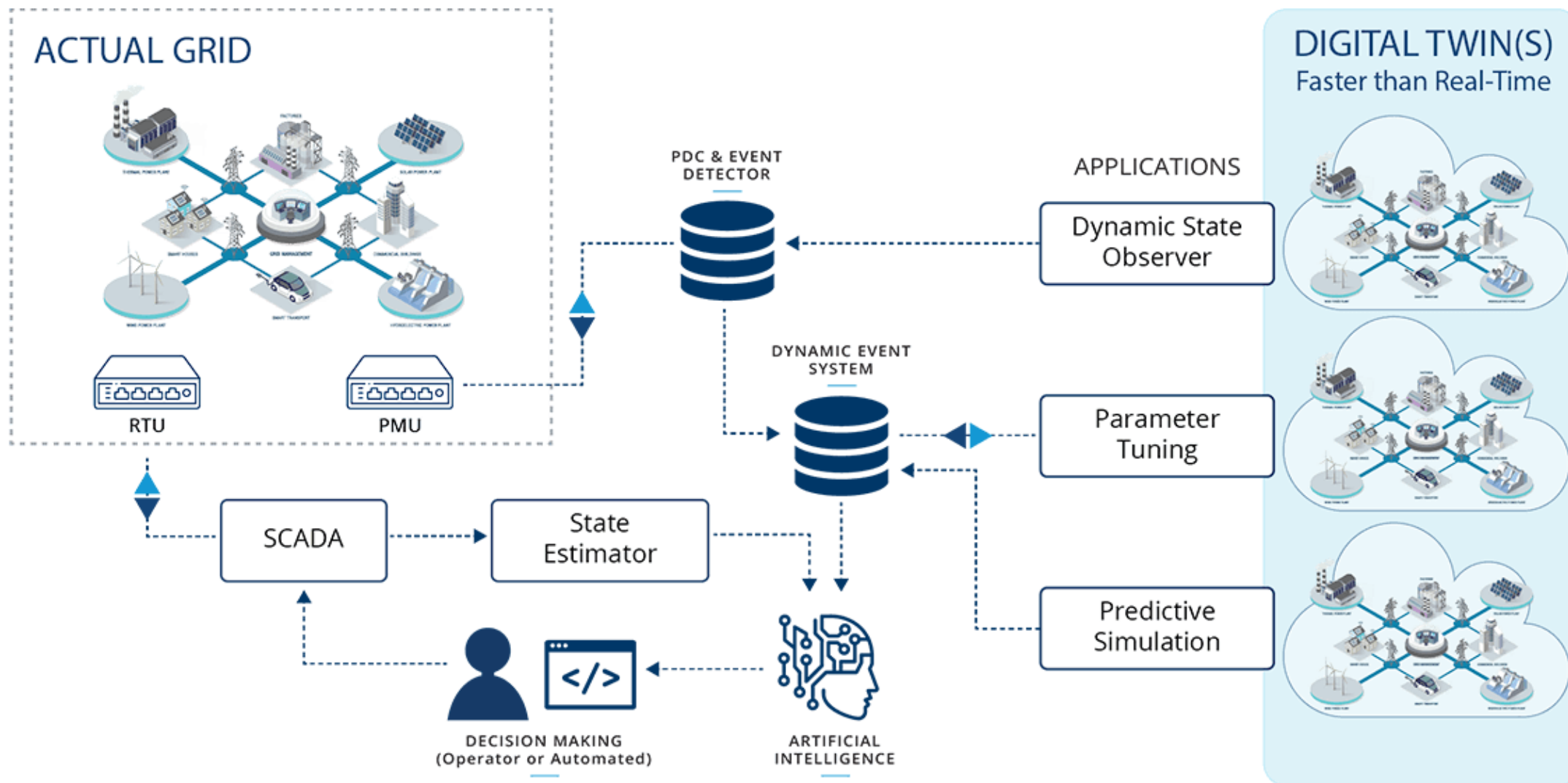
Digital Twins (цифрови близнаци, цифрови двойници)

Цифровите близнаци са виртуални образи на физически активи и процеси, използвани за разбиране, прогнозиране и оптимизиране на тяхната работа. Тази нова технология за симулация ще подпомага по нови начини сервизната дейност, изследователските лаборатории и производителите, осигурявайки дейностите по планиране и експлоатация с нов поглед и като цяло ще доведе до значително увеличен капацитет на продукцията.

Те помагат да се намали времето за пускане на пазара и риска от свързване на нови инверторни електроцентрали в енергийните системи.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Digital Twin Architecture



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Digital Twins (цифрови близнаци, цифрови двойници)

Тази архитектура показва как един цифров близнак на енергийната система може да взаимодейства със своя физически аналог чрез усъвършенствани анализи, динамично и стабилно управление на данни, автоматизация и системни оператори. Това е ключова технология, която ще помогне за гарантиране сигурната и надеждна работа на бъдещите енергийни системи през целия им жизнен цикъл, тъй като сега се увеличава навлизането на възобновяема енергия с малко закъснение при включване.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Digital Twins (цифрови близнаци, цифрови двойници)

Технологията за симулация в реално време определено е ключов фактор за много приложения, включително ускоряването на прогнозните симулации, а цифровият близнак може да съществува като модел от модели със следните свойства:

- сам по себе си е виртуален и представлява мост на свързаност с „реалния свят“;
- той е самоадаптивен, може да действа като задълбочен наблюдател;
- като подпомагащ решенията инструмент той е изключително мощен за прогнозиране и допълнително за проектиране и планиране.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Digital Twins (цифрови близнаци, цифрови двойници)

Потенциалът на използването на Digital Twins е неоспорим. Той позволява да се (моделира) репликира една система с цел предвиждане на бъдещото ѝ функциониране. В контекста на електрическата мрежа, това може да означава избягване на тежки прекъсвания, подобряване на оперативната ефективност и оптимално управление на активите. Тъй като енергийните мрежи стават все по-децентрализирани, работещи близо до оперативните си граници, стойността на тези знания става още по-значителна.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Устройства за симулации в електроенергетиката

- аналогови симулатори на електроенергийната система;
- анализатори на преходни процеси в електроенергийната система;
- системни симулатори за изпитания на релейни защиты.

Най-общо това са специализирани трифазни и еднофазни напрежителни и токови генератори, известни под наименованието товарни устройства.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

Режимите в работата на електроенергийната система са стационарни и аварийни. При симулиране на стационарни режими към изпитваните устройства (най-често релейни защиты) се подават сигнали с параметри (амплитуда, фазов ъгъл, честота), отговарящи на нормалната работа на съоръженията (генератори, далекопроводи, турбини, трансформатори). Когато се симулират аварийни режими параметрите на изпитвателните сигнали трябва да са в областта на задействане на релейната защита.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

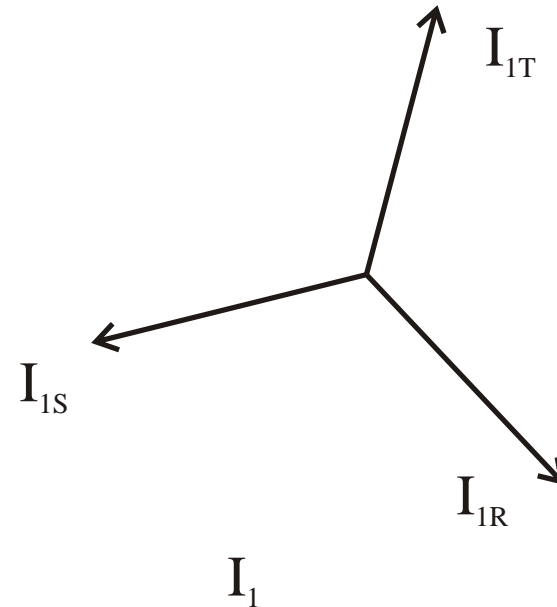
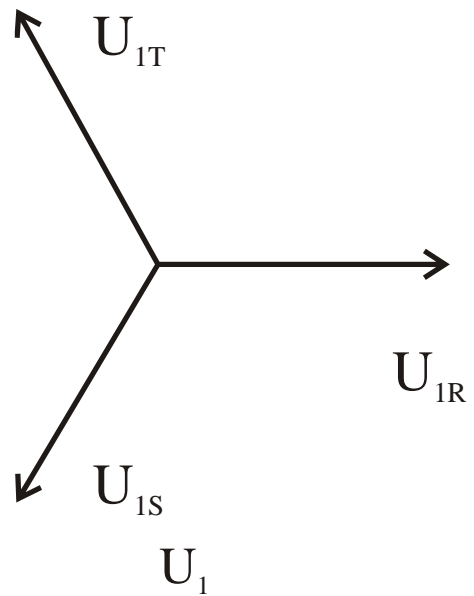
Входните сигнали за релейните защиты са токове и напрежения, които са и входни величини за някои от тях. Входните величини импеданс, мощност, междуфазно (линейно) напрежение и междуфазен ток се моделират чрез задаване на фазните напрежения и токове.

За изпитания на релейни защиты трябва да се генерира трифазна система от напрежения и токове с амплитуди и фазови ъгли, отговарящи на номиналните стойности на входните величини за проверяваната защита.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

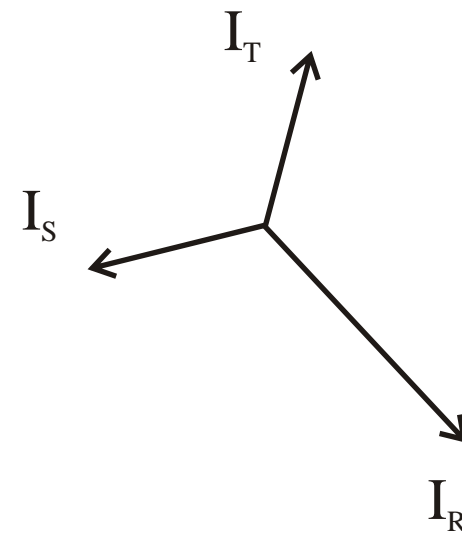
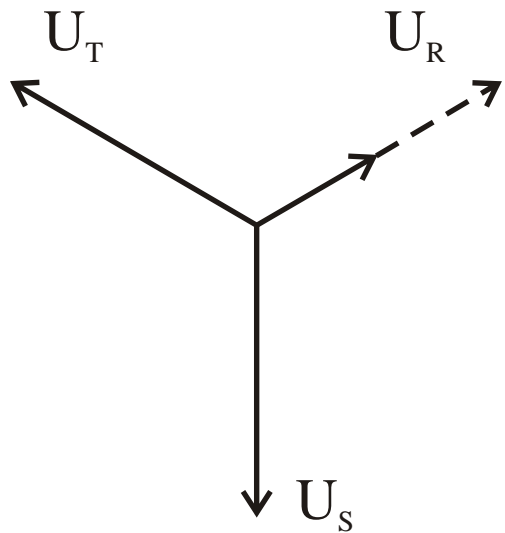
Векторни диаграми на напреженията и токовете при стационарен режим



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Векторни диаграми на напреженията и токовете при къси съединения

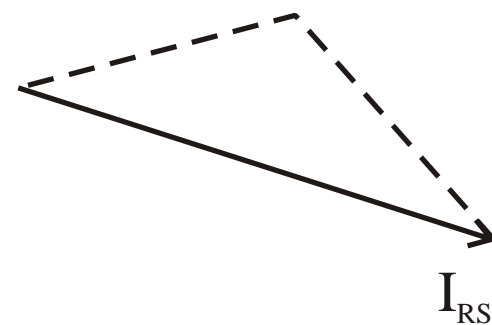
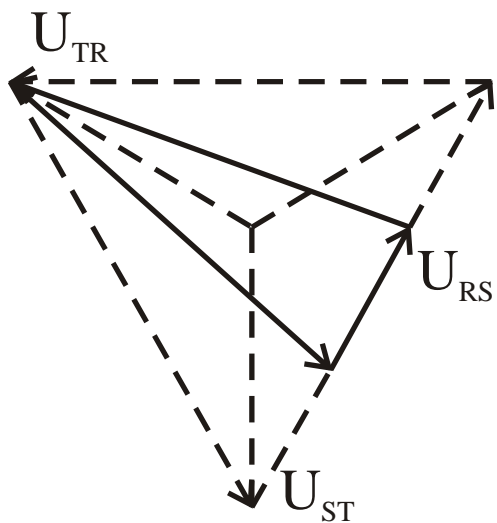


Еднофазно късо съединение R-N

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Векторни диаграми на напреженията и токовете при къси съединения

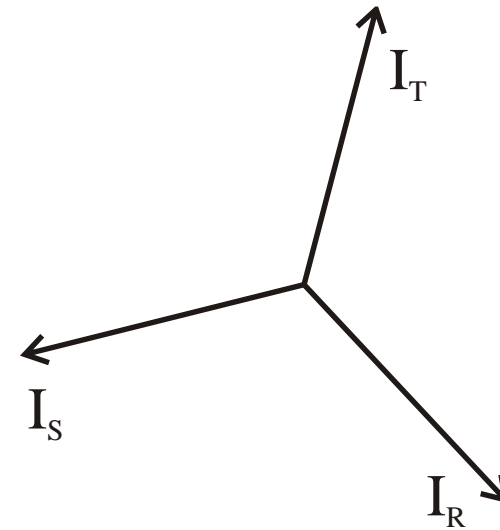
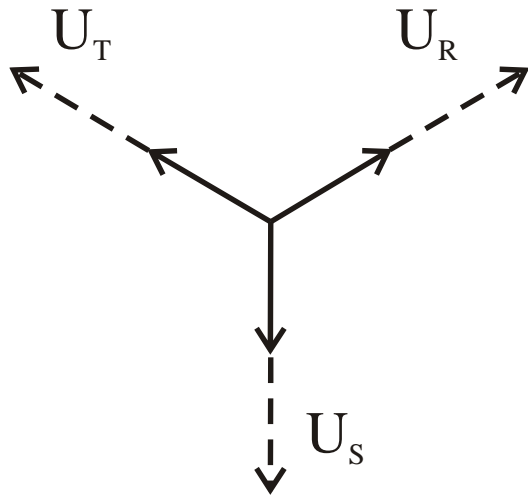


Междупазно късо съединение R-S

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Векторни диаграми на напреженията и токовете при къси съединения



Трифазно късо съединение R-S-T

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

Изпитанията на релейните защиты могат да се извършват в статичен и динамичен режим.

При статичните изпитания стойностите на входните величини за релейната защита не се променят до изтичането на зададената продължителност на изпитанието или до изключването на защитата.

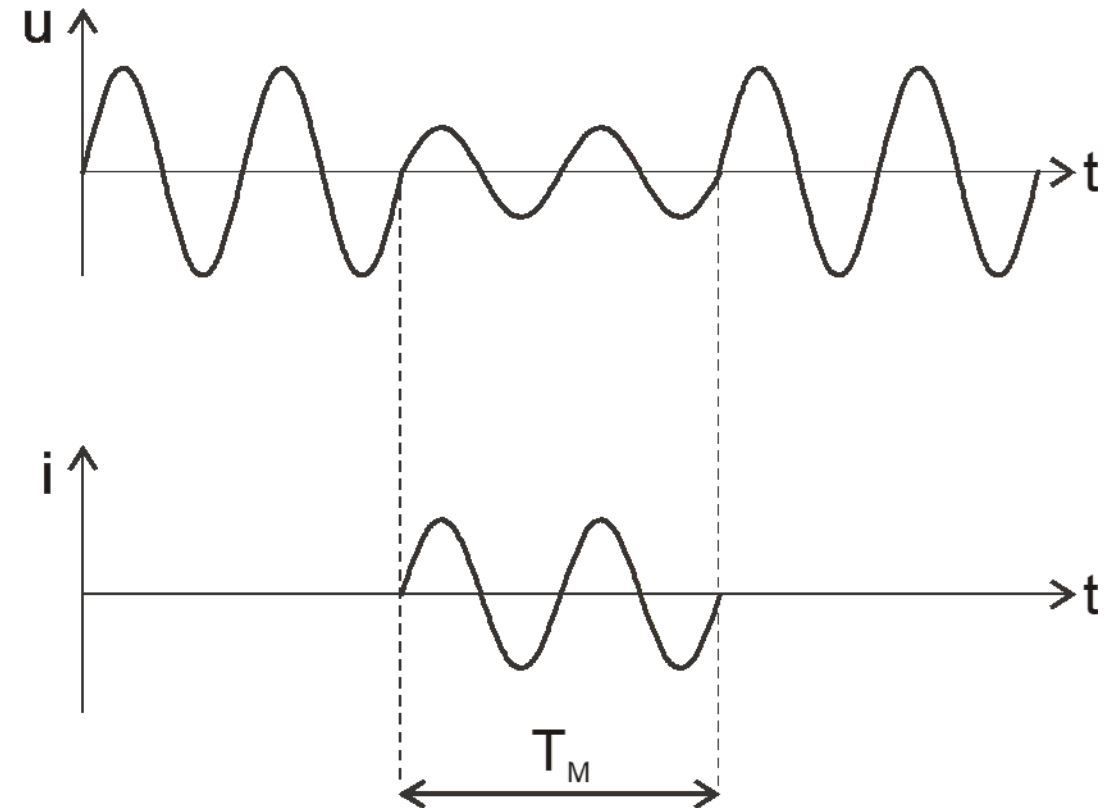
Динамични изпитания се прилагат в автоматичен режим на работа. При тях параметрите на сигналите се променят по предварително зададена зависимост.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

Изменение на тока и напрежението при изпитание на дистанционна защита, когато е зададено изменение на стойността на импеданса на преносната линия, симулиращо преходи от състояние на изправност към състояние на повреда и обратно.

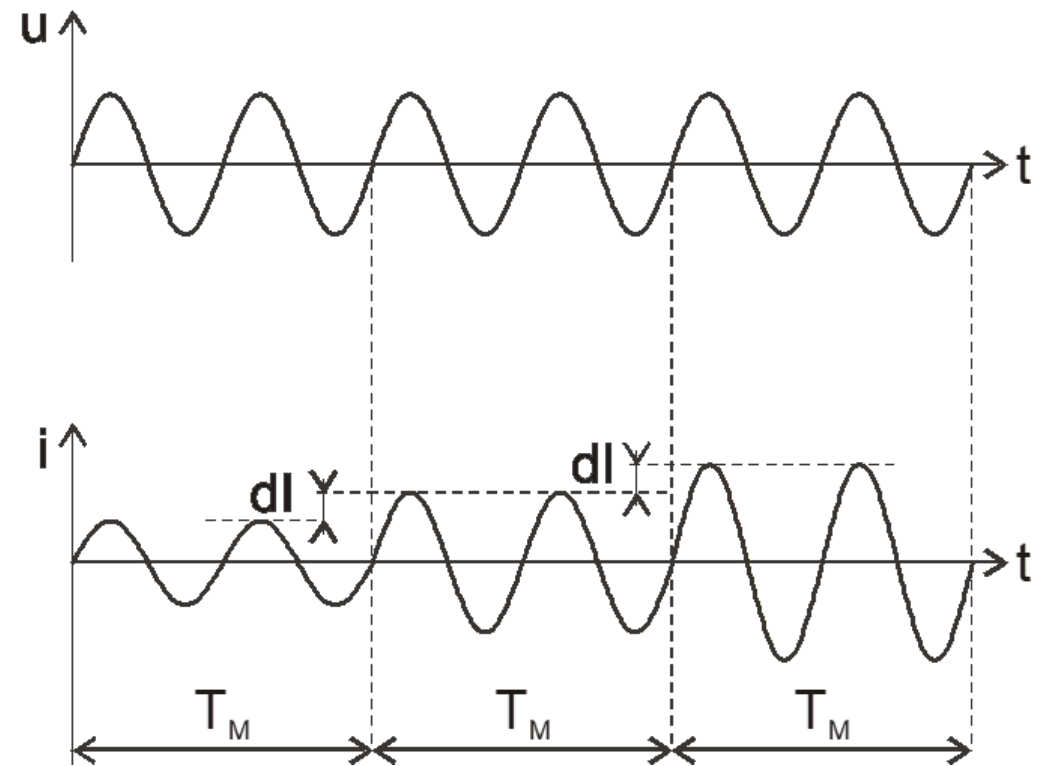


Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

Напрежителен и токов сигнали, които се използват за симулация на стъпково изменение на импеданса на преносна линия при изпитания на дистанционни защиты в автоматичен режим.



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

Преходните процеси в електроенергийната система са чести явления.

Те възникват при включване или изключване на генератори и товари. При тях се появяват токове и напрежения с несинусоидална форма и честота, различна от системната. Големината на колебанията зависи от степента на смущението и от устойчивостта на системата.

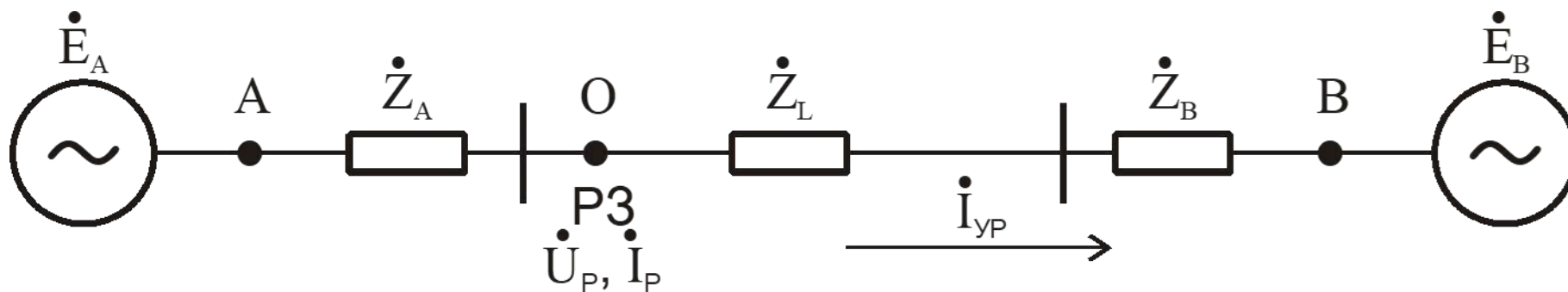
Люлеенето и асинхронният ход в електроенергийните системи са следствие на системни смущения - рязка промяна на товара или изключване на късо съединение с недопустимо забавяне.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

За представяне на процесите при люлеене се разглежда опростен модел на електроенергийната система, в който двата еквивалентни генератора са свързани помежду си с електрическа връзка с импеданс Z_L .

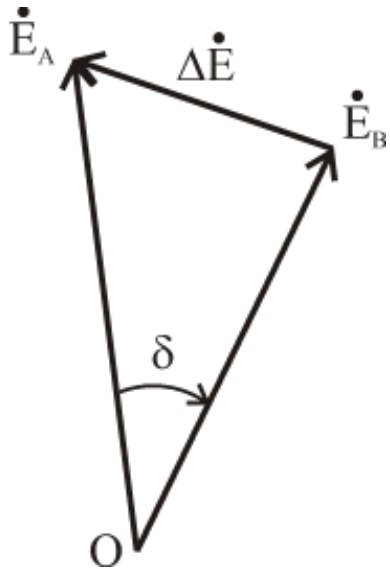


Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

За този модел на електроенергийната система, който е представен с векторната диаграма са валидни равенствата:



$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$$

$$\dot{Z}_\Sigma = \dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_L$$

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

За люлеенето в електроенергийната система са характерни три случая:

1) Асинхронен ход

$\omega_A = const.$; $\omega_B = const.$ - честотите на двата генератора са постоянни

$\omega_S = \omega_A - \omega_B = 2\pi f_s$ (f_s - честота на хлъзгане, за България - 0,2 ÷ 2Hz)

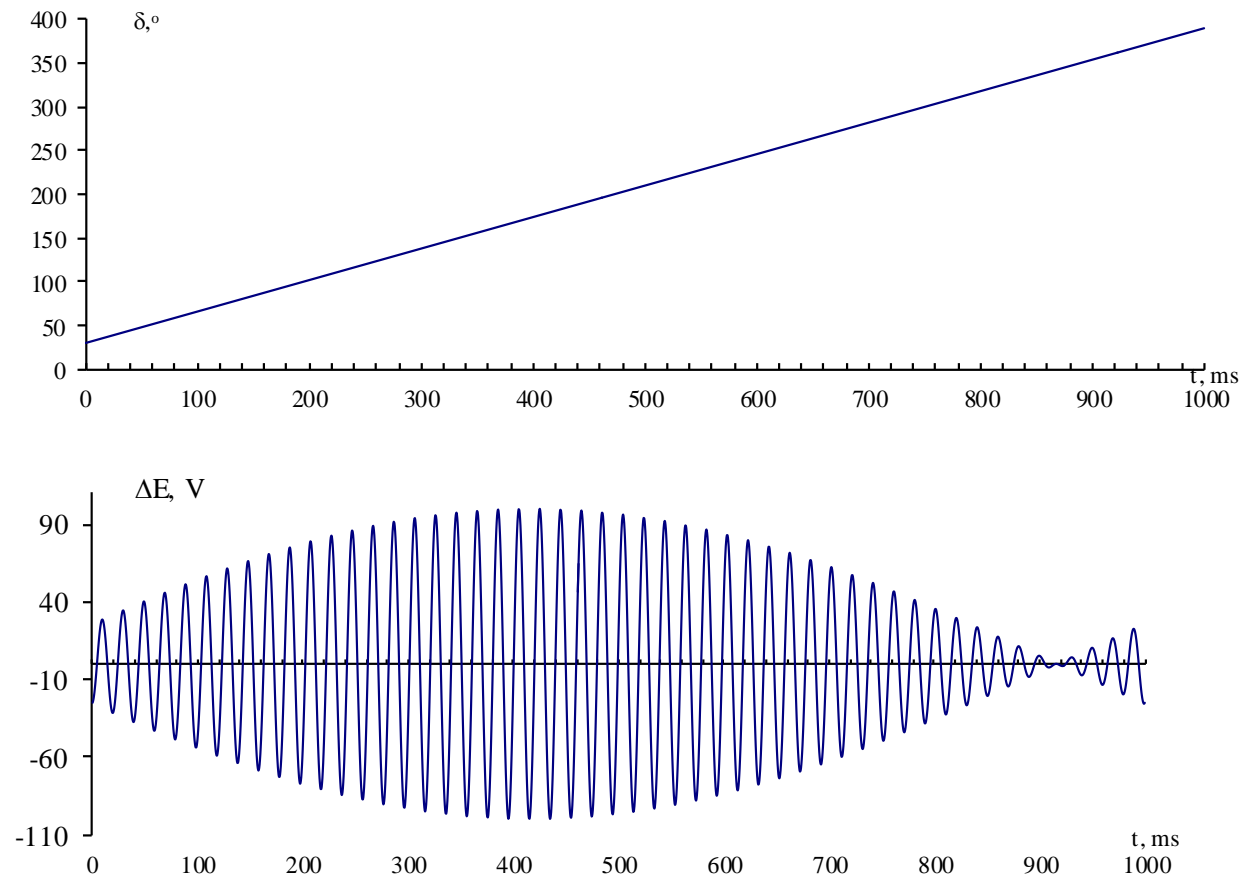
В този случай фазата на втория еквивалентен генератор от математическия модел се променя линейно във времето и той се намира в асинхронен ход.

$$E_B(t) = E_{Bmax} \cdot \sin(\delta_B) = E_{Bmax} \cdot \sin(\delta_0 + 2\pi f_s t)$$

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

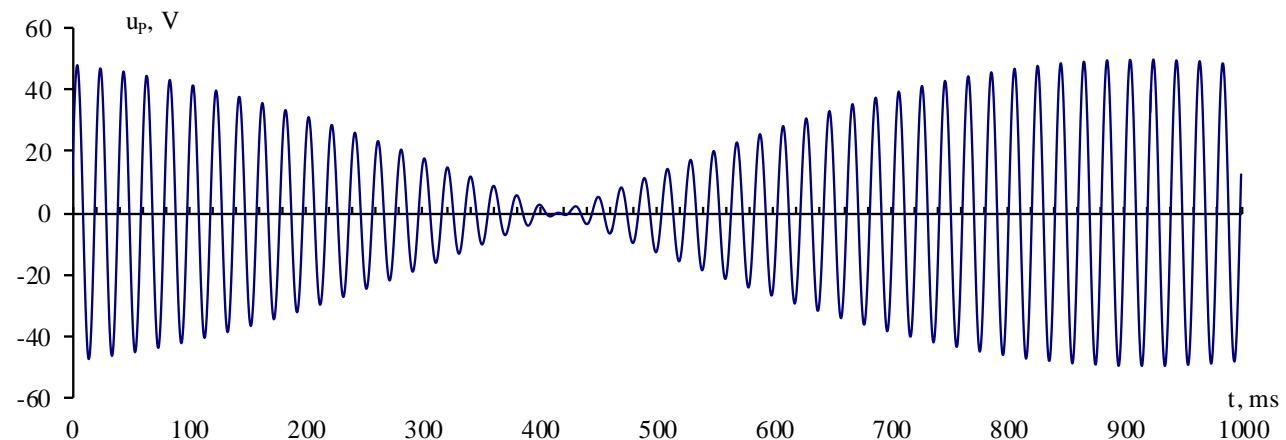
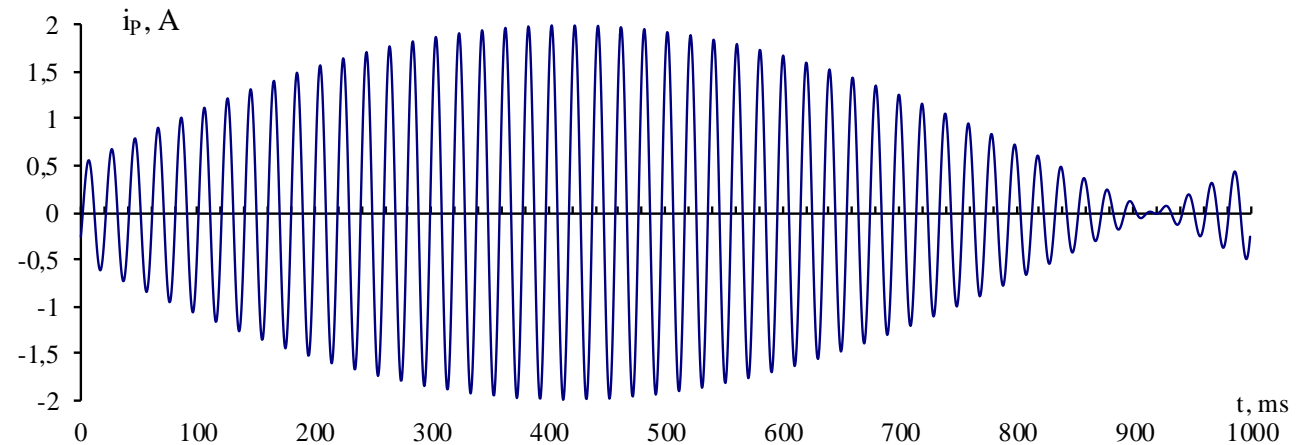
Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

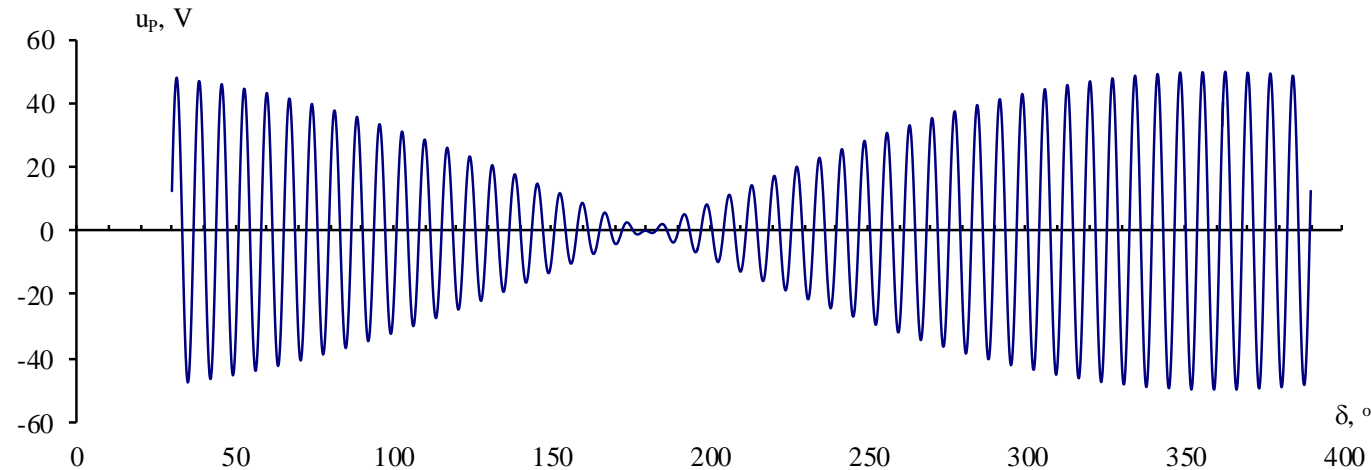
Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Установява се, че при асинхронен ход в електроенергийната система по електропроводите протичат уравнителни токове с максимална стойност при ъгли, близки до 180° . Тя е съизмерима с токовете на късо съединение, а напрежението става равно на нула.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

2) Преминаване от люлеене в синхронен режим по линеен закон

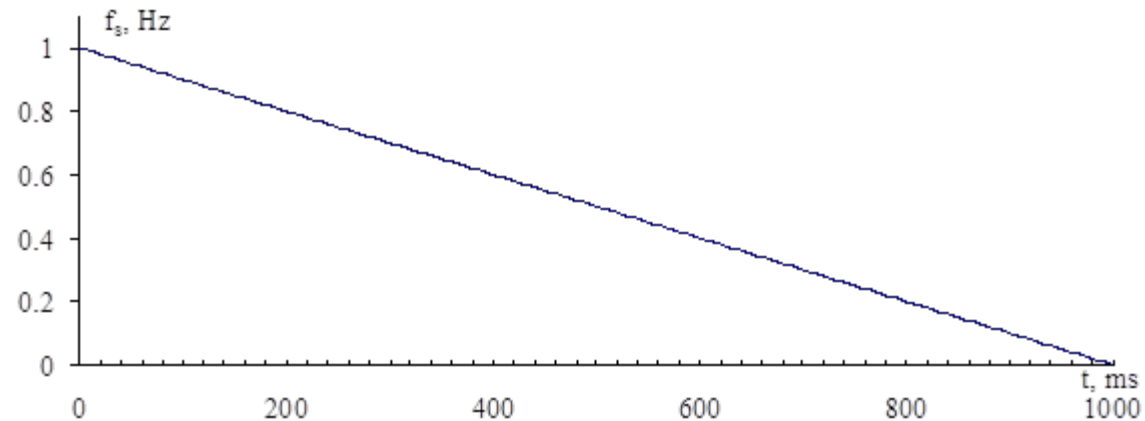
$\omega_A = \text{const.}$; ω_S се изменя от една начална стойност до нула, т.е. режимът на люлеене минава в синхронен след краен брой периоди.

Симулацията на процесите в модела са извършени при промяна на честотата на хлъзгане в диапазона от 1Hz до нула за временния интервал от 0 до 1s със скорост 1Hz/s.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

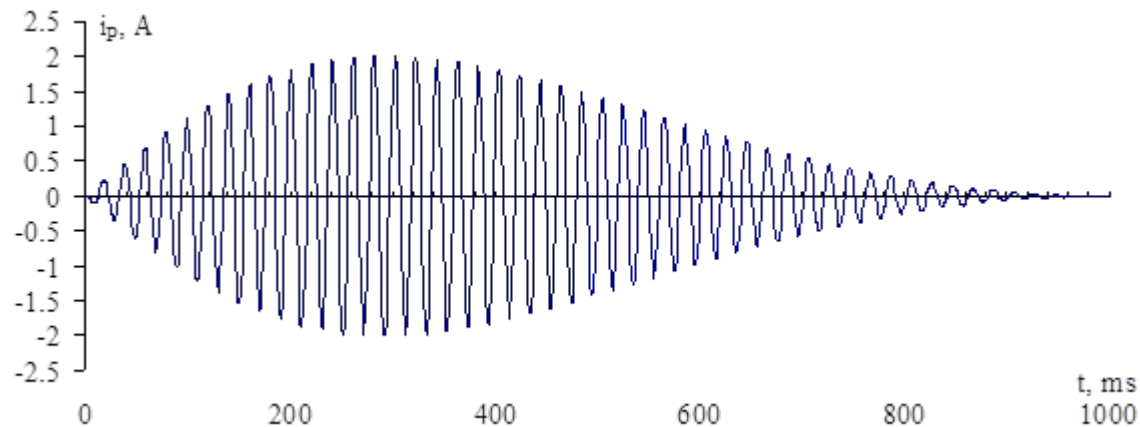
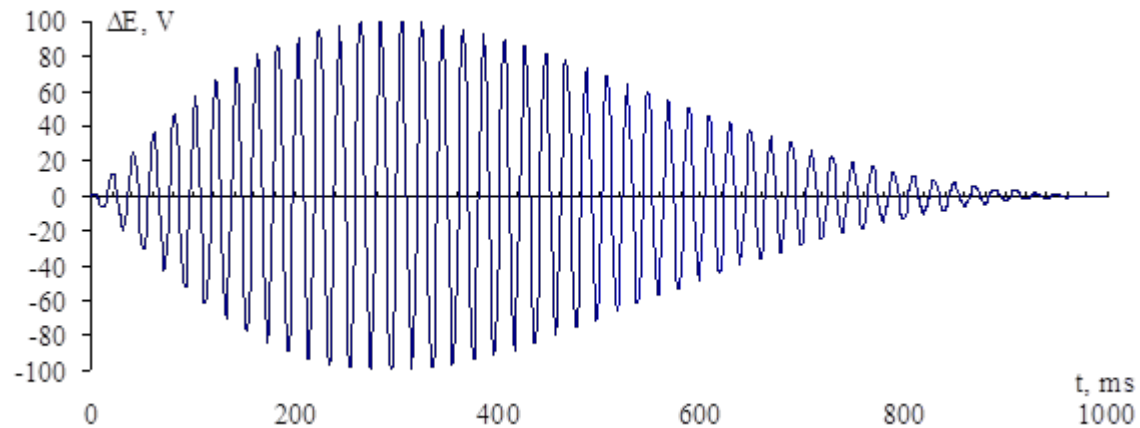


В този случай фазата на втория еквивалентен генератор от математическия модел се променя линейно във времето и в края на разглеждания временен интервал става равна на нула, колкото е фазата и на първия.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

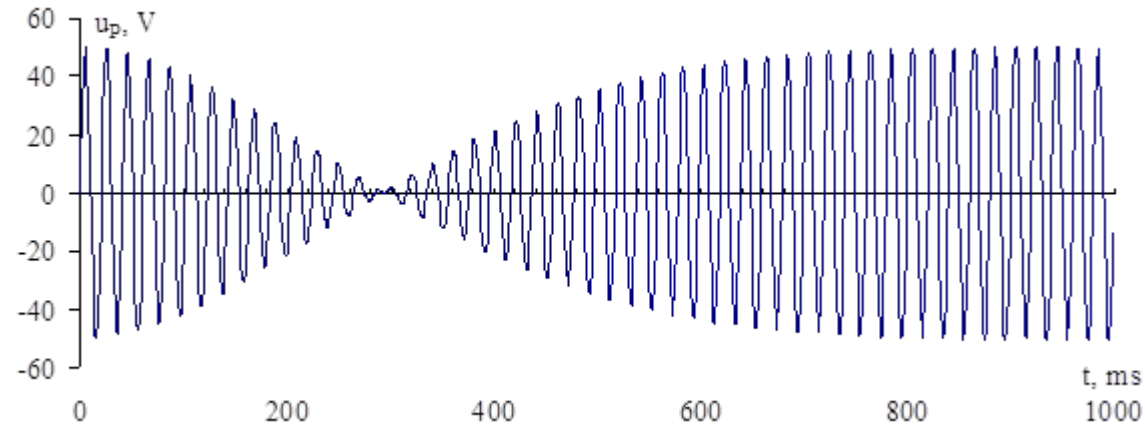
Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



За определена стойност на честотата на хлъзгане напрежението, следователно и импедансът стават равни на нула, а токът има максимум, който може да надвиши стойността му при късо съединение.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

3) Синхронно люлеене

Приема се, че фазата на първия еквивалентен генератор от математическия модел е нула и не се изменя във времето, а фазата на втория ще се променя по синусоидален закон:

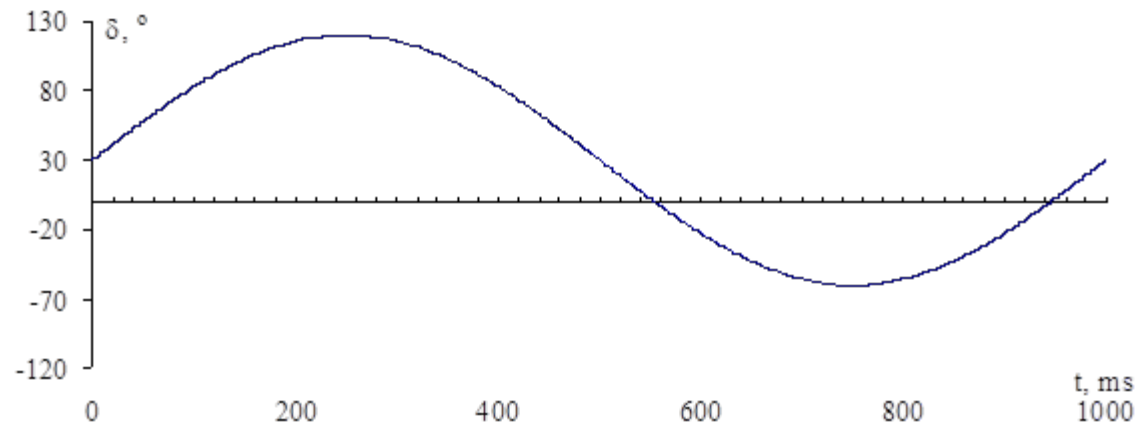
$$E_B(t) = E_{Bmax} \cdot \sin(\delta_B) = E_{Bmax} \cdot \sin[\delta_0 + \delta_{max} \cdot \sin(2\pi f_s t)]$$

В този случай фазата на втория генератор се променя от начална стойност δ_0 до стойност $(\delta_0 + \delta_{max})$ и след това се връща до първоначалната δ_0 без да се стига до дефазиране 180° .

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

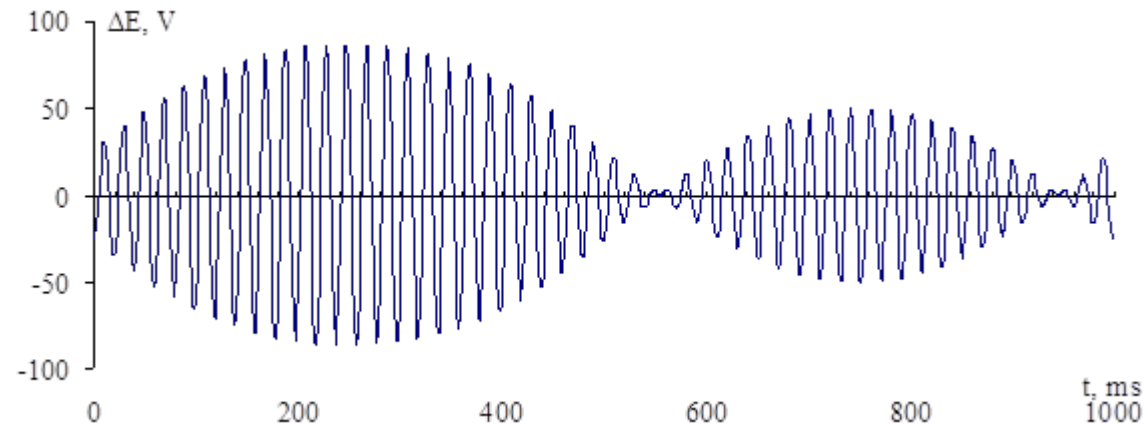


При този режим фазата на електродвижещото напрежение на втория еквивалентен генератор от математическия модел се променя около стойността на фазата на първия, като я изпреварва и изостава от нея в рамките на един период.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система

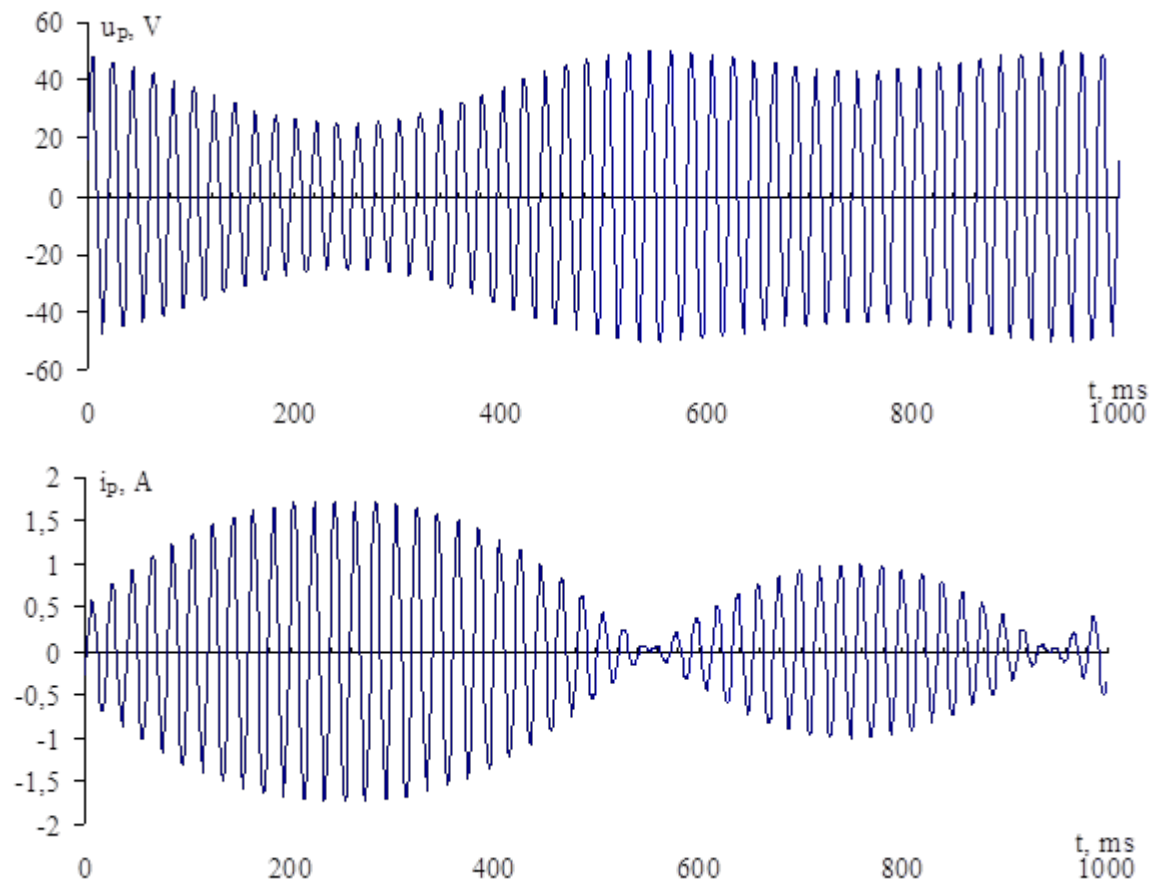


При синхронно люлеене няма случай, когато обвивната крива на напрежението $u_p(t)$ да минава през нула, докато обвивната крива на тока $i_p(t)$ минава. Следователно максималната стойност на тока няма да достигне стойностите му при късо съединение.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

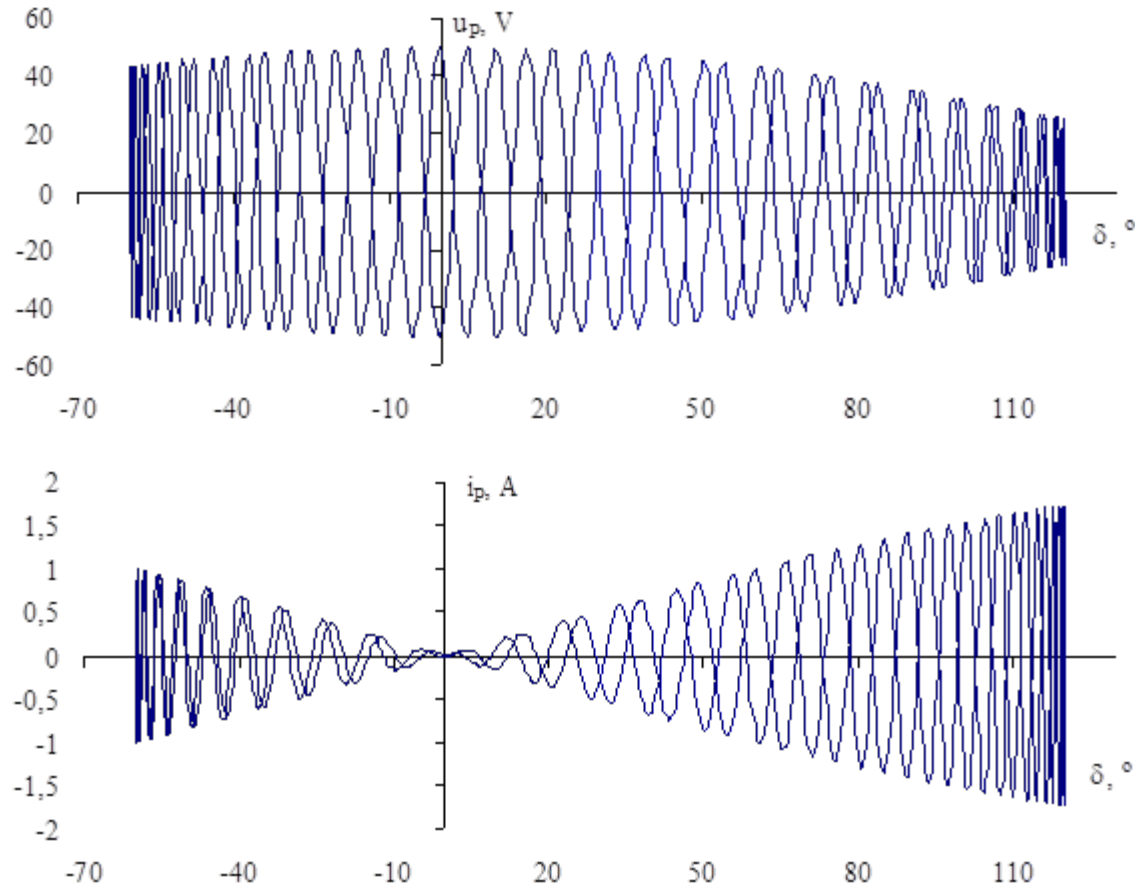
Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

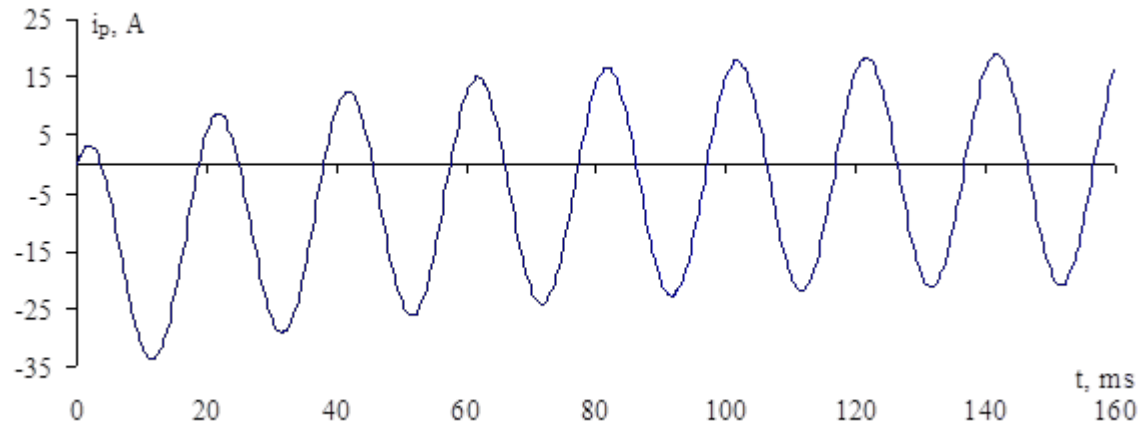
Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



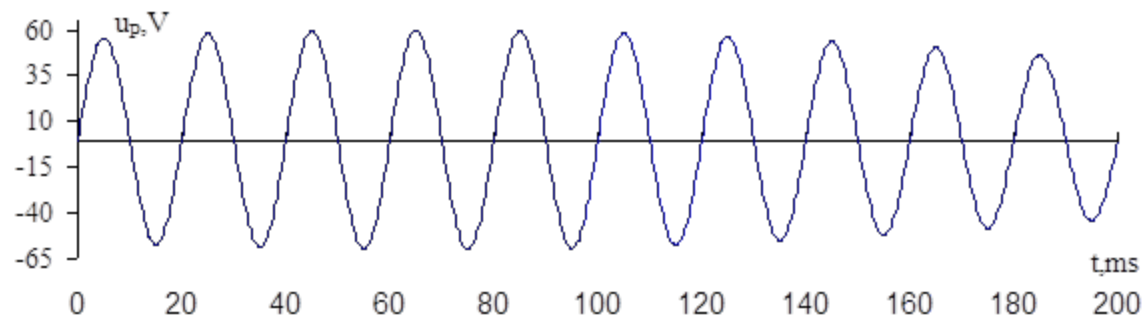
При включване на товари към източниците на напрежение и ток протичат преходни процеси с апериодичен характер. Получава се ток с апериодична съставка, който може да се опише с израза:

$$i_p(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) - I_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \varphi_i$$

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Изменение на напрежението $u_p(t)$, измервано от релейната защита

при люлеене на амплитудата му по закона:

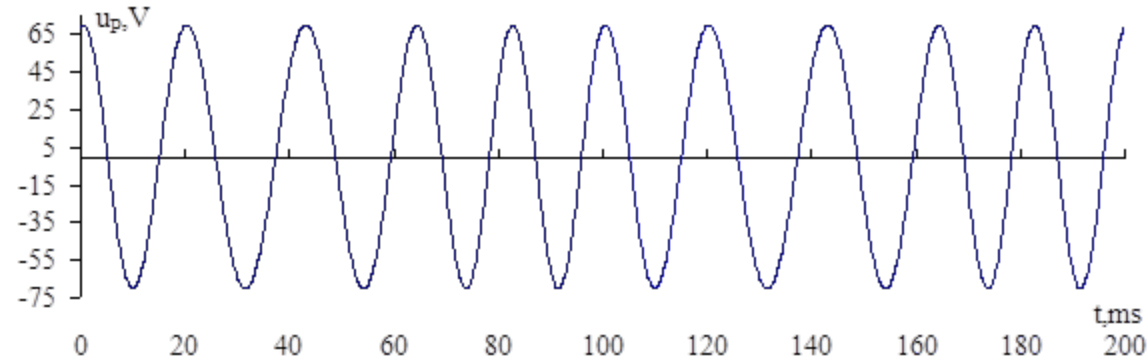
$$U(t) = (U_{max} + U_{min})/2 + (U_{max} - U_{min}) \sin\{2\pi F_m t + \arcsin[2U_H / (U_{max} - U_{min})]\} / 2$$

Честотата F_m е със стойността на честотата на хлъзгане.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Симулиране на режими от работата на електроенергийната система



Изменение на напрежението $u_p(t)$, измервано от релейната защита при люлеене на фазата му по закона:

$$\varphi_u(t) = (\varphi_{u_{max}} + \varphi_{u_{min}})/2 + (\varphi_{u_{max}} - \varphi_{u_{min}}) \sin\{2\pi F_m t + \arcsin[2\varphi_{uH}/(\varphi_{u_{max}} - \varphi_{u_{min}})]\}/2$$

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Синтезиране на симулационни сигнали

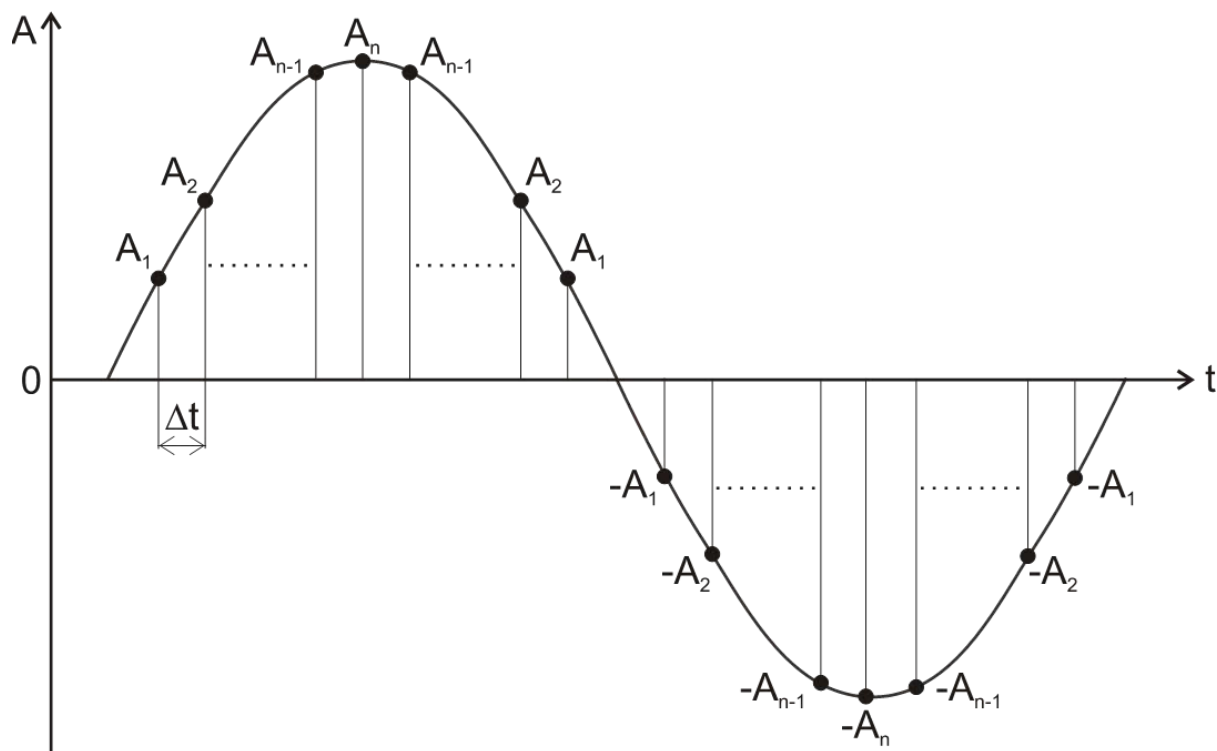
Симулационните сигнали могат да бъдат синтезирани по различни начини:

- чрез описание с аналитични математически изрази;
- със специализирани програмни продукти за анализ на преходни процеси;
- записани чрез регистратори на повреди в реални електрически мрежи.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Синтезиране на симулационни сигнали



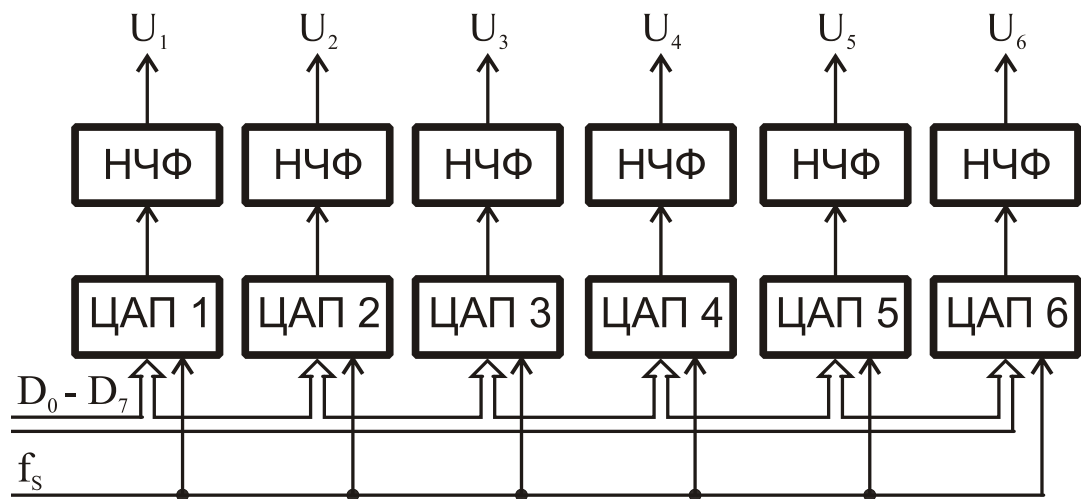
Свойства на функцията $\sin(x)$:

- периодична;
- симетрична спрямо абцисната ос;
- симетрична спрямо максимума за всеки полупериод.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Синтезиране на симулационни сигнали



За генериране на трифазна система от токове и напрежения са необходими шест цифрово-аналогови преобразувателя, които трябва да притежават буферен и изходен регистър. Честотата на дискретизация f_s се задава от таймер, като може да се променя в зависимост от изискваната стойност за честотата на трифазната система.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Изпитания на измервателни преобразуватели

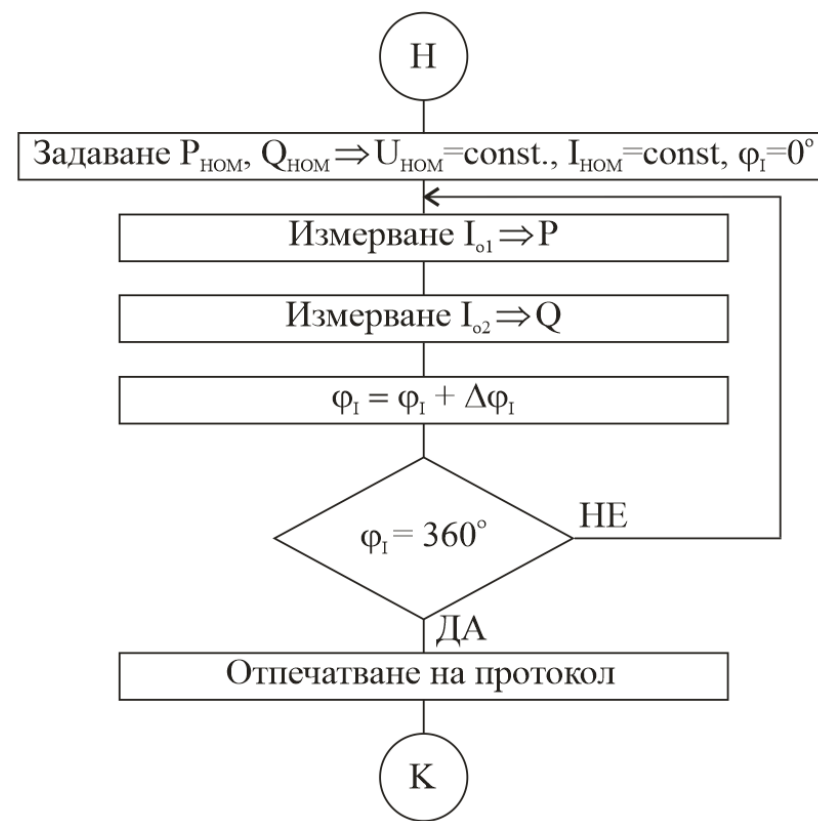
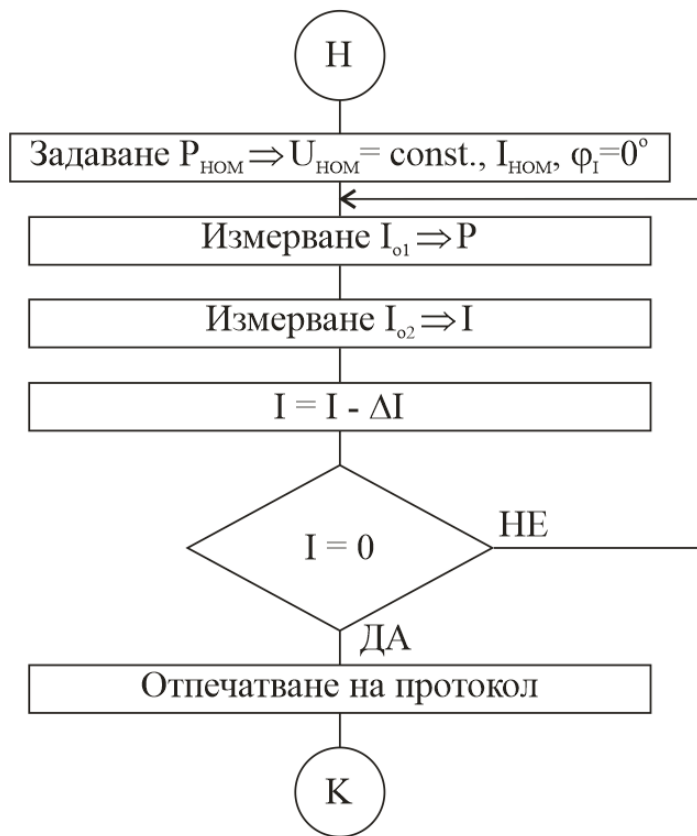
Изпитанията на измервателните преобразуватели включват снемане на предавателната характеристика и изчисляване на точността на преобразуване.

За провеждане на изпитанията трябва да се подава входна величина, чиято стойност да се изменя в целия диапазон на измерване. За всяка стойност на входната величина се отчита реакцията на преобразувателя чрез четене на данни от цифров интерфейс или измерване на тока на аналогов изход.

Електронни устройства за измерване и управление в електроенергетиката

Изпитания на защитни, измервателни и управляващи устройства

Изпитания на измервателни преобразуватели



Алгоритми за изпитания на преобразуватели на мощност