



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Катедра „Електрически машини“

маг. инж. Валентин Ангелов Миленов

СИСТЕМИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА
ЕНЕРГИЯ ОТ СЛЪНЦЕТО И ВЯТЪРА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Професионално направление: 5.2 "Електротехника, електроника и автоматика"

Научна специалност: „Електрически машини“

Научен ръководител: доц. д-р Захари Зарков

Рецензенти:

проф. д-р Никола Петров Михайлов

доц. д-р Георги Тодоров Тодоров

София 2018

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Електрически машини”, Електротехнически факултет при Технически университет – София, състояло се на 07.02.2018 г. Научното жури и датата на защитата са определени от Ректора на Технически университет – София със Заповед № ОЖ-62/15.02.2018г. Защитата на дисертационния труд ще се състои на 07.06.2018 г. от 15:00 часа в залата на Библиотечния център на Технически университет – София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически университет – София.

Научно жури:

доц. д-р Георги Тодоров Тодоров

доц. д-р Захари Живков Зарков

проф. д-тн Пенчо Владимиров Йорданов

проф. д-р Никола Петров Михайлов

доц. д-р Йордан Методиев Шопов

Автор: маг. инж. Валентин Миленов

Заглавие: СИСТЕМИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ОТ
СЛЪНЦЕТО И ВЯТЪРА

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

2018

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Темата на дисертационния труд е актуална, понеже е фокусирана върху проблеми, свързани с изследването на системи за получаване на електрическа енергия от слънцето и вятъра. Използването на такива системи за производство на енергия има сериозен растеж в последното десетилетие. Този растеж е главно заради подобряването на технологиите, което води до значително намаляване на цената на произведената от тях енергия и им позволява да са конкурентноспособни на утвърдените източници на енергия. Системите, използващи ВЕИ, са актуална и все още не напълно изследвана област, която непрекъснато се усъвършенства и развива. Моделирането и изследването на такива системи е сериозно предизвикателство, защото е необходимо да се решават задачи от различен характер – електрически, механични, електро-механични, както и задачи от автоматичното управление. Трябва да се вземе предвид и необходимостта от сериозни експериментални изследвания, които да потвърдят адекватността на теоретичните модели.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Направените изводи от аналитичния обзор са използвани за формулиране на основната цел и задачите на дисертационния труд.

Целта е да се моделират и изследват процесите на преобразуване на енергията в системи за производство на електричество от енергията на слънцето и вятъра.

Целта предполага решаването на следните задачи в дисертацията:

1. Разработване на модели на електрическите характеристики на фотоволтаични панели, произведени по различни технологии и от различни материали.
2. Разработване на модели от тип „вход-изход“ за фотоволтаични генератори, съставени от различни типове фотоволтаични панели.
3. Сравнителни изследвания на характеристиките на фотоволтаични панели и генератори, работещи при еднакви условия.
4. Провеждане на експериментални изследвания на фотоволтаични панели и генератори.
5. Разработване на цялостен симулационен модел на ветроенергийна преобразователна система със синхронен генератор, свързана към еднофазна електрическа мрежа.
6. Разширяване на конфигурацията на стенд за физическо моделиране на ВЕПС и провеждане на експериментални изследвания със стенда.

Научна новост

1. Разработените математически и симулационни модели улесняват и намаляват значително несигурността при оценяването и предвиждането на произведената електрическа енергия от ФВ системи и вятърни генератори.
2. Разработените модели на ФВ системи дават възможност за изчисляване на отдаваната в електрическата мрежа мощност на базата на метеорологични данни.
3. Разработени са модели на всички елементи на ВЕПС, състояща се от вятърна турбина, синхронен генератор с електромагнитно възбуждане, токоизправител и ограничител на напрежение и еднофазен инвертор с трансформатор. Разработен е и симулационен модел на цялата система за преобразуване на вятърната енергия, която включва изброените елементи. Моделът на ВЕПС дава възможност за симулационни изследвания на системата преди да бъде

произведена, като се оценява взаимодействието на отделните елементи и се дава възможност за промени и оптимизация в процеса на проектиране.

Практическа приложимост

1. Реализирана е експериментална платформа за изследване на фотоволтаици, в която докторантът е бил част от колектива. Платформата се състои от три слънцеследящи системи с монтирани върху тях пет различни ФВ инсталации. Представено е експериментално сравнително изследване на ФВ генератори с панели, произведени по различни технологии. Проведени са експериментални изследвания на ФВ генератори при реални условия – различна слънчева радиация и температура на модулите и на околната среда.

2. Разработен е емулятор на вятърна турбина на базата на двигател за постоянен ток с електронен преобразувател и контролер, който позволява изследване на различни условия на работата на ВЕПС в лаборатория без наличието на реална вятърна турбина за задвижване на електрическия генератор.

3. Дооборудван е стенд за физическо моделиране на ВЕПС, който успешно може да се използва за експериментални изследвания, обучение на студенти и специализанти, както и за демонстрации.

Апробация

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Електрически машини”, Електротехнически факултет при Технически университет – София, проведено на 07.02.2018г, протокол № 05/07.02.2018г

Етапи от дисертационния труд са докладвани и обсъждани на:

1. V Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ2013“, 2-5.09.2013г., Созопол.
2. VI Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ2014“, 15-17.09.2014г., Созопол.
3. XIV International conference on electrical machines, drives and power systems, ELMA2015, 1-3 October. 2015, Varna.
4. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC, 25-30 September 2016, Varna.
5. 9-th Japanese-mediterranean workshop on applied electromagnetic engineering for magnetic, superconducting and nano materials, JAPMED, 5-8 July, Sofia.
6. IX Конференция на Електротехнически факултет, ЕФ2017, 11-14.09.2017г., Св. св. Константин и Елена.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 8 статии: 1 статия е публикувана в швейцарско списание с импакт фактор; 1 – е рецензирана и в българско списание; 3 публикации са в Годишника на ТУ-София; 2 – в Трудовете на международни конференции и 1 - в Трудове на научни конференции с международно участие. Една статия е самостоятелна, а останалите са в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем 154 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 183 литературни източници, като 176 са на латиница и 7 на кирилица. Работата включва общо 166 фигури и 9 таблици.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Литературно проучване

1.1. Състояние на ВЕИ

ВЕИ са неизменна част от стратегията за енергийно развитие на повечето европейски страни и целите, които са поставени от Европейската комисия (ЕК) на Европейския съюз (ЕС) за развитие на енергийния пазар, включват именно сериозното развитие на този отрасъл.

ВЕИ представляват такива източници на енергия, които са практически неизчерпаеми и могат да се възстановят, както естествено, така и след намесата на човек. Използването на възобновяема енергия се основава на използването на естествени потоци на енергия (които произлизат главно от слънцето), а не на запаси. Всъщност, слънцето (като източник на слънчева енергия), вятърът (като източник на вятърна енергия), растенията (като източник на енергия от биомаси), водата (като източник на водна енергия) и земните недра (като източник на геотермална енергия) могат да бъдат използвани за производство на електрическа и топлинна енергия както за индустриални, така и за домакински нужди.

Увеличаването на дела на възобновяемите източници на енергия, както и внедряването им в домакинствата са мерки за ограничаване на замърсяването на атмосферата в дългосрочен план.

Инсталираните мощности от възобновяеми източници на енергия, през 2016г. надвишават 2000 GW.

Според различните видове източници на енергия ВЕИ могат да бъдат квалифицирани в следните категории:

- Източници на енергия от слънцето;
- Източници на енергия от вятъра: вятърни електроцентрали;
- Източници на енергия от водата и водните ресурси на Земята: водно-електрически централи (ВЕЦ);
- Източници на енергия от земните недра: геотермални централи;
- Източници на енергия от растенията: инсталации, които използват гориво от биомаси за получаване на електрическа и топлинна енергия.

На Фиг. 1.1 са демонстрирани инсталираните мощности на различните ВЕИ в света.



Фиг. 1.1. Инсталирани мощности на различни ВЕИ в света.

Ясна е тенденцията на увеличаване на инсталираните мощности всяка година. Най-голям дял от ВЕИ има вятърната енергия, следвана от фотоволтаиците. Те са основната причината за бързото развитие на ВЕИ.

ГЛАВА 2. Моделиране на фотоволтаични панели и генератори

1.2. Моделиране на електрически характеристики на фотоволтаични панели

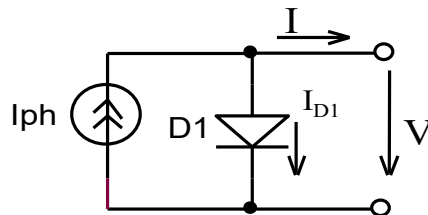
В сферата на фотоволтаичните системи усилено се работи върху развиването на подходящи математически модели за прогнозиране на изходящата мощност на ФВ генератори, оптимално проектиране на ФВ генератори, съвместна работа с електронни преобразуватели и управление на товари. С цел подобряването на ФВ системи е необходимо да се реализират математически модели на ФВ панели от различни типове.

В разгледаната литература може да се открият два подхода за моделиране на електрическите характеристики на фотоволтаични панели. Първият подход се състои в моделиране на електрическите променливи на панела – ток и напрежение или на волт-амперните характеристики (ВАХ). За тази цел фотоволтаичната клетка или целият модул се представя във вид на еквивалентна електрическа схема. Този подход е подходящ за моделиране на стратегиите за следене на точката на максимална мощност (MPPT), при разработване на подходящи хардуерни или софтуерни симулатори за фотоволтаични системи и др.

Вторият подход е ориентиран към изчисляване на ефективността на фотоволтаичните инсталации. Тези модели най-често определят изходящата мощност или енергия на фотоволтаичния генератор с цел прогнозиране производителността за дълги периоди от време.

1.2.1. Модели на фотоволтаични панели, базирани на експериментални данни

Реализираният модел на ФВ клетка и панел е основан на еквивалентната заместваща схема, показана на Фиг. 2.1. Този модел е предпочетен, защото е опростен, както и с цел да се провери каква точност може да бъде постигната с него при конкретното изследване.



Фиг. 2.1. Еквивалентна заместваща схема на фотоволтаична клетка с един диод.

В модела се използва следното уравнение, което аналитично описва ВАХ на една фотоволтаична клетка:

$$I = I_{SC} \left(1 - C_2 \left(e^{\frac{V}{C_1 V_{oc}}} - 1 \right) \right) \quad (2.1)$$

където: I_{SC} – ток на късо съединение (който в случая на еднодиодния модел без серийно съпротивление (Фиг. 2.1) е равен на I_{ph}); V_{oc} – напрежение на празен ход на клетката; V – напрежение на клетката; C_1 и C_2 – емпирични коефициенти на модела.

За моделиране на целия фотоволтаичен модул е необходимо да се преработи уравнение (2.1), за да се отчете броят на последователно свързаните клетки N_s . След преработката се получава модел на фотоволтаичния модул:

$$I = I_{SC} \left(1 - C_2 \left(e^{\frac{V}{N_s C_1 V_{oc}}} - 1 \right) \right) \quad (2.2)$$

Представеният математически модел използва следните входни величини: ток на късо съединение на модула I_{SC} , напрежение на празен ход V_{oc} , брой клетки, свързани последователно N_s .

2.1.2. Метод за определяне на параметрите на ФВ модул чрез използване на експериментални данни

На базата на снети експериментално волт-амперни характеристики се изчисляват токът на късо съединение I_{SC} и напрежението на отворената верига V_{oc} , както и температурните коефициенти на тока и напрежението на фотоволтаичния модул.

- Изчисляване на тока на късо съединение I_{SC} и на температурния коефициент на тока k_i при стандартни тестови условия (STC) въз основа на експериментално снети данни

За решаването на тази задача се съставя система уравнения. Системата се съставя за две различни стойности на слънчевата радиация.

$$I_{SC(G)} = \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) I_{SC(G_{STC})} \quad (2.3)$$

$$I_{SC(T)} = I_{SC(T_{STC})} (1 + k_i (T - T_{STC})) \quad (2.4)$$

В това уравнение има две неизвестни променливи $I_{SC(G_{STC})}$ и k_i . Понеже $I_{SC(G)} = I_{SC(T_{STC})}$, се замества в уравнение (2.4), след което се получава следното уравнение:

$$I_{SC(T)} = \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) I_{SC(G_{STC})} (1 + k_i (T - T_{STC})) \quad (2.5)$$

Следващата стъпка е да се състави система уравнения за две различни радиации, които са избрани. Системата ще бъде съставена при слънчева радиация $G_a = 610$ и 807W .

$$\begin{cases} I_{SC(T_1, G_1)} = \left(\frac{G_1}{G_{STC}}\right) I_{SC(G_{STC})} (1 + k_i (T_1 - T_{STC})) \\ I_{SC(T_2, G_2)} = \left(\frac{G_2}{G_{STC}}\right) I_{SC(G_{STC})} (1 + k_i (T_2 - T_{STC})) \end{cases} \quad (2.6)$$

Едната неизвестна променлива $I_{SC(G_{STC})}$ се полага x , другата неизвестна променлива е k_i . Отчита се от експерименталните криви какъв е бил токът на к.с. при двете радиации, както и температурата на модулите, след което се заместват в двете уравнения.

$$\begin{cases} 1.98 = 0,61x(1 + y(48.8 - 25)) \\ 2.58 = 0,81x(1 + y(49.3 - 25)) \end{cases} \quad \text{където: } y = x.k_i. \quad (2.7)$$

След решаване на системата уравнения се получават следните стойности за търсените променливи:

$I_{SC(STC)} = 4.37\text{ A}$, и $k_i = 0.0112\text{ A/}^\circ\text{C}$, за модулите от $\mu\text{c-Si}$.

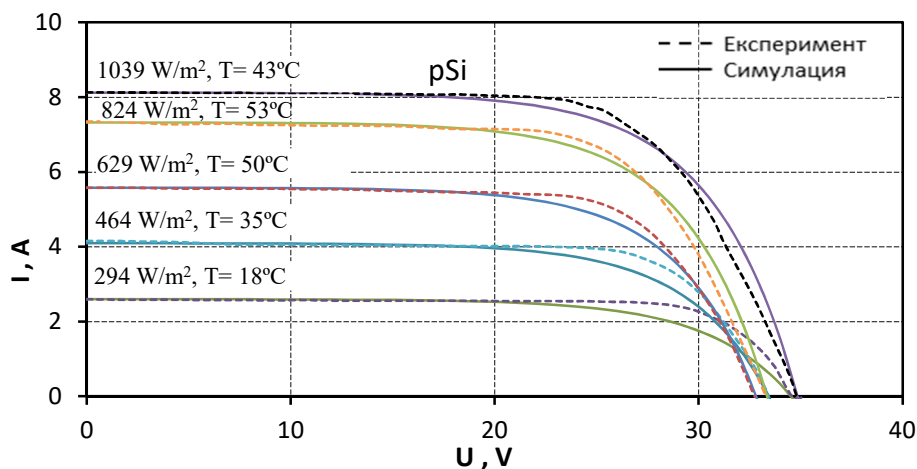
Изчисляване на напрежението на празен ход V_{oc} при STC и температурния коефициент на напрежението на празен ход k_v е подобно, както беше показано по-горе.

2.1.3. Реализация и верификация на математическия модел

Представеният до тук математичен модел е реализиран в средата на Matlab. Като входни величини за модела са въведени: слънчева радиация G_a в равнината на панела; температура на модулите T . Всички необходими величини, участващи в модела, са базирани на данни от експериментално изследване

Проверката на разработените математически модели е направена с реално получени експериментални данни от фотоволтаична платформа, която е описана подробно в глава 3.

На Фиг. 2.2 са показани изчислените В-А характеристики от моделите за поликристален силиций при различни метеорологични условия. Изчислените характеристиките са сравнени с експериментално снети такива.

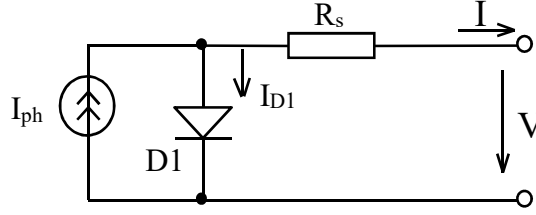


Фиг. 2.2. Проверка на моделираните В-А характеристики с реално снети за pSi.

Съвпадението между теоретичните и експериментални характеристики е сравнително добро, като се получават известни разлики главно в областта на коляното и при ниски радиации. Отклоненията достигат до 10% в стойностите на тока. Това се дължи на факта, че емпиричните коефициенти на модела не са универсални за всички работни състояния. За останалите системи получените резултати са подобни.

2.1.4. Моделиране на фотоволтаични панели с използване на данни от производителя

Реализираният тук модел на ФВ клетка и панел е основан на еквивалентната заместваща схема, показан на Фиг. 2.3.



Фиг. 2.3. Еквивалентна заместваща схема на ФВ клетка с един диод и последователно съпротивление.

Неосветена фотоволтаична клетка има същата характеристика като на обикновен диод. Разликата между диода и ФВ клетка, е че диодът консумира мощност, докато клетката произвежда. Когато клетката бъде осветена, към тока на тъмно I_{d1} се добавя фототока I_{ph} . След като се приложи първият закон на Кирхоф за схемата от Фиг. 2.3 за пълния ток на клетката се получава:

$$I = I_{ph} - I_{D1} \quad (2.8)$$

Токът на тъмно I_{D1} може да се представи с уравнението на Шокли по следния начин:

$$I_{d1} = I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

където: I_{d1} – ток през диода; I_0 – ток на насищане; токът, който би протекъл на „обратно“ през диода, ако той бъде изложен на голямо напрежение с обратен поляритет; A – бездименсионен коефициент на неидеалност на диода; k – константа на Болцман; q – заряд на електрона; R_s – последователно съпротивление; T – температура на клетката; K ; V – напрежение на изводите на клетката.

I_0 е силно зависим от температурата. Определянето му при условия на работа, различни от стандартните, става по следния начин:

$$I_0 = I_{0stc} \left(\frac{T}{T_{stc}} \right)^3 e \left[\left(\frac{qEg}{kA} \right) \left(\frac{1}{T_{stc}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.10)$$

След като се замести I_{d1} с неговото равно, се получава следното уравнение за тока на един ФВ панел:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{CkT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

Както вече бе споменато, токът I_{ph} се влияе пряко от слънчевата радиация и от температурата. С помощта на следващия израз може да се определи токът I_{ph} при различни радиации и температури.

$$I_{ph} = \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \left(I_{ph,stc} + k_i(T - T_{stc}) \right) \quad (2.12)$$

където: $I_{ph,stc}$ ток при стандартни условия; G – моментна слънчева радиация; G_{stc} – слънчева радиация при стандартни условия (1000 W/m^2); k_i – температурен коефициент за тока на късо съединение; T_{stc} – температура на клетката при стандартни условия.

Уравнението за определяне на коефициента на неидеалност C е:

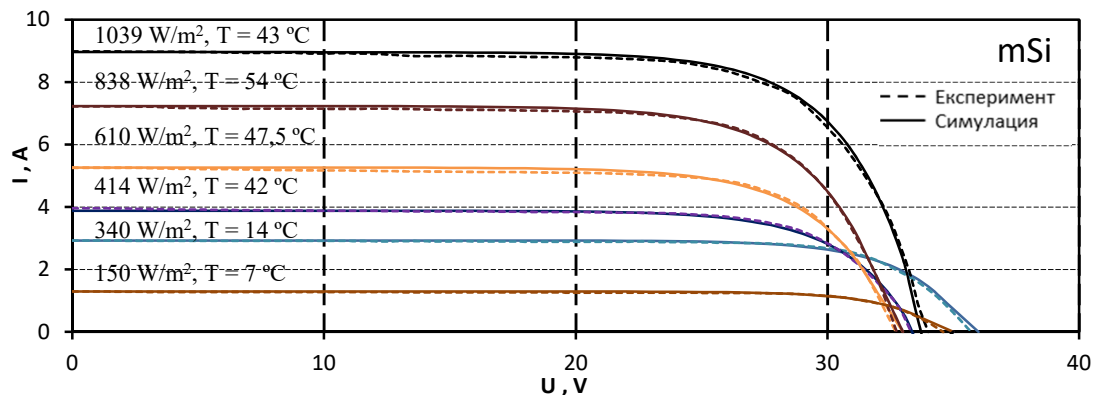
$$C = \left(\frac{v(V_{mp,stc} + I_{mp,stc}R_s)}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp,stc}}{I_{sc,stc}}\right)} \right) \quad (2.13)$$

Последователното съпротивление се изчислява чрез следния израз:

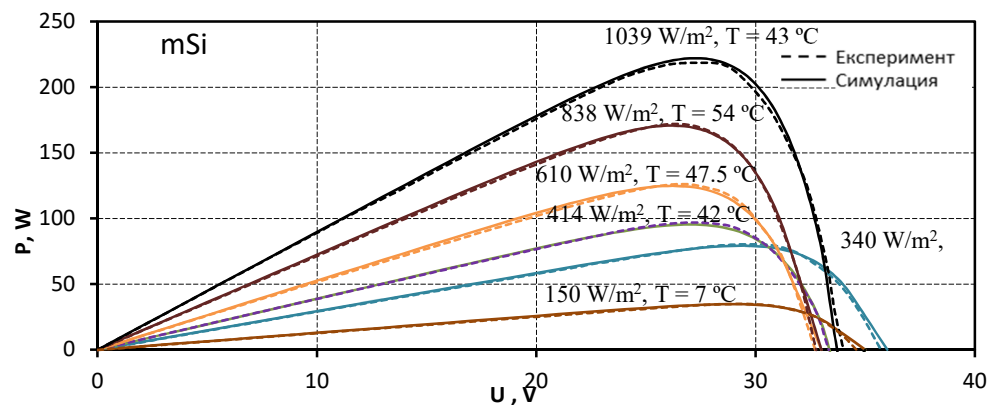
$$R_s = \frac{\ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_0}\right) N_s V_t - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.14)$$

2.1.5. Верификация на модела

На следващите фигури са представени съответно получените резултати за ВАХ и характеристиката на мощността на ФВ панели с монокристален силиций, чрез използване на представения по-горе модел. На графиките изчислените ВАХ и характеристика на мощността са сравнени с експериментално получени криви при едни и същи условия – слънчева радиация и температура. Експерименталните криви са получени чрез специализиран апарат за анализ на фотоволтаични панели.



Фиг. 2.4. Проверка на моделираните В-А характеристики с реално снети характеристики за панели от mSi, експериментални криви (с прекъснати линии) и теоретични (плътни линии).



Фиг. 2.5. Проверка на моделираните характеристики на мощността с реално получени характеристики за панели от mSi. Експериментални криви - с прекъснати линии и теоретични - плътни линии.

2.2. Модел на фотоволтаични генератори от тип „вход-изход“

Целта на изследването тук е да се разработят подходящи модели за к.п.д. и генерираната мощност на ФВ системи, съставени от модули от различни технологии. Една и съща функционална зависимост важи за различни видове технологии, ако параметрите на модела се определят поотделно за всяка.

Формулата за к.п.д. на ФВ панел съгласно модела на Дюриш, е следната:

$$\eta_{pv} = p \left[q \frac{G_a}{G_{ar}} + \left(\frac{G_a}{G_{ar}} \right)^m \right] \times \left[1 + r \frac{T_c}{T_{cr}} + s \frac{AM}{AM_r} + \left(\frac{AM}{AM_r} \right)^u \right] \quad (2.15)$$

Определянето на коефициентите в модела се извършва чрез апроксимация на експериментални данни за к.п.д. на изследваните модули чрез аналитична функция в софтуерния продукт Matlab.

Предлагат се два подхода за използване на модела на Дюриш. Първият подход е реализиран с отчитане на влиянието на относителната въздушна маса AM, докато при втория това влияние е пренебрегнато.

- Първи подход - с отчитане на влиянието на относителната въздушна маса

При този подход за изчисляването на к.п.д. на ФВ панели е необходима информация за относителната въздушна маса във всеки момент от време, когато експерименталните данни са снети.

Относителната въздушна маса AM представлява отношението на пътя на слънчевата радиация през атмосферата до земната повърхност спрямо пътя, когато слънцето се намира в зенита. Когато слънцето се намира ниско на небосклона, слънчевата радиация трябва да преминава значителна дебелина на атмосферата, което води до увеличаване относителната въздушна маса.

За практическо определяне на относителната въздушна маса в зависимост от зенитния ъгъл θ_z се използва следната формула на Кастен и Йънг :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z + 0.50572(96,07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (2.16)$$

- Втори подход - с пренебрегване влиянието на относителната въздушна маса

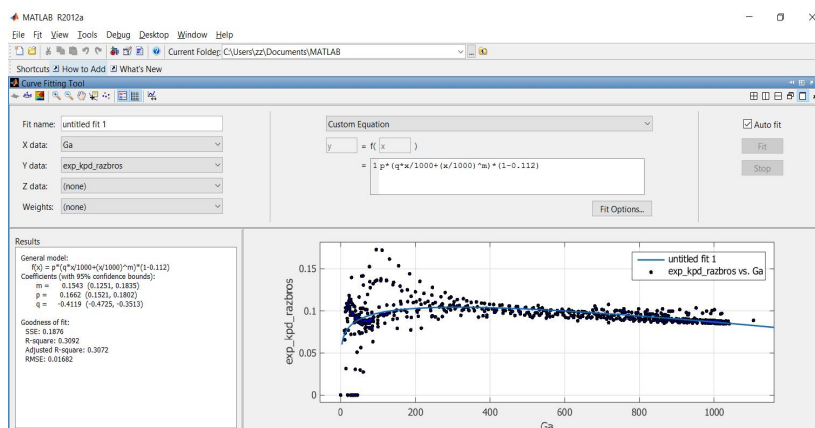
В този случай се пренебрегва влиянието на относителната въздушна маса, което води до намаляване броя на емпиричните коефициенти на три.

При това пренебрегване формула (2.15) се модифицира до следната:

$$\eta_{pv} = p \left[q \frac{G_a}{G_{ar}} + \left(\frac{G_a}{G_{ar}} \right)^m \right] \cdot \left[1 + r \frac{T_c}{T_{cr}} \right] \quad (2.17)$$

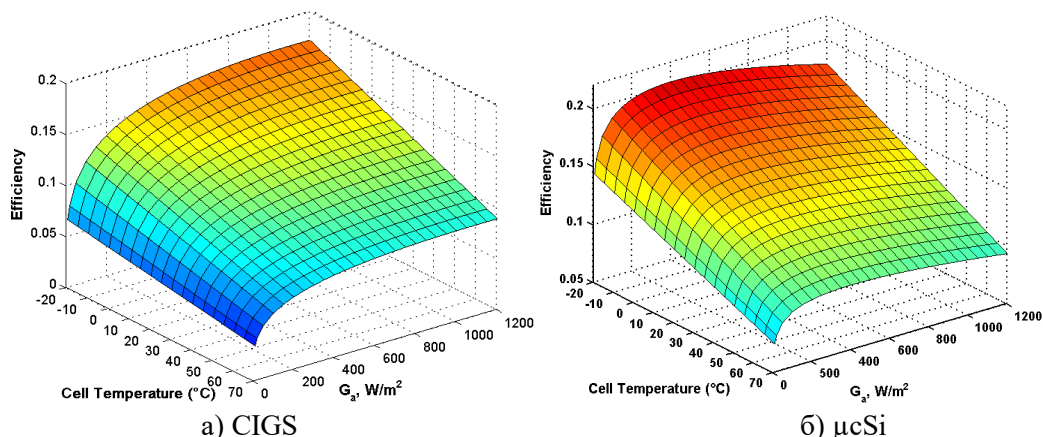
Благодарение на това може да се използват данни от различни дни и определянето на търсените коефициенти е по-лесно.

Определянето на коефициентите се извършва по-следния начин: първо се въвеждат експерименталните данни от различните дни и се изчертава графика на к.п.д., приведен към стандартна температура 25°C , във функция от слънчевата радиация. След това се въвежда функцията (2.17) с която се прави апроксимиране на данните и се изчертава теоретичната крива. В резултат на апроксимацията програмата изчислява търсените коефициенти p , q и m . На Фиг. 2.6 е показана снимка на инструмента Curve fitting tool от Matlab с процеса на апроксимацията.



Фиг. 2.6. Снимка на инструмента Curve fitting tool в Matlab.

На Фиг. 2.7 са показани триизмерни графики на к.п.д. спрямо температурата на модулите и слънчевата радиация на ФВ системи, където ясно може да се види температурната зависимост на к.п.д.



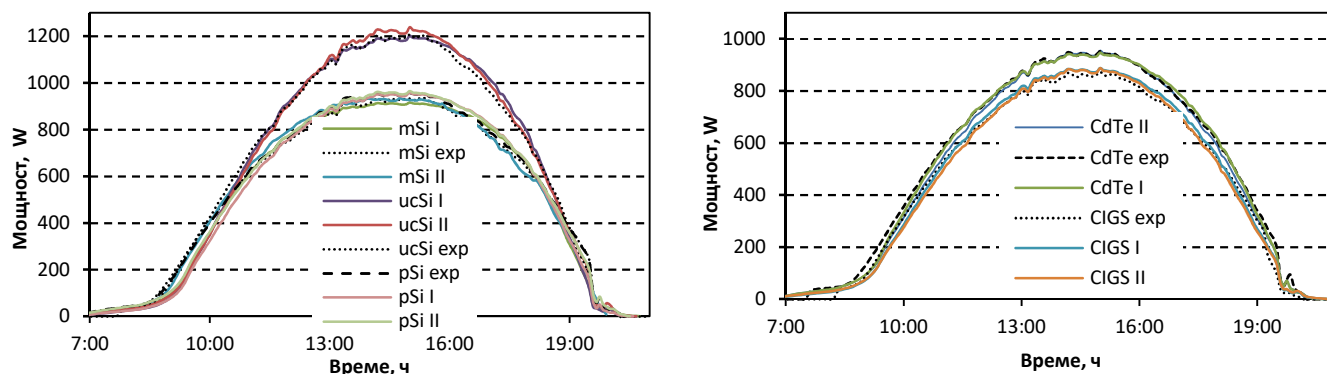
Фиг. 2.7. Триизмерни графики на изследваните модули при различна слънчева радиация и константна температура.

2.2.1. Проверка на моделите за к.п.д. на ФВ панели

Проверката на математическите модели би могло да улесни и намали несигурността в предвиждането на енергията, получена от фотоволтаичните централи.

Точността на методите е проверена посредством сравнение със снети експериментални данни. За тази цел са използвани данни от два дни с различни метеорологични условия – слънчев и облачен. Измерените данни за слънчевата радиация и температура на модулите се въвеждат в уравнението на модела и прогнозираната изходяща мощност на ФВ системи се изчислява.

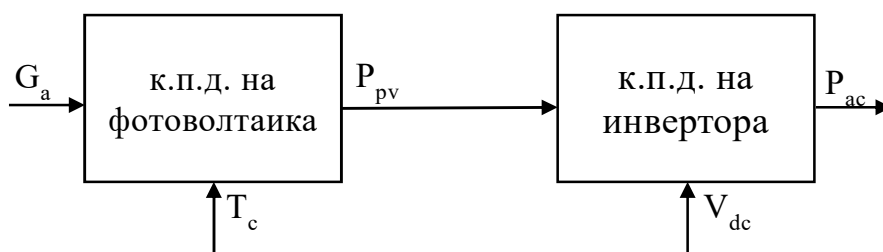
Сравнението на изчислената и измерената мощност на ФВ системи при слънчев ден е показано на Фиг. 2.8



Фиг. 2.8. Проверка на изчислената мощност чрез двата метода в сравнение с експериментално отчетената мощност при слънчев ден.

2.3. Моделиране на мощността на фотоволтаични системи с еднофазен инвертор

Целта на изследването тук е да се изчисли мощността на фотоволтаична система, която се състои от фотоволтаичен масив и инвертор, който е свързан към електрическата мрежа. Примерна схема на свързване на фотоволтаичния масив и инвертора е показана на Фиг. 2.9.



Фиг. 2.9. Схема на фотоволтаична инсталация.

В първия блок се изчислява мощността на фотоволтаичния масив посредством прилагане на втория модел на Дюриш, който беше развит по-горе. Във втория блок се изчислява коефициентът на полезно действие на инвертора, който ще бъде подробно разгледан тук.

Всяка от изследваните фотоволтаични системи е свързана към електрическата мрежа чрез еднофазен инвертор тип SB1200 с номинална мощност $P_{rated} = 1200W$. От гледна точка на произведената електрическа мощност на изхода на цялата ФВ система, е важно да знаем мощността на изхода на инвертора P_{ac} . Мощността на ФВ система се подава на входа на инвертора P_{pv} . Мощността на изхода на инвертора P_{ac} се изчислява чрез следния израз:

$$P_{ac} = P_{pv} \eta_i \quad (2.18)$$

където η_i е к.п.д. на инвертора.

К.п.д. зависи от изходната мощност и входното постоянно напрежение на инвертора. Данните, предоставени от производителя, са апроксимирани като се използва следният израз:

$$\eta_i = \frac{P_{ac}}{n_2 P_{ac}^2 + n_1 P_{ac} + n_0} \quad (2.19)$$

където p_{ac} - изходящата мощност на инвертора в относителни единици, която е изчислена по следния начин $p_{ac}=P_{ac}/P_{rated}$, n_0 , n_1 , и n_2 са неизвестни параметри, които трябва да се определят.

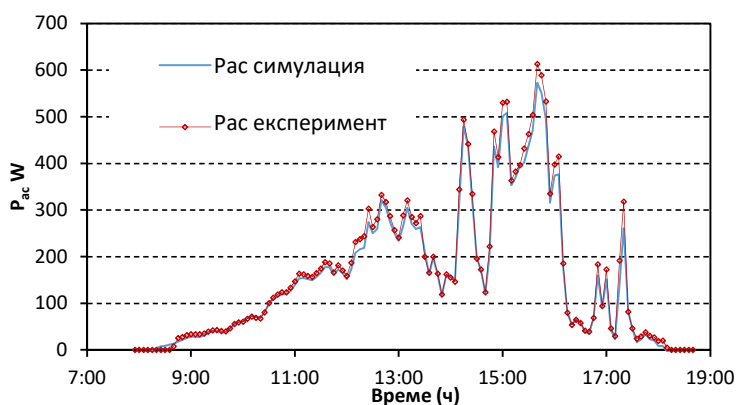
Проблемът за изчисляване на мощността според (2.18) произтича от факта, че изходящата мощност P_{ac} на инвертора не се знае. Начинът за изчисляване на мощността от ФВ системите беше показан по-горе. Единствената информация за изчисление на P_{ac} е P_{pv} и постоянното напрежение V_{dc} . Следователно, е необходимо да се изрази к.п.д. на инвертора η_i във функция на P_{pv} от дадено напрежение V_{dc} . Това е направено като е заместена мощността p_{ac} в (2.19) с $\eta_i.p_{dc}$. Резултатът, който се получава след решаването на полученото квадратно уравнение, за η_i е:

$$\eta_i = \frac{\sqrt{n_1^2 + 4n_2(p_{dc} - n_0)} - n_1}{2n_2 p_{dc}} \quad (2.20)$$

където $p_{dc}=P_{dc}/P_{rated}$.

В допълнение формулата (2.20) е използвана за изчисляване на изходящата променливотокова мощност на ФВ системи въз основа на прогнозиране на изчислената мощност на изхода на ФВ панели, като се използва методът, описан по-горе, с параметрите на модела на Дюриш.

Сравнението е показано на Фиг. 2.10 за ФВ система с модули от CdTe, които работят при средно постоянно напрежение $V_{dc}=195V$. Използвана е кривата на к.п.д. на инвертора за 200V, което с много малко отклонение от работното напрежение напрежението на CdTe. Както се вижда, съвпадението между теоретичната и експериментална мощност е много добро. Резултатите за другите ФВ системи са подобни.



Фиг. 2.10 Сравнение между теоретична и експериментална АС изходяща мощност за ФВ система с CdTe модули за облачен ден.

ГЛАВА 3. Експериментално изследване на фотоволтаични генератори

3.1. Реализиране на платформа за изследване на ФВ системи със слънцеследящи системи

Инсталациите с фотоволтаични (ФВ) панели могат да се разделят на две големи групи – статични и подвижни (слънцеследящи). В първия случай панелите са закрепени на стойки, които са неподвижни в продължение на няколко месеца или цялгодишно. При подвижните системи модулите са закрепени на подвижна рамка, която променя своето местоположение през деня. Движението може да се извършва по една или по две оси.

Сравнението на неподвижните и слънцеследящите системи е обект на много различни изследвания, целящи определянето на предимствата и недостатъците им.

При слънцеследящите системи (тракери) с една ос на движение съществуват две концепции. При първата от тях оста на движение е ориентирана север-юг и панелите следват движението на Слънцето от изток на запад. Оста е наклонена спрямо хоризонталното положение както при неподвижните системи. Посредством тази техника за следене на Слънцето се постига увеличение на получената от модулите слънчева радиация с около 19-24% спрямо статичните системи. При втория замисъл, при която оста на движение е хоризонтална и панелите следят височината на Слънцето на небосклона се постига по-малко увеличение - около 15%.

При концепцията за двуосно следене на Слънцето първата ос следва движението на Слънцето от изток на запад, а втората - неговата височина на небосклона. Така се постига най-голямо увеличение

на слънчевата радиация получена от фотоволтаичните модули – 30-40% повече отколкото при фиксирана конструкция.

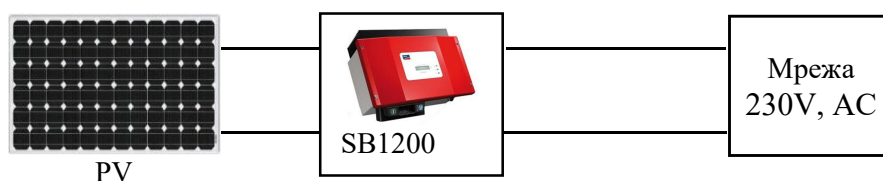
3.1.1. Конфигурация на фотоволтаичната система

Използваните в дисертационния труд фотоволтаични системи са изградени в рамките на проект на Национален фонд “Научни изследвания” по договор ДУНК 01/3 “Университетски научно-изследователски комплекс. Изградената експериментална платформа се намира зад 4-ти учебен блок на Технически университет – София. Предназначена е за експериментални изследвания на фотоволтаични системи при реални условия на работа.

Изградени са пет фотоволтаични системи, свързани към електрическата мрежа посредством еднофазни инвертори. ФВ модули са разположени на 3 слънцеследящи системи от тип Feina SF20 със следните основни характеристики:

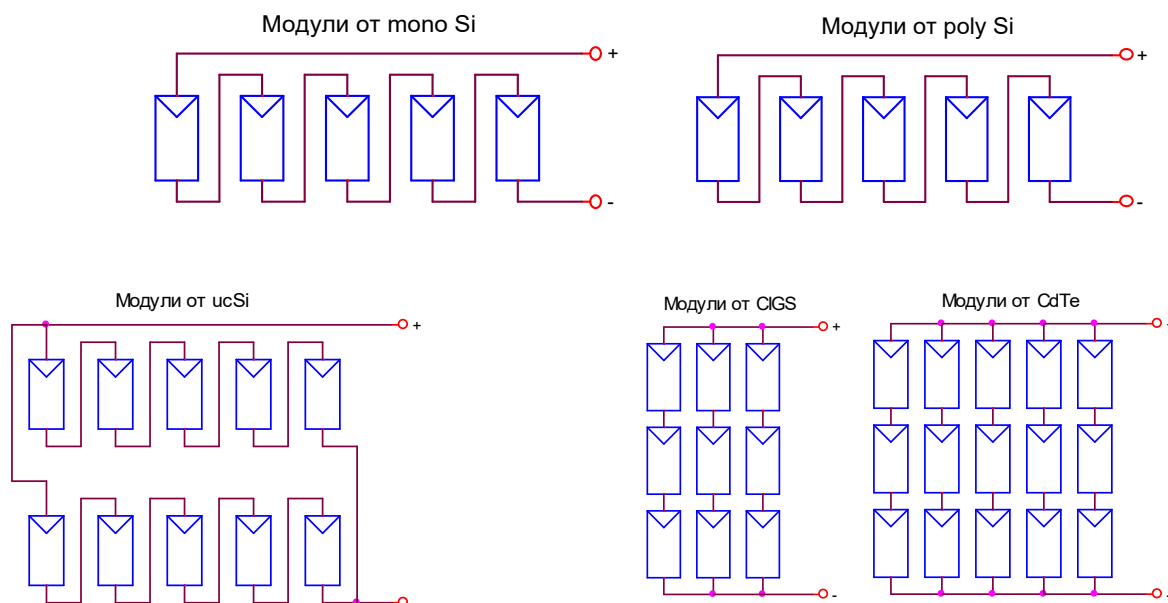
- Максимална площ на монтираните модули 20m^2 .
- Следене на слънцето по 2 оси.
 - по хоризонталната (ъгъл на наклон) $0 - 80^\circ$;
 - по вертикалната (азимут) следене от $90 - 270^\circ$ (изток - запад);
- Задвижване с два постояннотокови двигателя.
- Захранване на контролера и двигателите – от акумулатор 12V, зареждан от адаптер, включен към мрежата 230V.
- Ориентация чрез изчисляване на положението на Слънцето по астрономическите уравнения при зададени географски координати и време.
- Анемометър за измерване на скоростта на вятъра.

Всеки ФВ генератор е свързан към електрическата мрежа с еднофазен инвертор тип Sunny Boy 1200, както е показано на *Фиг. 3.1*.



Фиг. 3.1 Схема на свързване на фотоволтаичните генератори към мрежата.

Броят на последователно свързаните панели зависи от входното напрежение на избрания инвертор $U_{\text{вх}}$. За удовлетворяване на изискванията за входно напрежение на инверторите панелите от всяка технология са свързани в различни конфигурации - *Фиг. 3.2*.



Фиг. 3.2 Схеми на свързване на модулите в петте ФВ генератора.

Завършеният вид на слънцеследящите системи е показан на Фиг. 3.3.



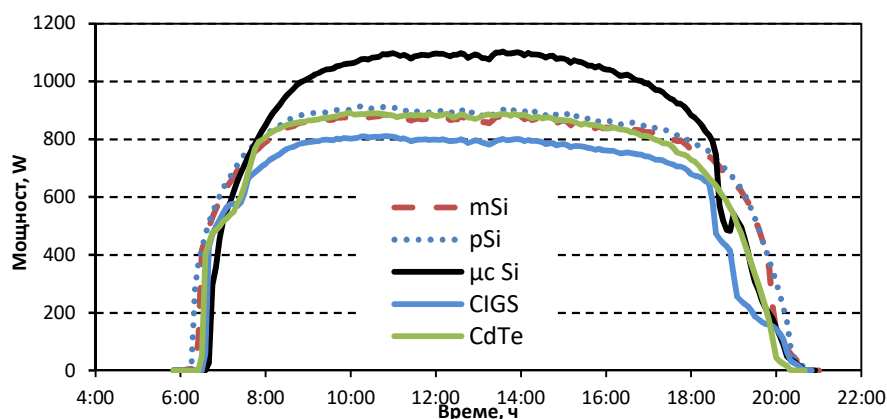
Фиг. 3.3 Слънцеследящи системи с монтирани ФВ модули.

3.2. Експериментално изследване на ФВ модули при реални условия на работа

Реализираната експериментална платформа със слънцеследящи системи дава възможност за широк спектър от сравнителни изследвания върху наличните фотоволтаични инсталации с модули, произведени по пет различни технологии, които бяха споменати по-горе.

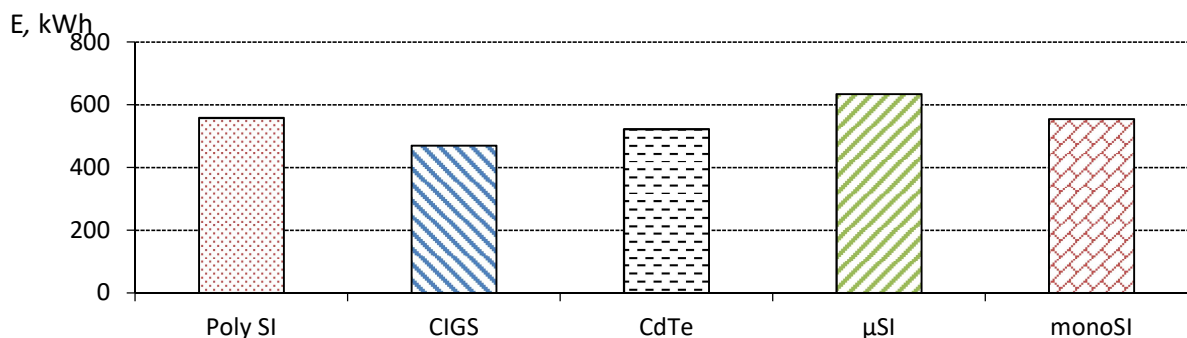
3.2.1. Експериментални резултати при режим на слънцеследене на ФВ системи

На Фиг. 3.4 е показана генерираната мощност от петте ФВ системи за 05.07.2014г.



Фиг. 3.4. Изменение на генерираната мощност от ФВ системи за 05.07.2014г.

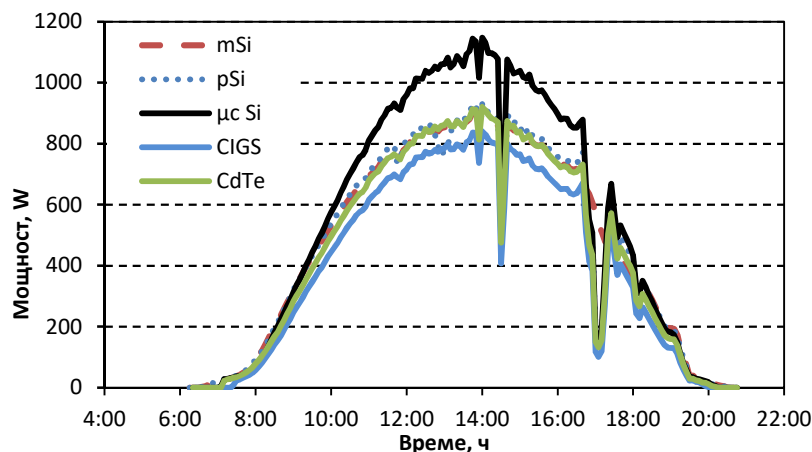
Генерираната електроенергия от всяка една от фотоволтаичните системи за периода от началото на месец юни до началото на месец септември 2014г. е представена на Фиг. 3.5.



Фиг. 3.5. Обща произведена електроенергия от месец юни до началото на септември 2014 г.

3.2.2. Експериментални резултати при режим на слънцеследене на ФВ системи

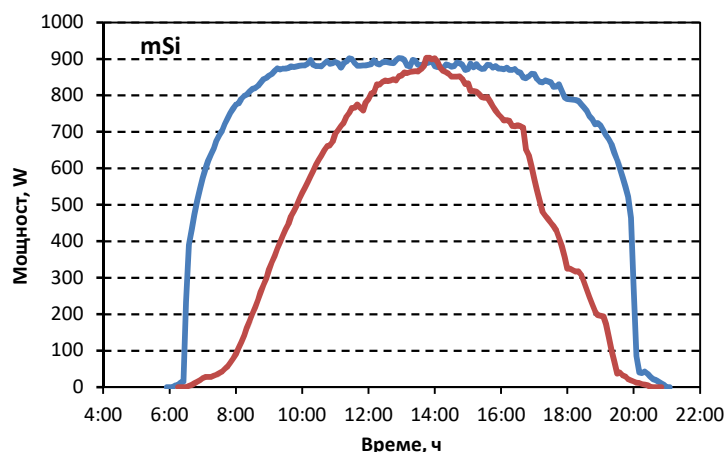
На Фиг. 3.6 са показани резултати от изследванията на изменението на мощността на фотоволтаичните генератори при фиксирано положение на модулите. Данните са за 26.07.2014 при фиксирана позиция: ъгъл на наклона спрямо хоризонта 35° и азимут юг.



Фиг. 3.6 Мощност на ФВ генератори за 26.07.2014г. при фиксирана система.

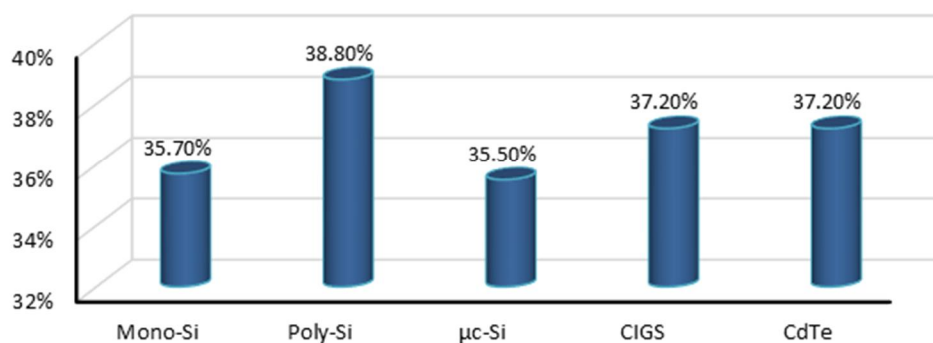
3.2.3. Сравнително изследване между слънцеследяща и фиксирана система

На Фиг. 3.7 е показано сравнение на генерираната мощност между следяща и фиксирана система при слънчев ден за системите от моно-кристален силиций. Слънцеследящата система има предимство пред фиксираната, защото успява да поддържа продължително време максимална мощност между 9:00ч до 18:00ч. При фиксираната система максималната мощност се достига само за кратък интервал от време около обед. За останалите 4-ри ФВ системи получените резултати са идентични.



Фиг. 3.7. Сравнение на мощността при слънцеследяща и фиксирана система.

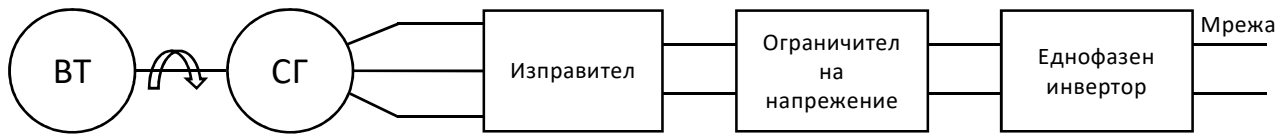
Увеличението на произведената енергия на следяща към фиксирана система е показано на Фиг. 3.8.



Фиг. 3.8. Увеличение на производителността на слънцеследяща спрямо фиксирана система.

ГЛАВА 4. Моделиране на ветроенергийни преобразователни системи

Блокова схема на изследваната ветроенергийна преобразователна система е показана Фиг. 4.1. Тя се състои от: вятърна турбина (ВТ); синхронен генератор с електромагнитно възбуждане (СГ); трифазен диоден токоизправител; ограничител на напрежение и еднофазен инвертор.



Фиг. 4.1. Блокова схема на изследваната ВЕПС.

Разработени са модели на всички елементи от показаната блокова схема. Тъй като тя се състои от елементи с различна физическа природа – механични, електромеханични и електрически, е използвана среда Matlab/Simulink за разработване на симулационните компютърни модели.

4.1. Математически модел на вятърна турбина

Работните характеристики на вятърната турбина имат специфична форма, която зависи от геометрията на турбината, скоростта на вятъра, ъгъла на атака и т.н.

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_p \quad (4.1)$$

където: ρ е плътност на въздуха, V - скорост на вятъра, A - ометената площ на турбината и C_p - коефициент на мощността на ВТ.

На базата на направеното литературно проучване за описване на поведението на ВТ е използван математически модел основаващ се на изчисляване на коефициента на мощността на турбината C_p . Този коефициент е нелинейна функция на ъгъла на атака на лопатите β и скоростното отношение λ .

$$C_p = f(\lambda, \beta) \quad (4.2)$$

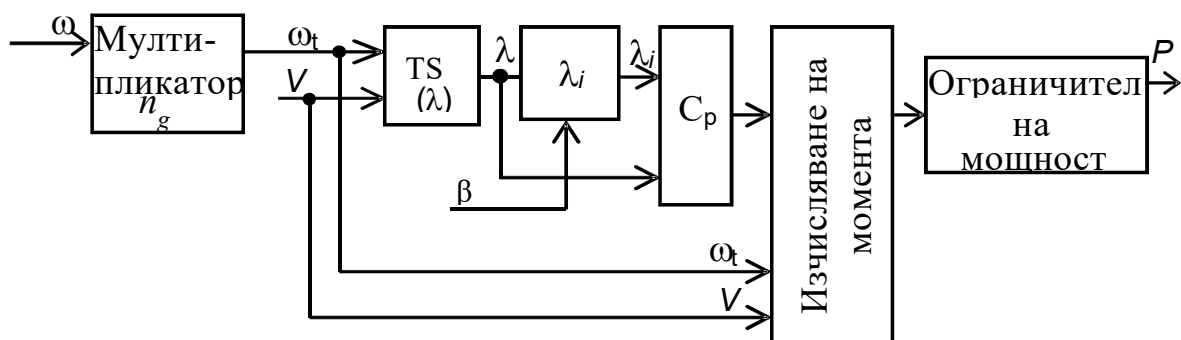
За моделиране на C_p на турбината е използвана следната математическа зависимост:

$$C_p = a_1 \left(a_2 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - a_3 \cdot \beta - a_4 \right) \cdot e^{-\frac{a_5}{\lambda_i}} + a_6 \quad (4.3)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + b_1 \beta - \frac{b_2}{\beta^3 + 1}} \quad (4.4)$$

Коефициентите a_1 до a_6 зависят от аеродинамичните характеристики на турбината. За типична трилопатна турбина с малка мощност тези коефициенти са: $a_1=0,5176$, $a_2=116$, $a_3=0,4$, $a_4=5$, $a_5=21$, $a_6=0,0068$. За симулациите се приема, че ъгълът на атака на лопатите е $\beta=0^\circ$, което е характерно за малките вятърни турбини.

Структурата на разработения симулационен модел на вятърната турбина и мултипликатора в Simulink е показана на Фиг. 4.2.



Фиг. 4.2. Структура на разработения модел на вятърна турбина в Simulink.

В този модел като входни величини се използват скоростта на вятъра V и ъгловата скорост на турбината ω_t . На базата на уравненията на модела на турбината се изчислява текущата мощност на турбината, която през мултипликатора се подава на вала на синхронния генератор.

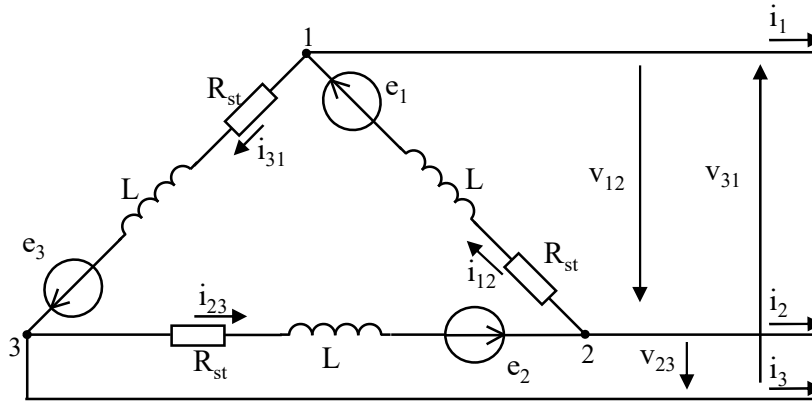
4.2. Моделиране на синхронен генератор

За математическо моделиране на СМ съществуват различни модели с различна сложност. В литературното проучване беше показан най-широко използваният модел, който е в d-q координатна система и използва преобразуванията на Парк. Пълният модел на СМ е доста сложен, защото трудно се решава числено и аналитично, понеже има зависимост на индуктивностите от позицията на ротора.

Основанието за опростяване на модела на СМ в настоящата работа, е че се изследват продължителни периоди от време на работата на цялата система. За да бъде времето за изчисление приемливо, се налага да се въведат някои опростявания. Едно от тях е именно въвеждането на опростен модел на СМ, който е валиден за *променлива скорост на въртене на машината в широки граници*.

Сериозен недостатък на модела на СГ, предлаган от софтуера Matlab/Simulink, е че не позволява свързването на фазите на генератора да бъде в триъгълник. Кое налага да се разработи модел на СГ със свързване на фазите в триъгълник. Свързването в триъгълник се налага понеже в реалния стенд свързването на фазите на СГ е такова. Това се прави с цел да се получи изправено постоянно напрежение до 400V, което е подходящо за работата на инвертора.

На Фиг. 4.3 е показана опростена заместваща схема на СГ със свързване на фазите в триъгълник.



Фиг. 4.3. Опростена заместваща схема на СГ.

Опростената заместваща схема на СГ е представена като трифазен симетричен източник на променливо напрежение с вътрешен импеданс, състоящ се от резистор и индуктивност. Резисторът отразява активното съпротивление на статорната фаза, а индуктивността – реакцията на тока на котвата и индуктивността на разсейване. Влиянието на успокоителната намотка в машината е пренебрегнато. Разглеждането на синхрония генератор като източник на напрежение с последователно свързана индуктивност и резистор е използвано и от други автори. В тази схема стойността на индуктивността L е средната стойност на L_d и L_q .

Чрез заместващата схема се определят линейните напрежения, които са следните:

$$\begin{cases} v_{12}(t) = e_1(t) - i_{12}(t)R_{st} - L \frac{di_{12}}{dt} \\ v_{23}(t) = e_2(t) - i_{23}(t)R_{st} - L \frac{di_{23}}{dt} \\ v_{31}(t) = e_3(t) - i_{31}(t)R_{st} - L \frac{di_{31}}{dt} \end{cases} \quad (4.5)$$

Връзката между фазните и линейните токове се определя, като за всеки от възлите на триъгълника се приложи първият закон на Кирхоф:

$$\begin{cases} i_1(t) = i_{12}(t) - i_{31}(t) \\ i_2(t) = i_{23}(t) - i_{12}(t) \\ i_3(t) = i_{31}(t) - i_{23}(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

Трите електродвижещи напрежения се представят чрез следните изрази:

$$\begin{cases} e_1(t) = E_m \sin \theta_{el} \\ e_2(t) = E_m \sin(\theta_{el} - \frac{2\pi}{3}) \\ e_3(t) = E_m \sin(\theta_{el} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (4.7)$$

Връзката между вятърната турбина и СГ се осъществява чрез уравнението за механично равновесие, чрез което се изчислява ъгловата скорост на въртене ω :

$$\omega(t) = \frac{1}{J} \int (M - M_e - k_d \omega - M_{fr}) dt \quad (4.8)$$

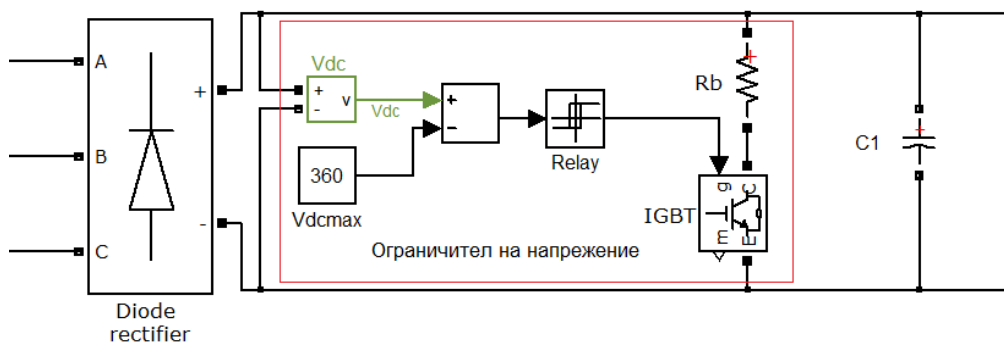
където: J – инерционен момент, M – външен механичен момент на вала на генератора (момент на турбината), k_d – коефициент на вискозно триене, M_{fr} – допълнителен съпротивителен момент.

Изложеният модел на СГ е подходящ при симулирането на цялата ВЕПС понеже може да работи с променлива скорост на въртене на генератора и не изисква голям изчислителен ресурс. Използване му се налага, тъй като се симулира функционирането на цялата система за преобразуване на вятърната енергия за дълги периоди от време.

Данните използвани за симулацията на СГ са: $L = 167 \text{ mH}$, $R_{st} = 5\Omega$, $E_m = 373\text{V}$, $J = 0.0923\text{kg.m}^2$.

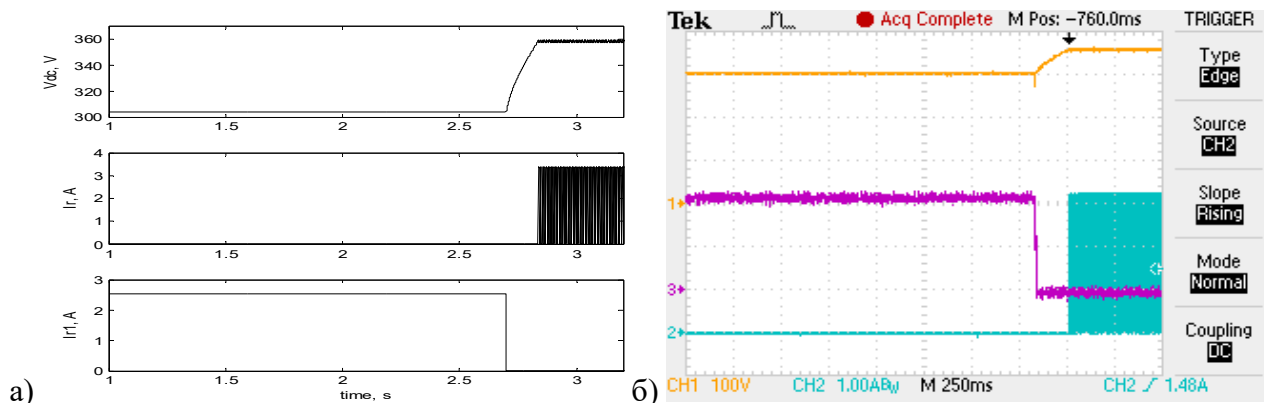
4.3. Моделиране на ограничител на напрежение

При скорости на въртене над 1500min^{-1} генераторът и токоизправителят ще произвеждат напрежение, което може да надвиши 400V . Това напрежение е опасно за инвертора и трябва да се вземат мерки за неговото ограничаване. Едно добро решение е да се създаде ограничител на напрежение, който да отвежда мощността на генератора във външен “баластен товар”. Необходимостта от ограничител на напрежение е особено голяма, когато връзката с мрежата на инвертора се прекъсне и мощността не може да се предаде към мрежата. Генераторът, задвижван от вятърната турбина, ще продължи да работи и напрежението на входа на инвертора ще се повишава, което е опасно за инвертора. Препоръчителната стойност на ограничаване на напрежението е 360V . Моделър на диодния изправител и ограничителя на напрежение в Simulink е показан на Фиг. 4.4.



Фиг. 4.4. Модел на диоден изправител и ограничител на напрежение в Simulink.

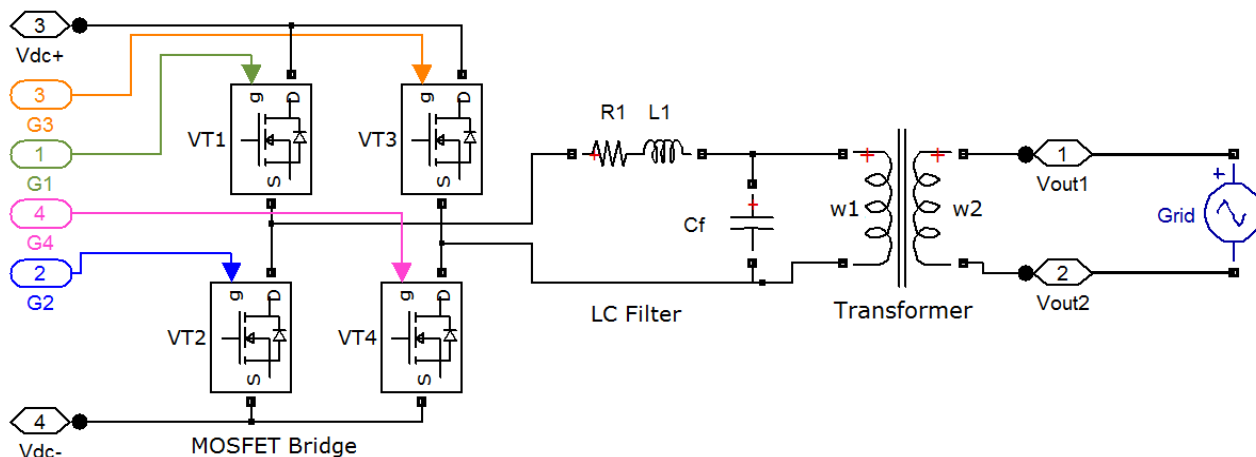
На Фиг. 4.5 са показани сравнения между симулацията и реално снети форми на токове и напрежение на ограничителя при отпадане на товара. Целта е да се установи дали при повишаване на напрежението ограничителят ще сработи. Опитът е извършен с използване на емулатор на ВТ при скорост на вятъра 9.5 m/s .



Фиг. 4.5. Напрежение V_{dc} и ток през резистора при скорост на вятъра $9,5\text{ms}$
а) симулация; б) осцилограма.

4.4. Моделиране на еднофазен инвертор

Инверторът, който се използва в изследваната система е еднофазен, свързан към мрежата през LC филтър и нискочестотен трансформатор. Схемата на инвертора е пълен мост с 4 MOSFET транзистора. Една от причините за използването на трансформатор е възможността да се повиши напрежението от инвертора 2 пъти, като така се осигури възможност да се работи с по-ниско входно напрежение – в случая от 160 до 360V. Структурата на разработения детайлен модел на инвертора, който включва LC филтър и трансформатор, е показана на Фиг. 4.6.



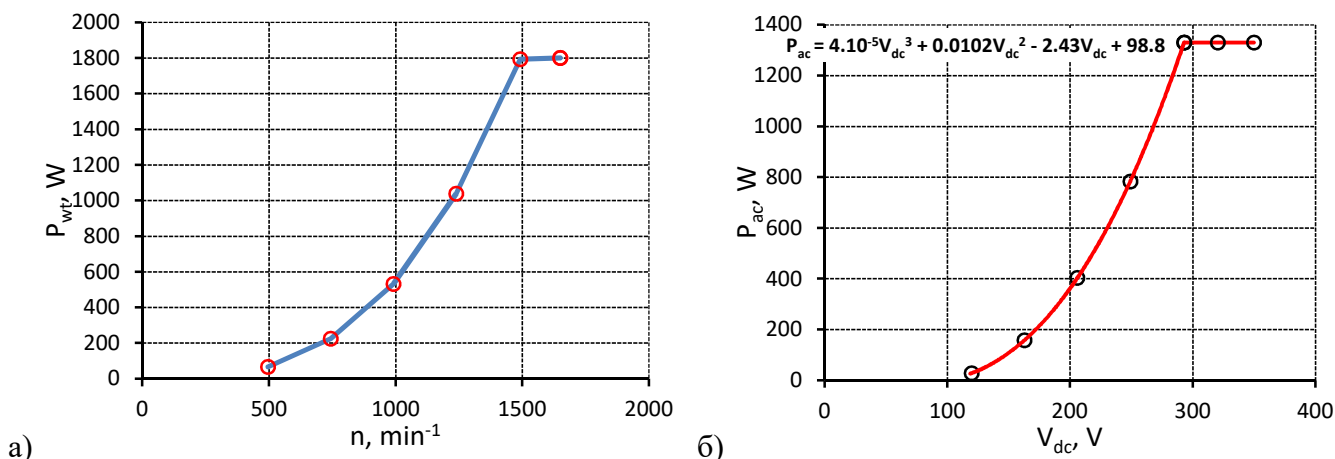
Фиг. 4.6. Детайлен модел на еднофазен инвертор с LC филтър и трансформатор в Simulink.

Показаният на модел на инвертора е детайлен, защото отчита и комутациите на транзисторите с честотата на модулацията, която е 10kHz. Той се използва за симулиране на кратки периоди от време. За да може да се симулира работата на ВГ за продължителни периоди от време, е разработен и осреднен модел на инвертора, който не отчита комутациите на транзисторите.

Една важна задача при управлението на инвертора е да се осигури работа при максимална мощност на турбината и целия вятърен генератор при промяна на скоростта на вятъра. Тази задача е решена като е изчислена кривата на максималната мощност на ВТ в зависимост от скоростта на въртене на генератора, показана на Фиг. 4.7 (а). След това е изчислена електрическата мощност на изхода на изправителя при същите скорости на въртене, като е взет предвид к.п.д. на СГ и изправителя. Същевременно е намерена зависимостта на изправеното напрежение V_{dc} от скоростта на въртене на СГ при дадените стойности на мощността. Като е използвана кривата на к.п.д. на инвертора, дадена от производителя, е изчислена мощността на изхода на инвертора P_{ac} в зависимост от постоянното напрежение V_{dc} - Фиг. 4.7 (б). Зависимостта $P_{ac}=f(V_{dc})$ е апроксимирана с полином от трета степен, който е следният:

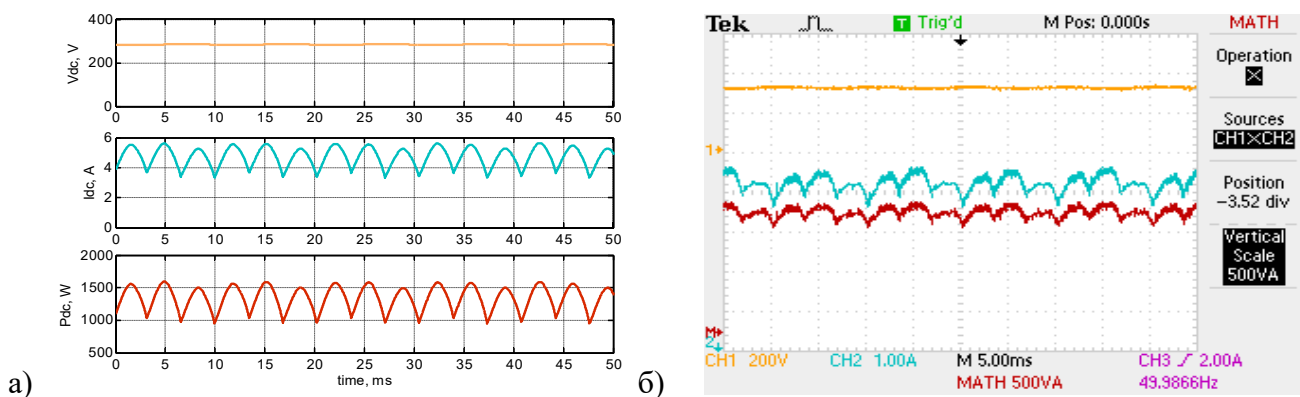
$$P_{ac} = 10^{-5}V_{dc}^3 + 0,0102V_{dc}^2 - 2,432V_{dc} + 98,8. \quad (4.9)$$

Тази крива се задава на инвертора и се използва при работата му за определяне на изходната мощност в зависимост от входното напрежение V_{dc} .

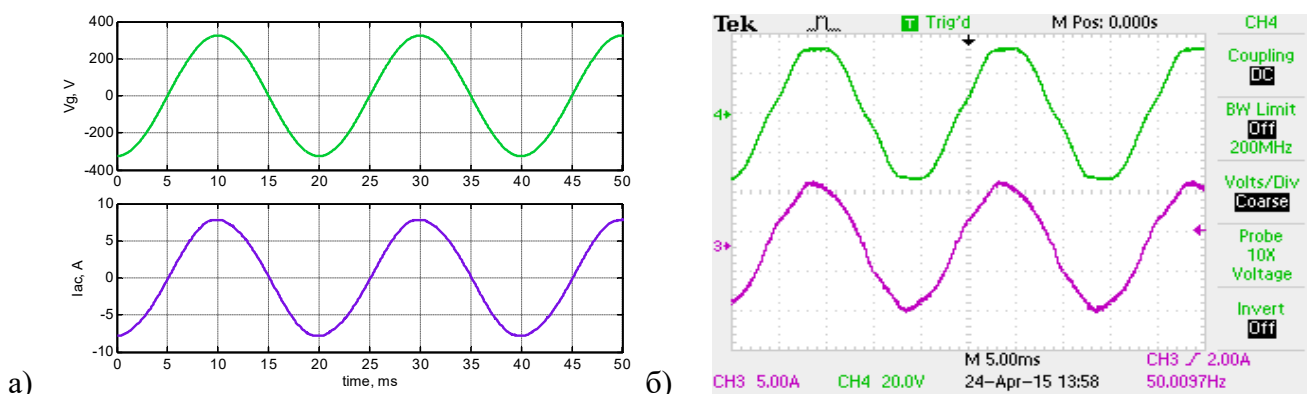


Фиг. 4.7. Зависимости на максималната мощност на турбината от скоростта на въртене а) и на изходната мощност на инвертора от входното постоянно напрежение б).

На Фиг. 4.8 и Фиг. 4.9 са показани сравнения между симулационни и експериментални резултати за работата на изправителя и инвертора в системата.

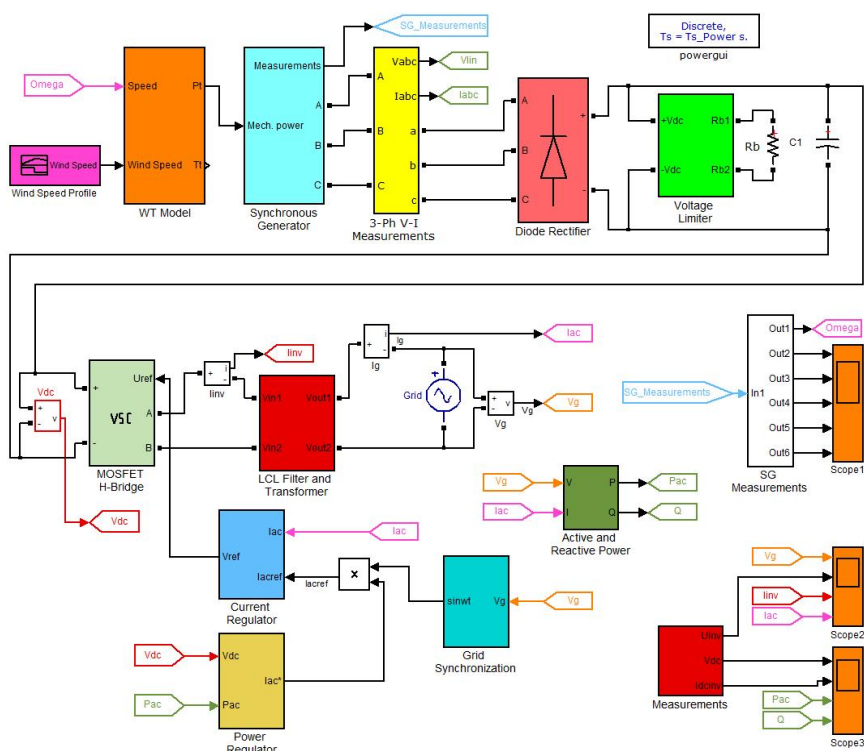


Фиг. 4.8. Напрежение на входа на инвертора (горе), входен ток на инвертора (по средата), моментна мощност на входа на инвертора (долу), а) симулация; б) осцилограма.



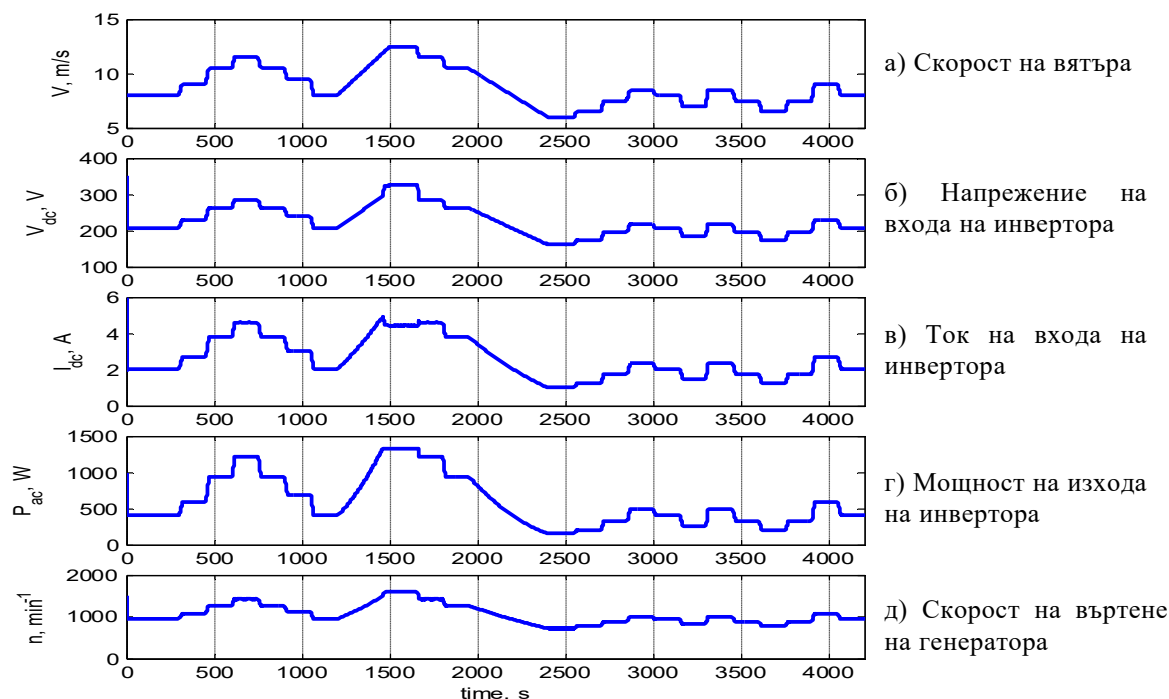
Фиг. 4.9. Напрежение на мрежата (горе), изходен ток на инвертора (долу) при изходна мощност $P_{ac} = 1276W$ и скорост $n = 1460 \text{ min}^{-1}$, а) симулация; б) осцилограма.

До тук в тази глава бяха представени математически модели на елементите изграждащи ВЕПС. На Фиг. 4.10 са показани всички елементи, свързани помежду си в обобщен модел на ВЕПС в Simulink, който следва блоковата схема от Фиг. 4.1.



Фиг. 4.10. Структура на разработения цялостен модел на ВЕПС в Simulink.

На Фиг. 4.11 са показани резултати от симулация с разработения модел на ВЕПС в среда Simulink. Времетраенето на числения експеримент е 4200s или 70min. Използван е изкуствено създаден профил на скоростта на вятъра, показан на Фиг. 4.11 (а).

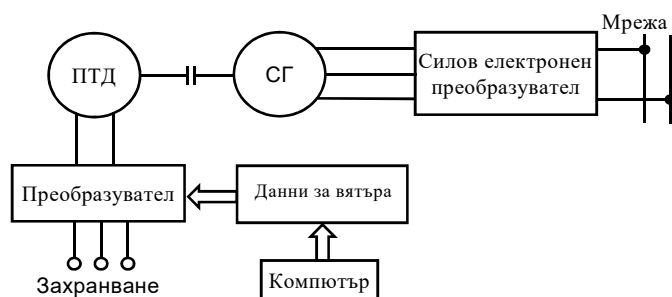


Фиг. 4.11. Резултати от симулационно изследване с модела на ВЕПС в Simulink.

Вследствие на промените на скоростта на вятъра се променя мощността на турбината и скоростта на въртене на генератора - Фиг. 4.11 (д). Това води до изменение на напрежението на генератора и съответно на постоянното напрежение на входа на инвертора V_{dc} , показано на Фиг. 4.11(б). Системата за управление на инвертора променя изходната мощност P_{ac} съобразно входното напрежение, съгласно зададената крива от Фиг. 4.11(б). Като резултат от това се променя и входният ток на инвертора I_{dc} - Фиг. 4.11(в).

4.5. Моделиране на емулатор на вятърна турбина

Емулаторът на вятърна турбина е изграден с постояннотоков двигател (ПТД) с независимо възбуждане, захранван от мостов транзисторен преобразувател с ШИМ. Блоквата диаграма на вятърния емулатор е показана на Фиг. 4.12.



Фиг. 4.12. Блокова схема на емулатора на вятърна турбина.

Идеята е да се замени роторът на вятърна турбина и мултипликаторът с компютър, регулатор, силов електронен преобразувател и ПТД. Постояннотоковият двигател е директно куплиран с вала на генератора.

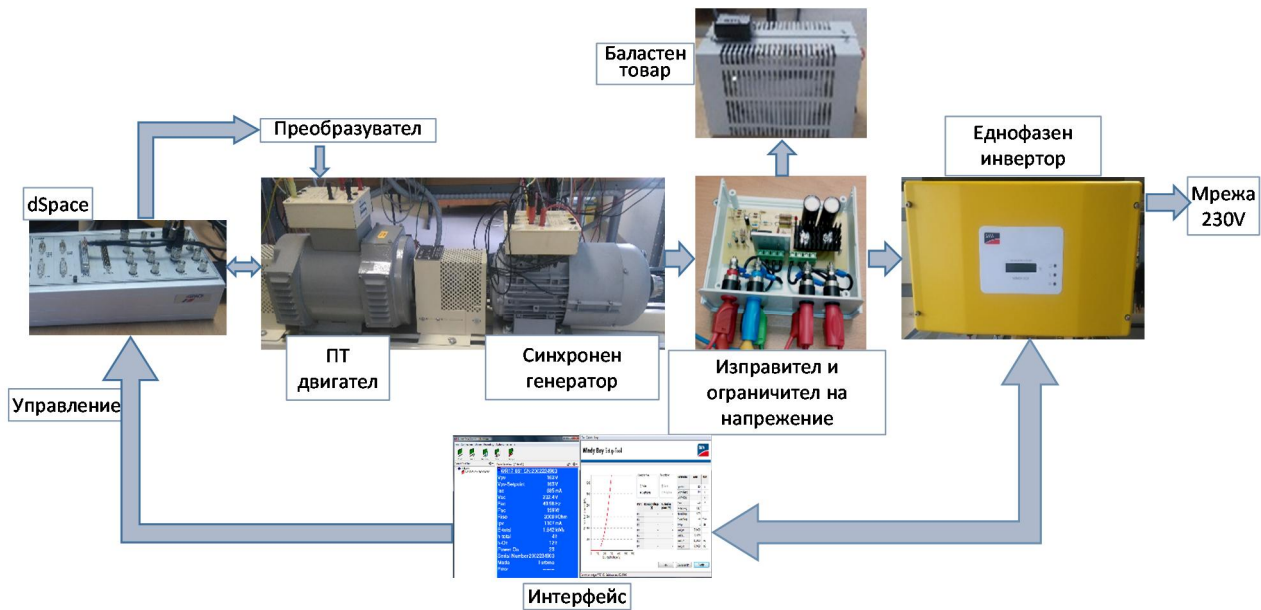
4.5.1. Модел на контролера

Основната цел на контролера е да изчислява и регулира въртящия момент и скоростта на въртене на постояннотоковия двигател, така че да пресъздава точно характеристика на въртящия момент от скоростта на въртене на вятърната турбина при зададена скорост на вятъра.

Блоковата схема на разработения симулационен модел на емулатор на ВТ е показана на Фиг. 4.13.

ГЛАВА 5. Експериментално изследване на ВЕПС и валидация на моделите

В тази глава са представени обобщени резултати от експериментални изследвания на лабораторен модел на ВЕПС с малка мощност. Структурна схема на стенда е показана на Фиг. 5.1.



Фиг. 5.1. Структурна схема на стенд за физическо моделиране на ВЕПС.

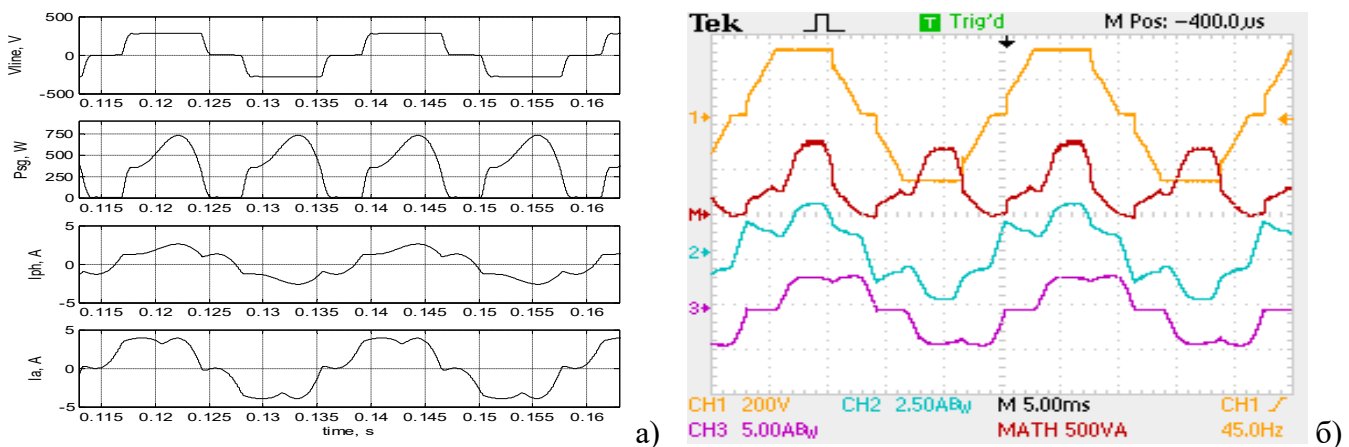
Основните параметри в структурната схема са следните:

Постояннотоков двигател, 1500 W, 220V, 9A, 1500min^{-1} ; трифазен синхронен генератор с електромагнитно възбуждане 1500W, 400V, 1500min^{-1} , възбуждане 1.9A, задвижван с променлива скорост на въртене от постояннотоков двигател; трифазен диоден токоизправител; ограничител на напрежение с ограничение на напрежението на 360V и баластен товар; инвертор, свързан към мрежата, Windy Boy 1700 с номинална мощност 1550W; транзисторен преобразувател за регулиране скоростта на въртене на двигателя; микропроцесорна система dSPACE ACE1104.

5.1. Експериментално изследване на синхронен генератор

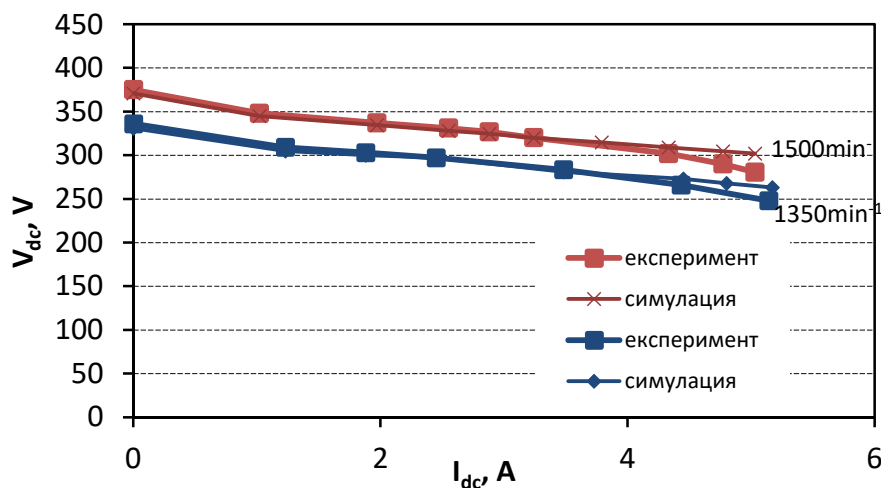
Проведено е експериментално изпитване на СГ съвместно с изправителя. Изследването се прави с цел да се определят параметрите на СГ, необходими за симулационните модели, както и за изчисляване на кривата на мощността, която се задава на инвертора.

На Фиг. 5.2 са показани линейното напрежение, мощността, фазовият и линейният ток на генератора при скорост на въртене 1350min^{-1} . Направено е сравнение на симулационните и експериментални резултати, което показва много добро съвпадение.



Фиг. 5.2. Отгоре надолу са показани: линейно напрежение, мощност на генератора, фазов и линеен ток при скорост на въртене 1350min^{-1} и работа с диоден изправител и товар.
а) симулация; б) осцилограма.

На Фиг. 5.3 е показано сравнение на симулационни и експериментални резултати на зависимостта на напрежението V_{dc} от тока I_{dc} при две скорости на въртене 1350min^{-1} и 1500min^{-1} .



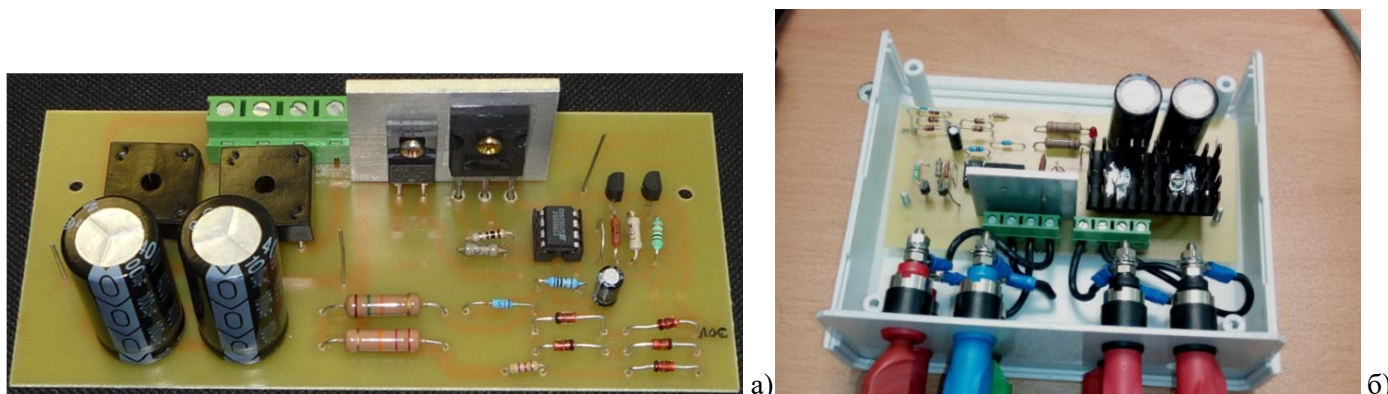
Фиг. 5.3. Отгоре надолу са показани: линейно напрежение, мощност на генератора, фазов и линеен ток при скорост на въртене 1350min^{-1} и работа с диоден изправител и товар.
а) симулация; б) осцилограма.

Съвпадението между симулацията и експерименталните резултати е доста добро. По-голяма разлика около (10%) се получава в края на характеристиката, при големите токове. Това вероятно се дължи на размагнитващото действие на реакцията на тока на генератора, което не се отчита в симулационния модел.

5.2. Изследване на изправител и ограничител на напрежение за ветрогенератор с малка мощност

5.2.1. Практическа реализация на токоизправителя и ограничителя на напрежение

Токоизправителят и ограничителят на напрежението са монтирани върху печатна платка. На Фиг. 5.4 (а) е показана платката с вече запоените елементи, както и завършеният вид на ограничителя на напрежение и токоизправителя, монтирани в пластмасова кутия на Фиг. 5.4 (б).

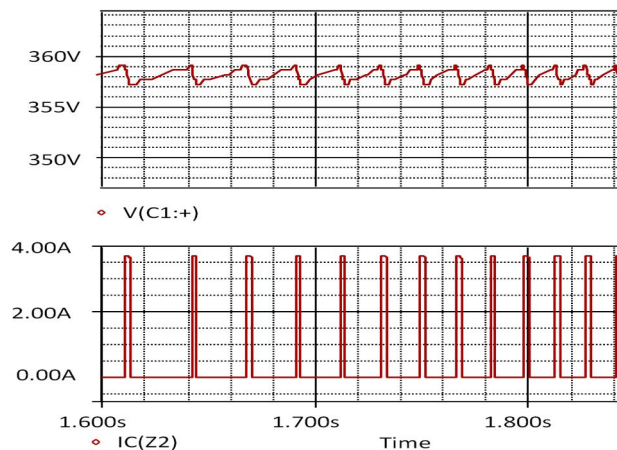


Фиг. 5.4. Печатна платка със запояни елементи върху нея (а) и завършен вид на ограничителя на напрежение и токоизправителя, монтирани в пластмасова кутия (б).

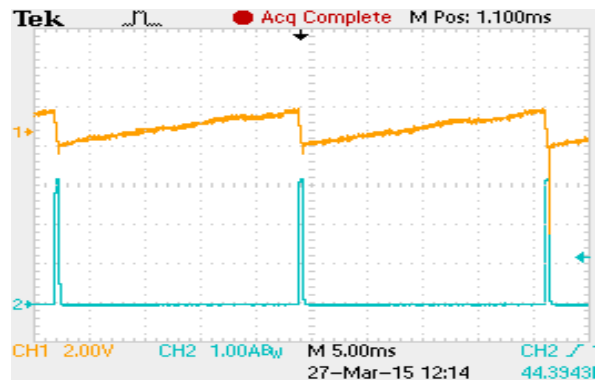
5.2.2. Експериментално изследване на токоизправител и ограничител на напрежение

Завършената печатната платка е захранена с постоянно напрежение с цел да се провери дали ще работи коректно. Баластният резистор е реостат със съпротивление 100Ω и 800W мощност.

На Фиг. 5.5 и Фиг. 5.6 са показани сравнения между симулацията и реално регистрираните форми на токовете и напреженията на ограничителя на постоянното напрежение. Хистерезисът е $\pm 1\text{V}$ около напрежението на ограничаване, което има измерено стойност 358V . От графиките се вижда, че получените експериментални резултати напълно отговарят на проведената симулация.



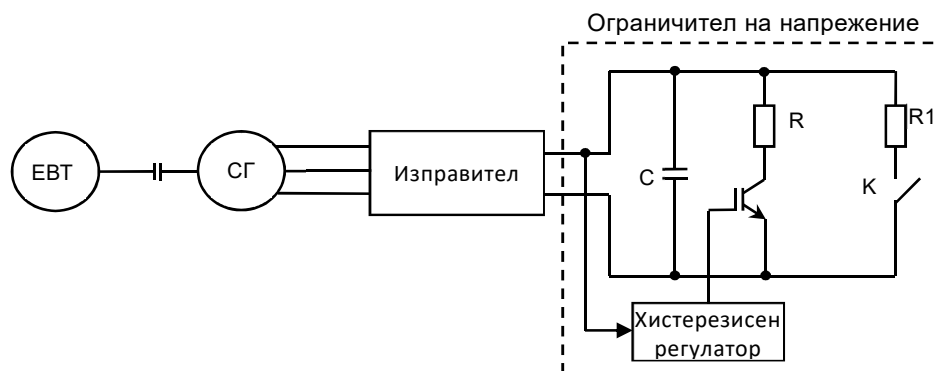
Фиг. 5.5. Симулация: напрежение V_{dc} (горе) и ток през баластния резистор (долу).



Фиг. 5.6. Осцилограма на напрежението V_{dc} (горе CH1) и тока през резистора (долу CH2).

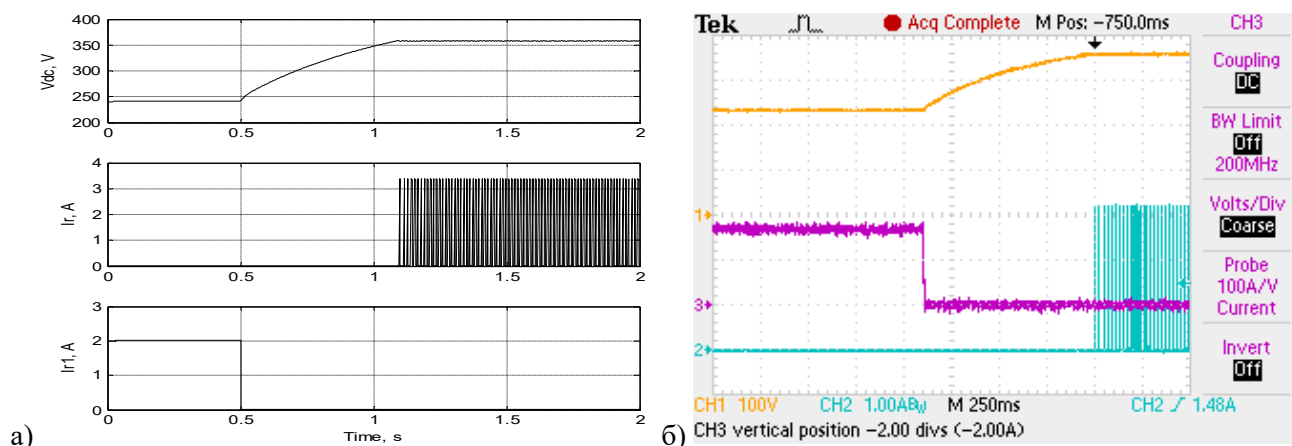
5.2.3. Изследване на ограничителя на напрежение при отпадане на товара

На Фиг. 5.7 е показана блоковата схема на схемата за изследване на ограничителя на напрежение при отпадане на товара на ветрогенератора. Допълнителният резистор R_I се изключва с ключа K , като по този начин се симулира отпадане на товара. Отпадането на товара може да стане например при изключване на инвертора от мрежата или при повреда в инвертора. Проведени са симулационни и експериментални изследвания с цел да се види поведението на ограничителя при динамични условия на работа.



Фиг. 5.7. Блокова схема за изследване на ограничителя на напрежение.

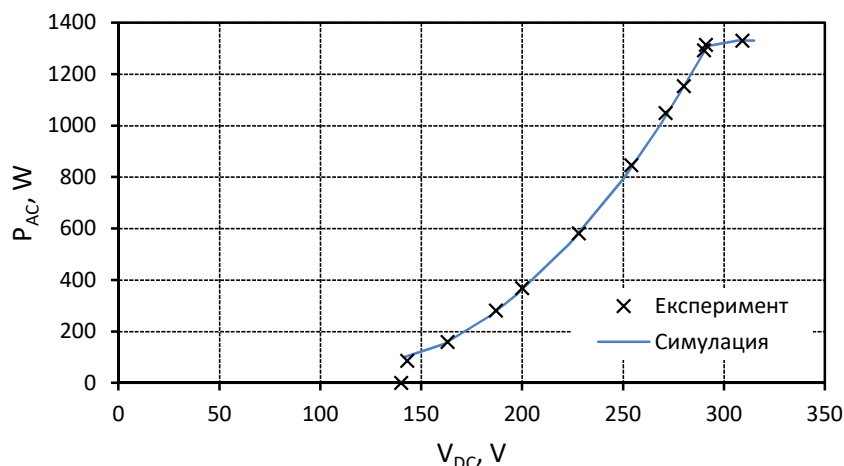
На Фиг. 5.8 са показани сравнения между симулацията и реално снети форми на токове и напрежение на ограничителя при отпадане на товара. Целта е да се установи дали при повишаване на напрежението ограничителят ще сработи. Опитът е извършен с използване на емулатор на ВТ при скорост на вятъра 8 m/s.



Фиг. 5.8. Напрежение V_{dc} и ток през баластния резистор при отпадане на товара на ВГ за скорост на вятъра 8m/s. а) симулация; б) осцилограма.

5.3. Експериментално изследване на еднофазен инвертор

На Фиг. 5.10 е показано сравнение между симулационно и експериментално снети криви $P_{ac}(V_{dc})$ на инвертора без използване на емулятора на ВТ.

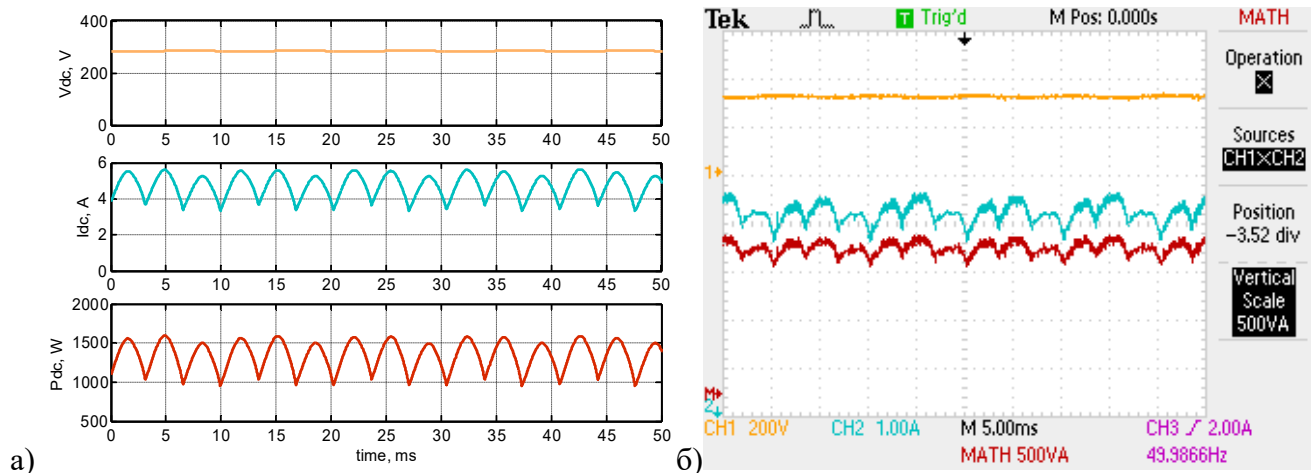


Фиг. 5.9. Сравнение между получена чрез симулации и експериментално снета крива на мощността на инвертора в зависимост от входното напрежение без емулятор на вятърна турбина.

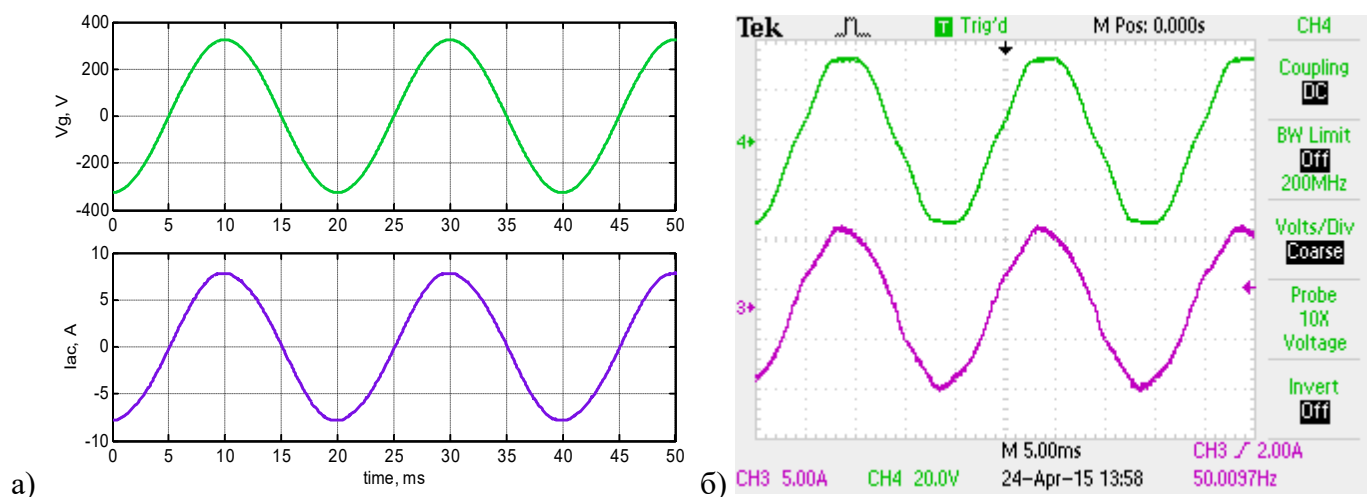
Начинът за снемане на характеристиката е следният. При експерименталната крива се задават различни скорости на въртене на СГ, без участието на емулятора на ВТ. Цялата система работи със зададената крива на мощността на инвертора. Инверторът се стреми да работи по тази крива и съответно консумира мощност, която съответства на дадена точка от тази крива. Изчисляването на симулационната характеристика се извършва по идентичен алгоритъм както експерименталната. Особено при симулационната крива, е че се задават твърди скорости на въртене в модела на генератора.

Характеристиката започва от 140V, защото това е минималното входно напрежение на инвертора, при което той сработва, максималното достигнато напрежение е 309V, при което изходящата мощност е 1330W. При по-високи скорости работната точка остава последната от графиката, тъй като инверторът навлиза в ограничение на мощността. От графиката може да се види много доброто съвпадение между симулационните и експерименталните резултати.

На Фиг. 5.10 и Фиг. 5.11 са показани сравнения между експерименталните и симулационните резултати за токовете и напреженията на изправителя и инвертора в системата. Демонстрирани са получените резултати при скорост на въртене на генератора 1460 min^{-1} и изходяща мощност 1276W. Пулсациите на постоянния ток се получават от напрежението на генератора и трифазния диоден изправител, който създава 6 пулсации за един период. Формата на напрежението е относителна гладка, защото големият кондензатор на входа на инвертора го изглажда.



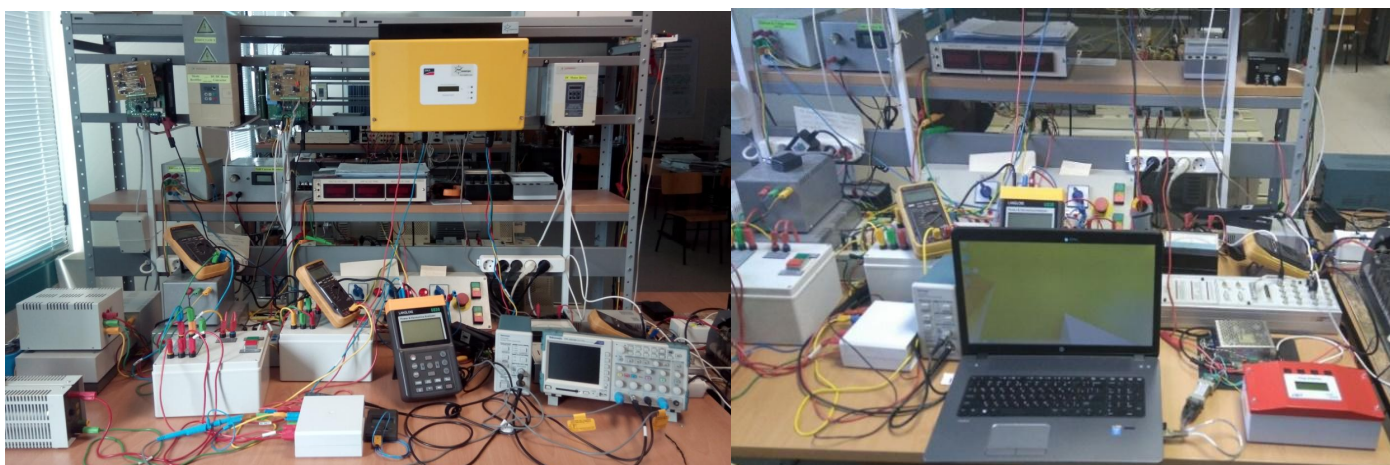
Фиг. 5.10. Напрежение на входа на инвертора (горе), входен ток на инвертора (по средата), моментна мощност на входа на инвертора (долу) при изходна мощност $P_{ac} = 1276 \text{ W}$ и скорост $n = 1460 \text{ min}^{-1}$, а) симулация; б) осцилограма.



Фиг. 5.11. Напрежение на мрежата (горе), изходен ток на инвертора (долу) при изходна мощност $P_{ac} = 1276W$ и скорост $n = 1460 \text{ min}^{-1}$ а) симулация; б) осцилограма.

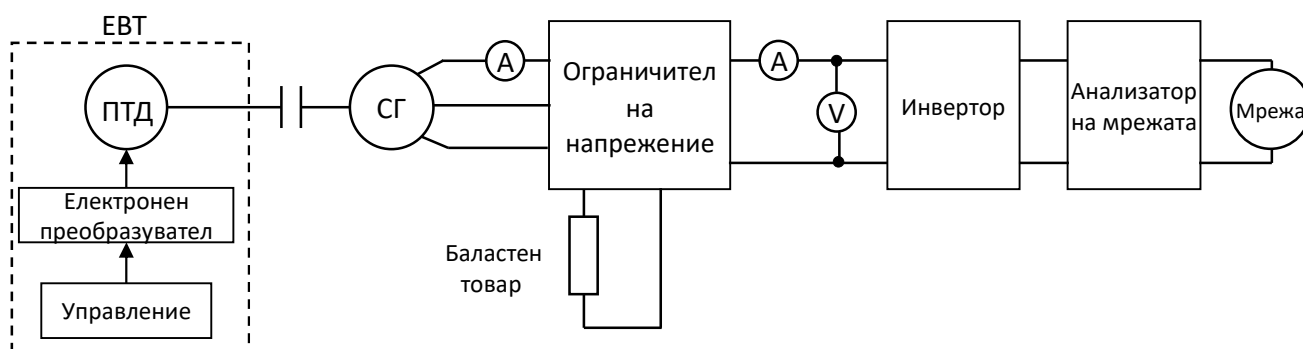
5.4. Експериментално изследване на цялата система

На Фиг. 5.12 е показана снимка на експерименталния стенд при провеждане на опитите.



Фиг. 5.12. Снимки на системата при провеждане на експериментите.

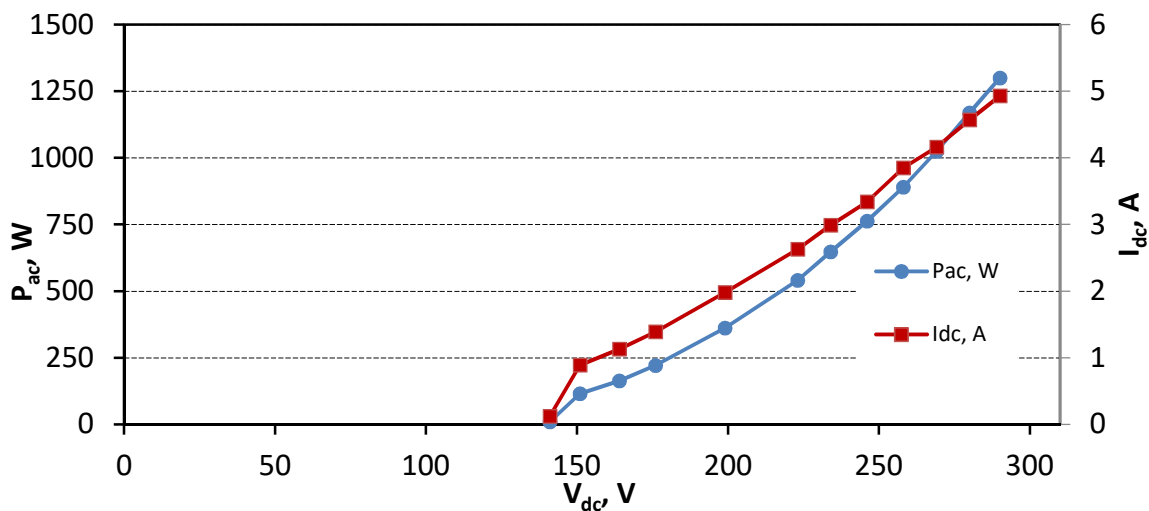
На Фиг. 5.13 фигура е показана схемата на опитната постановка с измервателна апаратура.



Фиг. 5.13. Схема на опитната постановка с измервателна апаратура.

На Фиг. 5.14 са показани зависимостите на изходящата мощност и постоянният ток във функция от постоянното напрежение.

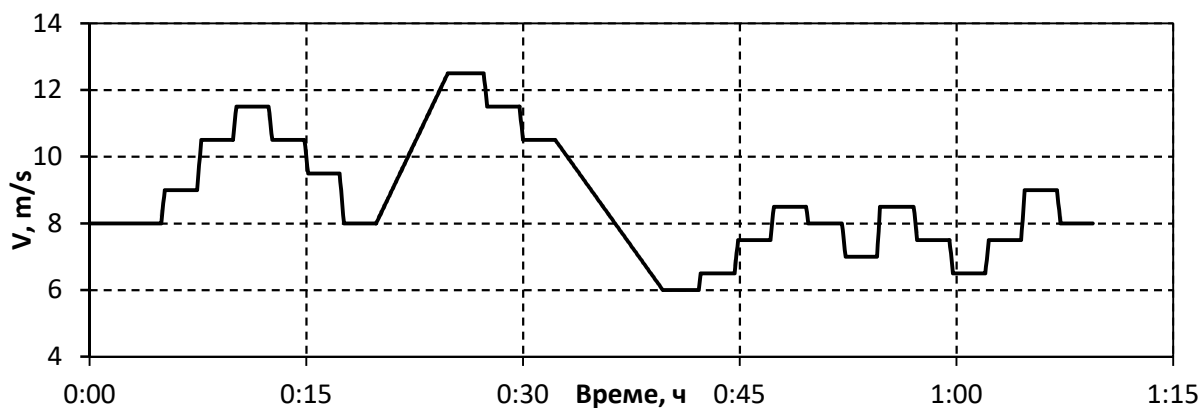
Характерът на всички криви се определя от кривата на мощност, зададена на инвертора, която би трябвало да следва максималната мощност на турбината.



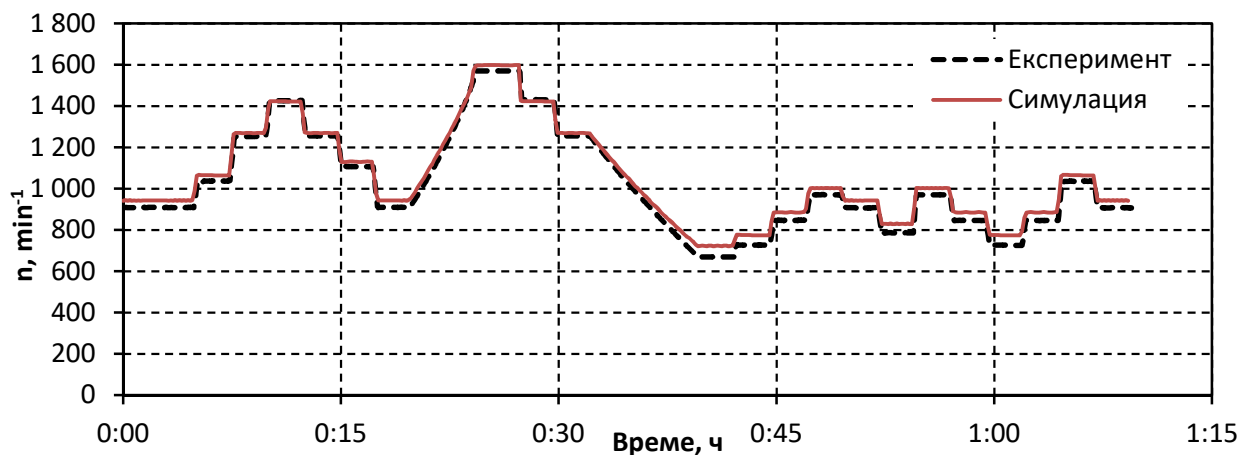
Фиг. 5.14. Зависимост на изходящата мощност P_{ac} и постоянния ток I_{dc} от постоянното напрежение V_{dc} .

Проведен е експеримент със стенда при променлива скорост на вятъра. Зададен е профил на скоростта на вятъра, който се обработва от разработения емулатор на ВТ. Данните са регистрирани с помощта на програмата Sunny Data Control и инструментите за събиране на данни в dSPACE. Експерименталните и симулационни резултати са изчертани в обща координатна система с цел по-лесно сравняване помежду им.

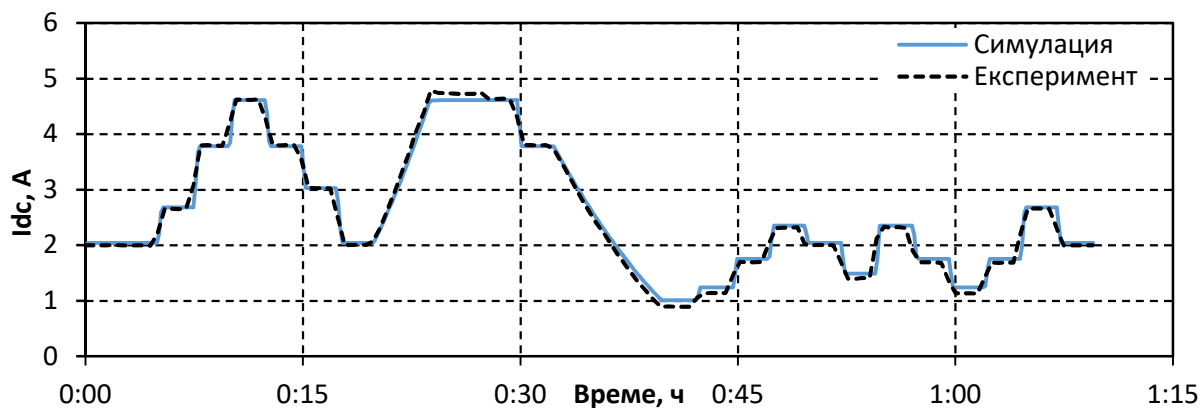
На Фиг. 5.15 е показан профил на скоростта на вятъра, използван при изследванията на системата. На Фиг. 5.16 - Фиг. 5.19 са показани получените резултати съответно за скоростта на въртене n , постоянния ток I_{dc} , постоянното напрежение V_{dc} и изходящата мощност P_{ac} .



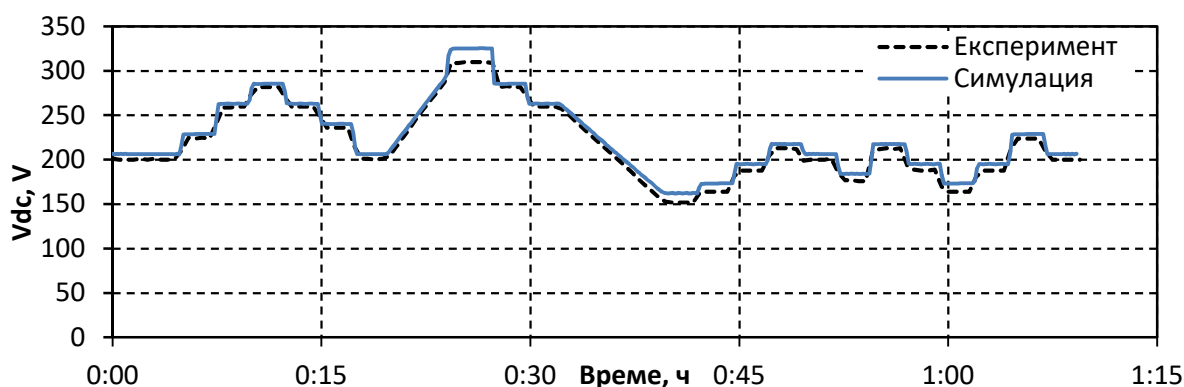
Фиг. 5.15. Профил на вятъра използван при симулационните и експерименталните изследвания.



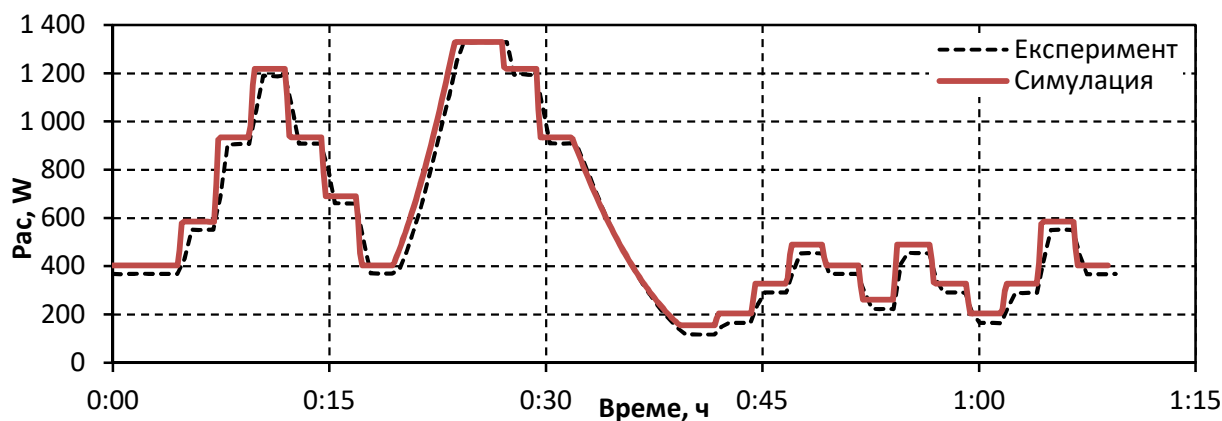
Фиг. 5.16. Резултати от изследването на цялата система за скоростта на въртене n , експериментални данни (с прекъснати линии) и теоретични (плътни линии).



Фиг. 5.17. Резултати от изследването на цялата система за постоянния ток I_{dc} , експериментални данни (с прекъснати линии) и теоретични (плътни линии).



Фиг. 5.18. Резултати от изследването на цялата система за постоянно напрежение V_{dc} , експериментални данни (с прекъснати линии) и теоретични (плътни линии).



Фиг. 5.19. Резултати от изследването на цялата система за изходящата мощност P_{ac} , експериментални данни (с прекъснати линии) и теоретични (плътни линии).

Експерименталните данни показват много добро съвпадение със симулационните резултати и потвърждават валидността на разработените модели на ВЕПС с малка мощност. Най-големи разлики между експерименталните и симулационните резултати се наблюдават при изходящата мощност P_{ac} и скоростта на въртене n при ниски скорости на вятъра (6m/s). Наблюдава се и разлика при постоянното напрежение V_{dc} при скорост на вятъра 12m/s. Това може да се дължи на някои от следните причини: непълно съвпадение на зададената крива на мощността на инвертора с кривата на максималната мощност на турбината; неточно отработване на въртящия момент на турбината от страна на ДПТ поради разлики в коефициента на момента и неточно определени загуби в двигателя; реалният регулатор на изходящата мощност на инвертора, използван при физическия експеримент, е с по-голяма времеконстантата от регулатора, използван при симулациите.

Приноси на дисертационния труд

Научно-приложни приноси:

1. Разработени са два математични модела на електрическите характеристики на ФВ модули, основани на експериментални данни и на данни от производителите. Моделите са приложени за фотоволтаични панели, произведени по различни технологии и от различни материали.

2. Разработен е модел от тип „вход-изход“ на фотоволтаични генератори, основан на модела на Дюриш и който е валиден за всички типове изследвани панели. Доказано е, че моделът на Дюриш може да бъде опростен чрез пренебрегване на влиянието на въздушната маса.

3. Предложен е модел на синхронен генератор с електромагнитно възбуждане, който е подходящ за изследване на режими на работа с изменение на скоростта на въртене в широки граници. Разработен е симулационен модел на синхронния генератор, предназначен за среда SimPowerSystems на Matlab/Simulink.

4. Разработен е модел на еднофазен инвертор с трансформатор, свързан към електрическата мрежа, заедно със системата за управление на мощността.

5. Разработен е симулационен модел на цялата система за преобразуване на вятърната енергия, която включва: вятърна турбина, синхронен генератор с електромагнитно възбуждане, токоизправител и ограничител на напрежение, еднофазен инвертор с трансформатор, свързан към електрическата мрежа.

6. Разработен е модел на емулятор на вятърна турбина, който позволява изследване на ВЕПС в лаборатория без наличието на реална вятърна турбина.

Приложни приноси

1. Изградена е експериментална платформа за изследване на различни типове фотоволтаични системи, при което докторантът е бил част от колектива на проекта.

2. Получени са данни и е проведено експериментално сравнително изследване на фотоволтаични генератори с панели, произведени по различни технологии, и работещи при еднакви реални условия – слънчева радиация и температура на околната среда.

3. Разработен е и реализиран емулятор на вятърна турбина на базата на двигател за постоянен ток с електронен преобразувател и микропроцесорна система.

4. Разработени са и са реализирани изправител и ограничител на напрежение за ВЕПС с малка мощност.

5. Емуляторът на вятърна турбина, изправителят и ограничителя на напрежение са включени в конфигурацията на стенд за физическо моделиране на ВЕПС.

6. Проведено е експериментално изследване със стенд за изследване на ВЕПС и са верифицирани математическите и симулационните модели.

Списък на публикациите на автора, свързани с дисертационния труд

- [1] З. Зарков, В. Миленов, Я. Ненова, С. Рафаилов. Сравнително изследване на тънкослойни фотоволтаични панели. Годишник на Технически университет – София, Том 63, книга 5, 2013с. 321-330.
- [2] З. Зарков, Л. Стоянов, Х. Кънчев, В. Миленов, В. Лазаров. Сравнително изследване на фотоволтаични системи с различни видове панели. Екологично инженерство и опазване на околната среда, №3, 2014, с.47-56.
- [3] Z. Zarkov, V. Milenov, I. Garciarena Martincorena. Study of Small-Power Wind Generator with Single-Phase Grid-Connected Inverter. Challenges in Higher Education & Research, vol. 13, June 2-5, Sozopol, Bulgaria, 2015, pp. 135-140.
- [4] Z. Zarkov, V. Milenov. Wind turbine emulator with DC motor drive. Fourteenth International conference on electrical machines, drives and power systems. ELMA2015, 1-3 Oct. 2015, Varna, Bulgaria, pp. 146-151.
- [5] Z. Zarkov, L. Stoyanov V. Milenov, H. Voynova, V. Lazarov. Modeling of PV generators from different technologies - Case study. Proceedings of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, Varna 2016, pp. 419-426.
- [6] Z. Zarkov, L. Stoyanov, H. Kanchev, V. Milenov, V. Lazarov. Study of Photovoltaic Systems Performances with Different Module Types. Journal Materials Science Forum, Switzerland, Vol. 856, 2016, pp. 279-284, SJR 0.186.
- [7] В. Миленов. Моделиране на елементи на вятърен генератор с малка мощност. Годишник на Технически университет- София, Том 66, книга 3, 2016, с. 231-240.
- [8] Л. Стоянов, З. Зарков, В. Лазаров, В. Миленов. Изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия. Годишник на Технически университет- София, Том 68, книга 1, 2018, с. 283-290.

ELECTRICITY PRODUCTION SYSTEMS FROM SUN AND WIND ENERGY

ABSTRACT

Renewable energy systems are an important part of the European countries' energy strategy and the objectives set by the European Commission (EC) for the development of the energy market, include the serious development of this sector

Increasing the share of renewable energy sources and their introduction into households are measures to limit long-term pollution of the atmosphere. Examples of systems suitable for this purpose are: home photovoltaic systems, small wind generators, small hydropower plants, etc.

Photovoltaic and wind generators are an integral part of the power systems of many of the world's countries. In addition, they are often incorporated into hybrid systems that supply isolated consumers or supply green electricity to consumers. That is why research and modeling photovoltaic and wind generators is essential for their development and further implementation in practice.

The aim of the dissertation is to model and study the processes of energy conversion in systems for electricity generation from the sun and wind energy.

Some of the most important tasks at the dissertation are: development of models of the electrical characteristics of PV panels; development of energy models of type "input-output" for photovoltaic generators; conducting experimental studies of photovoltaic panels and generators under real operating conditions; developing a complete simulation model for a wind power conversion system, and expanding the configuration of a test bench for WECS and conducting experimental studies with the bench.

In the first chapter, analyzes of the solar and wind energy systems are done. On the basis of analysis the following more important conclusions are made: in the studied literature, the modeling of the electrical characteristics of PV panels is mainly focused on crystalline silicon modules. In recent years, various new types of PV panels have been introduced, mainly produced by thin-film technology. In most cases, the authors do not disclose how experimental characteristics have been obtained - with what equipment and under what conditions - real or laboratory. There are relatively few literary sources in which all the elements constituting the wind power conversion systems have been researched and modeled, and all elements of WECS are connected together and considered as one system.

In the second chapter, is made modeling of the electrical characteristics of PV panels and generators produced by different technologies, as well as of single phase inverters for PV. Two models of the I-V characteristics of PV panels from different types are developed. The first model uses data from experimental test and the second uses data for PV panels given by the manufacturers. Both models were tested with experimentally captured characteristics. In this chapter is presented an efficiency model of PV panels that is valid for all types of studied panels.

In the third chapter, is presented an experimental platform for photovoltaic systems research. The platform consists of three trackers with installed five PV generators from currently available photovoltaic technologies. The realized installations have close maximum power and the same inverters, which allows a comparative study of different photovoltaic panels under identical conditions. In the chapter, is presented an experimental comparative study of sun-tracking and fixed PV generators.

In the fourth chapter, is presented the developed models of all elements of a WECS consisting of a wind turbine, synchronous generator with electromagnetic excitation, rectifier and voltage limiter, single phase inverter with transformer connected to the mains. A simulation model of the whole wind power conversion system is developed which includes the listed elements. The system operates with variable rotation speed of the turbine and the generator and provides a working point close to the maximum power at different wind speeds.

In the fifth, chapter are presented the results obtained from experimental studies with a test bench for physical modeling of WECS. The purpose of this study is to verify the developed models in Chapter 4. For the purpose of the experimental study, a test bench for physical modeling of WECS with a synchronous generator is equipped. In addition, rectifier and voltage limiter for small WECS are built and studied.